**T.C.**
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# TIG, MIG ve FSW Yöntemleri Kullanılarak Birleştirilen AA7075/AA5182 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özeliklerinin Belirlenmesi

**EDİP ÇETKİN**

**DOKTORA TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**AĞUSTOS-2018**
**BATMAN**
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Edip ÇETKİN tarafından hazırlanan "**TIG, MIG ve FSW Yöntemleri Kullanılarak Birleştirilen AA7075/AA5182 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özeliklerinin Belirlenmesi**" adlı tez çalışması 03/08/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

| **Jüri Üyeleri** | | **İmza** |
|---|---|---|
| **Başkan** | Prof. Dr. Murat Demir AYDIN | |
| **Danışman** | Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ | |
| **Eş Danışman** | Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK | |
| **Üye** | Doç. Dr. Erol KILIÇKAP | |
| **Üye** | Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ | |
| **Üye** | Doç. Dr. Hamit ADİN | |
| **Üye** | Dr. Öğr. Üyesi Zülküf DEMİR | |

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Bahattin IŞCAN
FBE Müdürü

*Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından 2017-DOKTORA-2 nolu proje ile desteklenmiştir.

** Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK bu tez çalışmasının eş danışmanıdır.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.



Edip ÇETKİN
Tarih: 03/08/2018

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

## TIG, MIG VE FSW YÖNTEMLERİ KULLANILARAK BİRLEŞTİRİLEN AA7075/AA5182 KAYNAKLI BAĞLANTILARIN MIKROYAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ

**Edip ÇETKİN**

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**2018, 153 Sayfa**

**Jüri**
**Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**
**Eş Danışman: Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK**
**Prof. Dr. Murat Demir AYDIN**
**Doç. Dr. Erol KILIÇKAP**
**Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ**
**Doç. Dr. Hamit ADİN**
**Dr. Öğr. Üyesi Zülküf DEMİR**

Alüminyum ve alaşımları; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve iyi kaynak kabiliyeti gibi özeliklere sahip olduğundan dolayı günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemeleridir. Alüminyum ve alaşımları, ergitme esaslı ve basınç esaslı (katı faz) kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmektedirler. TIG ve MIG kaynak yöntemleri en çok tercih edilen ergitme esaslı kaynak yöntemleridir. Ancak ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde yüksek ısıdan dolayı kaynak metalinde bazı metalurjik problemler oluşmakta ve bu durum kaynaklı bağlantılarda mekanik özeliklerin zayıflamasına sebebiyet vermektedir. Bu amaçla, alüminyum ve alaşımlarının kaynağı için ergitme oluşturmaksızın gerçekleştirilebilecek bir yöntem arayışı sonucu İngiliz Kaynak Enstitüsü tarafında Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) bulunmuş ve geliştirilmiştir. Böylece alüminyum plakaların alın alına birleştirilmesi için FSW yöntemi de kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem ergitme esaslı kaynak yöntemlerine göre birçok avantaj sunmaktadır ve başarılı uygulamaları sayesinde havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv, raylı ve zırhlı taşıt endüstrilerinde kullanım alanı bulmaktadırlar. Bu çalışmada, farklı özelliklerdeki AA7075 ve AA5182 alüminyum alaşım plakaları TIG, MIG ve FSW yöntemleriyle birleştirilmiştir. TIG ve MIG ile yapılan birleştirme işlemlerinde farklı amper (130, 140 ve 150 A) değerleri ve iki farlı kaynak ağzı (V ve X) kullanılmıştır. FSW kaynağında ise farklı dönme devirleri (980, 1325 ve 1800 dev/dk), kaynak ilerleme hızları (108 ve 233 mm/dk) ve iki farklı geometriye sahip karıştırıcı uç (konik helisel ve üçgen) kombinasyonları kullanılarak kaynaklar yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların mikroyapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Her kaynaklı plakadan çıkarılan numunelerin kaynak bölgesindeki Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca kaynaklı plakalardan alınan deney numunelerine çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Çekme testi sonrası oluşan kırılma yüzeyleri ve olası kaynak hataları SEM ile analiz edilmiştir. FSW yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda, kaynak esnasında birleşmenin alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşmesi ve birleşme bölgelerinde daha az boşluklu mikroyapı oluşumu bu kaynaklı bağlantılara ait mekanik özeliklerinin TIG ve MIG kaynaklı bağlantıların mekanik özeliklerinden daha iyi olmasına katkı sağladığı görülmüştür. En iyi mekanik özellikler FSW yönteminde 980 dev/dk dönme devrinde, 108 mm/dk kaynak ilerleme hızı ve konik helisel kanala sahip karıştırıcı ucun kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Bu değerler çekme testi için 264,7 MPa, yorulma testi için ise 158,8 MPa'dır. Sertlik değeri ise bir birine oldukça yakın olup dönme devrine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. En yüksek sertlik 1325 dev/dk dönme devrindeki bağlantıda 87 HV olarak elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** AA5182, AA7075, FSW, Mekanik Özellikler, MIG, TIG.

# ABSTRACT

## Ph.D THESIS

## DETERMINATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AA7075/AA5182 WELD CONNECTIONS JOINTED USING TIG, MIG AND FSW METHODS

**Edip ÇETKİN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF BATMAN UNIVERSITY**
**THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHANICAL ENGINEERING**

**2018, 153 Pages**

**Jury**
**Advisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ**
**Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK**
**Prof. Dr. Murat Demir AYDIN**
**Assoc. Prof. Dr. Erol KILIÇKAP**
**Assoc. Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ**
**Assoc. Prof. Dr. Hamit ADİN**
**Asst. Prof. Dr Zülküf DEMİR**

Aluminum and its alloys are the most commonly used building materials today because of their properties such as low densities, high strengths, good corrosion resistance and good weldability. Aluminium and its alloys can be joined with melting-based and pressure-based (solid phase) welding methods. TIG and MIG methods are the most preferred welding methods based on melting. However, due to the high temperature in melting-based welding methods, some metallurgical problems occur in the weld metal, which causes the mechanical properties to weaken in the welded joints. For this purpose, friction stir welding (FSW) has been found and developed by the British Welding Institute in the result of method research, which can be carried out without melting, for the weld of aluminium and its alloys. Thus, FSW method is also started to use for joining to the forehead of aluminium plates. This method offers many advantages over melting-based welding methods, and thanks to its successful applications, it finds usage area in the aerospace, space, marine, automotive, railway and armoured vehicles industries. In this study, AA7075 and AA5182 aluminium alloy plates in different specifications were joined by TIG, MIG and FSW methods. Different amperes (130, 140 and 150 A) values and two different weld groove (V and X) were used in joining with TIG and MIG. At the FSW, welds were made using different rotation speeds (980, 1325 and 1800 rpm), welding feed rate (108 and 233 mm/min) and stirred tips having two different geometries (conical helical and triangular). Microstructures of welded joints were investigated by an optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Vickers hardness measurements were made in the weld zone of samples removed from each welded plate. Tensile and fatigue tests were also applied to the test specimens from welded plates. After the tensile test, the fracture surfaces and possible welding defects were analysed by SEM. In welded connections joined with the FSW method, it has been seen to contribute that the mechanical properties belonging to these welded joints better than the mechanical properties belonging to the TIG and MIG welded joints. Because the weld carried out at a temperature below the melting temperature of the aluminium alloys, and the microstructure had less porosity. The best mechanical properties were obtained from FSW method in a rotational speed of 980 rpm, a feed rate of 108 mm/min, and a stirrer tip having conical helical. These values are 264.7 MPa for tensile test and 158.8 MPa for fatigue test. The hardness value was very close to each other and varied depending on the rotation speed. The highest hardness was obtained as 87 HV at the connection at 1325-rpm rotation speed.

**Keywords:** AA5182, AA7075, FSW, Mechanical properties, MIG, TIG.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının şekillenmesinde; yönlendirme, bilgi ve tecrübeleriyle destek aldığım çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ ve Sayın Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım bu çalışmaya maddi destek sunan Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BTÜBAP) Koordinatörlüğü'ne ve proje yürütücüm Sayın Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK'e teşekkür ederim.

Batman Üniversitesi'nde yaptığım deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Burak YENİGÜN'e, Sayın Arş. Gör. Fatih DEMİR'e ve Sayın Arş. Gör. Serkan BATI'ya teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca, her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta Babam Fettah ÇETKİN ve Annem Saliha ÇETKİN olmak üzere aileme teşekkürü borç bilirim.

Edip ÇETKİN
BATMAN-2018

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**TEŞEKKÜR** ..... **vi**

**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**

**TABLOLAR LİSTESİ** ..... **ix**

**ŞEKİLLER LİSTESİ** ..... **x**

**SİMGELER** ..... **xvii**

**KISALTMALAR** ..... **xviii**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

1.1. Literatür Çalışmaları ..... 2

**2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI** ..... **13**

2.1. Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik özellikleri ..... 14

2.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması ..... 15

2.2.1. Dövme alüminyum alaşımları ..... 16

2.2.1.1. 1xxx serisi alaşımlar ..... 17

2.2.1.2. 2xxx serisi alaşımlar ..... 17

2.2.1.3. 3xxx serisi alaşımlar ..... 17

2.2.1.4. 4xxx serisi alaşımlar ..... 18

2.2.1.5. 5xxx serisi alaşımlar ..... 18

2.2.1.6. 6xxx serisi alaşımlar ..... 19

2.2.1.7. 7xxx serisi alaşımları ..... 19

2.2.2. Döküm alüminyum alaşımları ..... 20

**3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞI** ..... **22**

3.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri ..... 25

3.1.1. TIG kaynağı ..... 25

3.1.2. MIG kaynağı ..... 27

3.1.3. Oksi asetilen kaynağı ..... 29

3.1.4. Elektrik ark kaynağı ..... 30

3.1.5. Plazma kaynağı ..... 32

3.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri ..... 32

3.2.1. Sürtünme kaynağı ..... 32

3.2.2. Sürtünme karıştırma kaynağı ..... 34

3.2.5.1. Kaynak yönteminin uygulanışı ..... 35

3.2.5.2. Kaynağın işlem karakteristiklerini etkileyen faktörler ..... 36

3.2.5.3. Kaynağın metalurjik yapısı ..... 37

3.2.5.4. Karıştırıcı uç malzemesi ve tasarımı ..... 37

**4. MATERYAL VE YÖNTEM ..... 41**
4.1. Deneysel Çalışmalar ..... 41
4.2. Kaynak Öncesi İşlemler ..... 41
4.2.1. Malzeme ..... 41
4.2.2. Malzemelerin kaynağa hazırlanması ve kaynaklar ..... 42
4.2.2.1. TIG kaynakların yapılması ..... 43
4.2.2.2. MIG kaynakların yapılması ..... 44
4.2.2.3. FSW kaynakların yapılması ..... 46
4.3. Kaynak Parametreleri ve Tasarımı ..... 49
4.4. Kaynak Sonrası Yapılan Muayeneler ..... 51
4.4.1. Metalografik incelemeler ..... 51
4.4.2. Mikrosertlik incelemeleri ..... 53
4.4.3. Çekme deneyleri ..... 53
4.4.4. Yorulma deneyleri ..... 55
**5. DENEY SONUÇLARIN İRDELENMESİ ..... 57**
5.1. Kaynaklı Bağlantıların Makro ve Mikroyapıların Değerlendirilmesi ..... 57
5.1.1. AA5182 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının yapısı ..... 57
5.1.2. TIG kaynaklı bağlantıların yapısı ..... 58
5.1.3. MIG kaynaklı bağlantıların yapısı ..... 64
5.1.4. FSW kaynaklı bağlantıların yapıları ..... 69
5.2. Kaynaklı Bağlantıların SEM Görüntüleri ..... 74
5.2.1. TIG kaynaklı bağlantılarının SEM görüntüleri ..... 74
5.2.2. MIG kaynaklı bağlantılarının SEM görüntüleri ..... 77
5.2.3. FSW kaynaklı bağlantılarının SEM görüntüleri ..... 81
5.3. Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik Sonuçları ..... 84
5.3.1. TIG kaynaklı bağlantılarının mikrosertlik sonuçları ..... 84
5.3.2. MIG kaynaklı bağlantılarının mikrosertlik sonuçları ..... 87
5.3.3. FSW kaynaklı bağlantılarının mikrosertlik sonuçları ..... 89
5.4. Kaynaklı Bağlantıların Çekme sonuçları ..... 92
5.4.1. TIG kaynaklı bağlantılarının çekme sonuçları ..... 93
5.4.2. MIG kaynaklı bağlantılarının çekme sonuçları ..... 98
5.4.3. FSW kaynaklı bağlantılarının çekme sonuçları ..... 103
5.5. Kaynaklı Bağlantıların Çekme Sonrası Oluşan Kırılma Yüzeyleri ..... 107
5.5.1. TIG kaynaklı numunelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri ..... 107
5.5.2. MIG kaynaklı numunelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri ..... 108
5.5.3. FSW kaynaklı numunelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri ..... 109
5.6. Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Sonuçları ..... 110
**6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 121**
6.1. Genel Sonuçlar ..... 121
6.2. Öneriler ..... 126
**KAYNAKLAR ..... 127**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 135**

# TABLOLAR LİSTESİ

**Tablo** **Sayfa**

Tablo 2.1. % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri (Öksüz, 1996) ..... 15

Tablo 2.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması (Öksüz, 1996) ..... 16

Tablo 2.3. Bazı 5xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri (Öksüz, 1996) ..... 18

Tablo 2.4. 7xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri (Öksüz, 1996) ..... 20

Tablo 4.1. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri ..... 41

Tablo 4.2. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ..... 42

Tablo 4.3. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri ..... 42

Tablo 4.4. Deney çalışmasında kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimi ..... 42

Tablo 4.5. Deney çalışmasında kullanılan kaynak telinin mekanik özelikleri ..... 42

Tablo 4.6. TIG kaynağında kullanılan parametreler ..... 49

Tablo 4.7. MIG kaynağında kullanılan parametreler ..... 49

Tablo 4.8. FSW yönteminde kullanılan uç profilleri ve kaynak parametreleri ..... 50

Tablo 4.9. TIG kaynaklı numunelerin kodlama sistemi ..... 50

Tablo 4.10. MIG kaynaklı numunelerin kodlama sistemi ..... 51

Tablo 4.11. FSW kaynaklı numunelerin kodlama sistemi ..... 51

Tablo 5.1. TIG kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları ..... 98

Tablo 5.2. MIG kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları ..... 103

Tablo 5.3. FSW kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları ..... 107

# ŞEKİLLER LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.1. Alüminyum alaşım elementlerinin temel bileşimleri (Şaldır, 2003) ..... 16

Şekil 3.1. Alüminyum alaşımları (Özdinçer, 2006) ..... 24

Şekil 3.2. Alüminyumun alaşımlarında ısıdan etkilenen bölgeler (Oğuz, 1990) ..... 24

Şekil 3.3. TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi (Kadayifçi, 2013) ..... 26

Şekil 3.4. MIG kaynak donanımı (https://abs.cu.edu.tr/ ) ..... 27

Şekil 3.5. Oksi asetilen kaynağı şematik gösterimi (http://www.metaluzmani.com) ..... 30

Şekil 3.6. Elektrik ark kaynağının şematik gösterimi (https://abs.cu.edu.tr/ ) ..... 30

Sekil 3.7. Plazma ark kaynağı (www.industrialmotionsystems.com) ..... 32

Şekil 3.8. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi (Özdemir, 2002). ..... 33

Şekil 3.9. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin aşamaları ..... 36

Şekil 3.10. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımın mikroyapısı (Sarsılmaz, 2008) ..... 37

Şekil 3.11. FSW işleminde karıştırıcı ucun malzemedeki deformasyon evreleri (Mishra ve ark., 2005) ..... 38

Şekil 3.12. Karıştırıcı uç omuz geometrileri (Mishra ve ark., 2005) ..... 38

Şekil 3.13. Farklı geometrilere sahip karıştırıcı uçlar (Zhao ve ark., 2005) ..... 39

Şekil 3.14. FSW işleminde karıştırıcı omzunun malzemedeki deformasyon aşamaları (Mishra ve ark., 2003) ..... 40

Şekil 4.1. TIG kaynak makinesi ..... 43

Şekil 4.2. TIG kaynağı yapılmış plaka (AA7075/AA5182) ..... 44

Şekil 4.3. MIG kaynak makinesi ..... 44

Şekil 4.4. MIG kaynağı yapılmış plaka (AA7075/5182) ..... 45

Şekil 4.5. TIG ve MIG kaynakların X kaynak ağız yapısı ..... 45

Şekil 4.6. TIG ve MIG kaynakların V kaynak ağız yapısı ..... 45

Şekil 4.7. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi ..... 46

Şekil 4.8. FSW Deneysel çalışmasında kullanılan karıştırıcı uçlar ..... 47

Şekil 4.9. FSW kaynağında kullanılan karıştırıcı uç boyutları ..... 47

Şekil 4.10. FSW kaynağının uygulanışı..... 48

Şekil 4.11. FSW yönteminde karıştırıcı uçlar ile yapılan denelerden elde edilen bir plaka ..... 49

Şekil 4.12. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan cihazlar ..... 52

Şekil 4.13. SEM ve EDS analizlerinin gerçekleştirildiği cihaz ..... 52

Şekil 4.14. Sertlik ölçüm cihazı ..... 53

Şekil 4.15. Plazmadan kesilen ve AutoCAD'ten çizilen ASTM-E8 çekme numunesi .. 54

Şekil 4.16. Çekme deney cihazı ..... 54

Şekil 4.17. Plazmadan kesilen ve AutoCAD'ten çizilen ASTM-E466 yorulma numunesi ..... 55

Şekil 4.18. Yorulma deney cihazı ..... 56

Şekil 5.1. AA5182'in optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile EDS analizleri ..... 57

Şekil 5.2. AA7075'in optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile EDS analizleri ..... 58

Şekil 5.3. TIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin kaynak kesitinde oluşan bölgeler. 59

Şekil 5.4. $Tv_{12}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 59

Şekil 5.5. $Tv_{12}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 60

Şekil 5.6. $Tv_{17}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 60

Şekil 5.7. $Tv_{17}14$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 61

Şekil 5.8. $Tx_{12}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 61

Şekil 5.9. $Tx_{12}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 62

Şekil 5.10. $Tx_{17}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 62

Şekil 5.11. $Tx_{17}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 63

Şekil 5.12. $Mv_{38}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 65

Şekil 5.13. $Mv_{38}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 65

Şekil 5.14. $Mv_{45}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 66

Şekil 5.15. $Mv_{45}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 66

Şekil 5.16. $Mx_{38}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 67

Şekil 5.17. $Mx_{38}14$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 67

Şekil 5.18. $Mx_{45}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 68

Şekil 5.19. $Mx_{45}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar ..... 68

Şekil 5.20. FSW yönteminde kaynak kesitinde oluşan bölgeler ..... 70

Şekil 5.21. $FSW_{k1}09$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 70

Şekil 5.22. $FSW_{k1}18$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 70

Şekil 5.23. $FSW_{k2}09$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 71

Şekil 5.24. $FSW_{k2}18$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 71

Şekil 5.25. $FSWu_{1}09$ numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 72

Şekil 5.26. $FSW_{u1}18$ numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 72

Şekil 5.27. $FSW_{u2}09$ numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 73

Şekil 5.28. $FSW_{u2}18$ numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar ..... 73

Şekil 5.29. $Tv_{17}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA7075'in geçiş bölgesi (200X), b-d) Kaynak bölgeleri(200X-2000X), c) AA5182'in geçiş bölgesi (200X) ..... 75

Şekil 5.30. $Tv_{12}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA5182 alaşımı (200X), b) AA5182'in geçiş bölgesi (200X), c-Kaynak bölgesi (200X), d) AA7075'in geçiş bölgesi (200X), e) AA7075 alaşımı (200X) ..... 75

Şekil 5.31. $Tx_{12}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA5182'nin geçiş bölgesi (100X-200X), c-d) Kaynak bölgesi (200X-500X), e-f) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X) ..... 76

Şekil 5.32. $Tx_{17}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA5182'nin geçiş bölgesi (200X), b) Kaynak bölgesi (200X), c) AA7075'in geçiş bölgesi (200X) ..... 77

Şekil 5.33. $Mv_{45}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA5182'in geçiş bölgesi (100X-200X), c) Kaynak bölgesi (200X), d-e) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X) ..... 78

Şekil 5.34. $Mv_{38}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X), c) Kaynak bölgesi (200X), d-e) AA5182'nin geçiş bölgesi (100X-200X) ..... 79

Şekil 5.35. $Mx_{38}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA5182'in geçiş bölgesi (100X-200X), c) Kaynak bölgesi (200X), d-e) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X) ..... 80

Şekil 5.36. $Mx_{45}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA5182'nin geçiş bölgesi, b) Kaynak bölgesi (200X), c) AA7075'in geçiş bölgesi (200X) ..... 80

Şekil 5.37. $FSW_{k1}09$ numunesine ait SEM görüntüleri a) AA5182 alaşımı (200X), b) Kaynak ara yüzey geçiş bölgesi (200X), c) AA7075 alaşımı (200X) ..... 82

Şekil 5.38. $FSW_{k2}09$ numunesine ait SEM görüntüleri a) AA5182 alaşımı (200X-1000X), b) Kaynak ara yüzey geçiş bölgesi (200X-1000X), c) AA7075 alaşımı (200X-1000X) ..... 82

Şekil 5.39. $FSW_{u1}09$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X) ..... 83

Şekil 5.40. $FSW_{u1}18$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X) ..... 83

Şekil 5.41. $FSW_{u2}09$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X) ..... 83

Şekil 5.42. $FSW_{u2}13$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X) ..... 84

Şekil 5.43. TIG-V-12 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 85

Şekil 5.44. TIG-V-17 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 85

Şekil 5.45. TIG-X-12 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 86

Şekil 5.46. TIG-X-17 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 86

Şekil 5.47. MIG-V-38 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 87

Şekil 5.48. MIG-V-45 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 88

Şekil 5.49. MIG-X-38 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 88

Şekil 5.50. MIG-X-45 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri ..... 89

Şekil 5.51. FSW-$f_i$:108 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Konik uç) ..... 90

Şekil 5.52. FSW-$f_i$:233 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Konik uç) ..... 90

Şekil 5.53. FSW-$f_i$:108 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Üçgen uç) ..... 91

Şekil 5.54. FSW-$f_i$:233 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Üçgen uç) ..... 91

Şekil 5.55. Alaşım malzemelerinin çekme-uzama eğrileri ..... 93

Şekil 5.56. AA5182-AA7075 numunelerde çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 93

Şekil 5.57. TIG-V-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 94

Şekil 5.58. TIG-V-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 94

Şekil 5.59. TIG-V-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 95

Şekil 5.60. TIG-V-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 95

Şekil 5.61. TIG-X-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 96

Şekil 5.62. TIG-X-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 96

Şekil 5.63. TIG-X-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 97

Şekil 5.64. TIG-X-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 97

Şekil 5.65. MIG-V-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 99

Şekil 5.66. MIG-V-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 99

Şekil 5.67. MIG-V-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 99

Şekil 5.68. MIG-V-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 100

Şekil 5.69. MIG-X-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 101

Şekil 5.70. MIG-X-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 101

Şekil 5.71. MIG-X-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri ..... 101

Şekil 5.72. MIG-X-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler ..... 102

Şekil 5.73. FSW-$f_i$:108 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Konik uç) ..... 103

Şekil 5.74. FSW'de $f_i$: 108 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Konik uç) ..... 104

Şekil 5.75. FSW-$f_i$:233 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Konik uç) ..... 104

Şekil 5.76. FSW'de $f_i$: 233 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Konik uç) ..... 104

Şekil 5.77. FSW-$f_i$:108 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Üçgen uç) ..... 105

Şekil 5.78. FSW'de $f_i$: 108 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Üçgen uç) ..... 106

Şekil 5.79. FSW-$f_i$:233 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Üçgen uç) ..... 106

Şekil 5.80. FSW'de $f_i$: 233 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Üçgen uç) ..... 106

Şekil 5.81. TIG kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X) ..... 108

Şekil 5.82. MIG kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X) ..... 108

Şekil 5.83. Konik uç için FSW kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X) ..... 109

Şekil 5.84. Üçgen uç için FSW kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X) ..... 110

Şekil 5.85. AA7075 ve AA5182 alaşım EM'lerin S/N diyagramı ..... 111

Şekil 5.86. $Tv_{12}13$ numunesinin S/N diyagramı ..... 112

Şekil 5.87. $Tv_{12}15$ numunesinin S/N diyagramı ..... 112

Şekil 5.88. $Tx_{12}13$ numunesinin S/N diyagramı ..... 113

Şekil 5.89. $Tx_{17}15$ numunesinin S/N diyagramı ..... 113

Şekil 5.90. $Mv_{45}15$ numunesinin S/N diyagramı ..... 114

Şekil 5.91. $Mv_{38}13$ numunesinin S/N diyagramı ..... 114

Şekil 5.92. $Mx_{38}13$ numunenin S/N diyagramı ..... 115

Şekil 5.93. $Mx_{45}13$ numunenin S/N diyagramı ..... 115

Şekil 5.94. $FSW_{k1}18$ numunesinin S/N diyagramı ..... 116

Şekil 5.95. $FSW_{k1}09$ numunesinin S/N diyagramı ..... 116

Şekil 5.96. $FSW_{k2}18$ numunesinin S/N diyagramı ..... 117

Şekil 5.97. $FSW_{k2}09$ numunesinin S/N diyagramı ..... 117

Şekil 5.98. $FSW_{u1}09$ numunesinin S/N diyagramı ..... 118

Şekil 5.99. $FSW_{u1}18$ numunesinin S/N diyagramı ..... 119

Şekil 5.100. $FSW_{u2}18$ numunesinin S/N diyagramı ..... 119

Şekil 5.101. $FSW_{u2}13$ numunesinin S/N diyagramı ..... 119

## SİMGELER

| | |
|---|---|
| $\sigma_m$ | : Ortalama Gerilme (MPa) |
| $\sigma_{max}$ | : Maksimum Gerilme (MPa) |
| $\sigma_{min}$ | : Minimum Gerilme (MPa) |
| **R** | : Genlik Oranı |
| **f** | : Frekans (Hz) |
| $f_i$ | : Kaynak İlerleme Hızı (mm/dk) |
| **Nf** | : Çevrim Sayısı |
| **n** | : Dönme Devri (dev/dk) |

## KISALTMALAR

**ASTM** : American Society for Texting and Material

**DKB** : Dinamik Yeniden Kristalleşen Bölge

**EBSD** : Elektron Geri Saçılım Kırınımı

**EDS** : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dispersif Spektroskopisi)

**EIS** : Empedans Spektroskopisi

**EM** : Esas Malzeme

**FSW** : Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)

**HV** : Hardnes Vickers (Vickers Sertlik)

**IEB** : Isının Etkisindeki Bölge

**KM** : Kaynak Metali

**MIG** : Metal İnert Gaz

**SEM** : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)

**TEB** : Termo-mekaniksel Etkilenen Bölge

**TIG** : Tungsten İnert Gaz

**XRD** : X-Işını Difraksiyonu

# 1. GİRİŞ

Alüminyum tabiatta en çok bulunan ikinci element olup 19. yy.'ın sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında çelikten sonra en çok kullanılan malzeme olmuştur. Özellikle içerisine farklı elementler de eklenerek istenilen özellikleri iyileştirilen alüminyum alaşımları günümüzün vaz geçilmez malzemelerinden biri haline gelmiştir.

Alüminyum ve alaşımları; iyi ısıl ve elektrik iletkenlik, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon dayanımı özelliklerine ilaveten ekonomik olması ve kolay temin edilebilmesinden dolayı uzay, havacılık, otomotiv, elektronik, kimya, denizcilik, makine imalat, gıda ve inşaat gibi farklı endüstriyel sektörlerde yaygın kullanım alanına sahiptirler (Avner, 1974; Mathers, 2002). Bu kadar yaygın kullanım alanına sahip alüminyum ve alaşımlarında yapıştırma, lehim, perçin, cıvata ve kaynak gibi farklı birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Özelikle bağlantının önemli olduğu havacılık, uzay, otomotiv, inşaat ve deniz endüstrilerinde en çok tercih edilen malzemelerin başında gelen alüminyum ve alaşımlarının tamirinde farklı kaynak birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

Alüminyum ve alaşımlarının kaynak tekniği, endüstride yoğun bir kullanım alanı olan çeliğin kaynağına göre farklılık göstermektedir. Alüminyum kaynağı bir çelik kaynağına göre zor ve problemlidir. Bu nedenle, malzemenin fiziksel ve metalurjik özeliklerini çok iyi tanımak ve bu özeliklere göre önlemler almak gerekir. Alüminyum ve alaşımlarının özellikle savaş yıllarında uçaklarda kullanılan türlerinin kaynak edilebilmesi için öncelikle ergimeyen elektrod ile gerçekleştirilen TIG kaynak yöntemi geliştirilmiş ve bunu sırasıyla MIG ve plazma ark kaynağı (PAW) yöntemleri izlenmiştir.

TIG ve MIG kaynak yöntemleri, alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde en çok tercih edilen kaynak yöntemleridir. Ancak ergitme esasına dayalı olan bu kaynak yöntemleri ile alüminyum ve alaşımlarının kaynak birleştirilmesinde malzemenin içyapısına bağlı olarak kaynak metalinin iki yanında oluşan ısının etkisindeki bölgede (IEB) metalurjik dönüşümler, kaynaklı birleştirme bağlantılarının kullanımı sırasında bazı problemlerin ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir. Örneğin; gözeneklilik, oksit filmi, sıcak çatlama ve bağlantının hem kaynak metalinde hem de IEB'de mukavemet azalması gibi oluşumlar, alüminyum ve alaşımlarının kullanım özeliklerini büyük ölçüde düşürmektedir. Bu gibi olumsuzluklardan dolayı, ergitme esaslı birleştirme

yöntemleri dışında katı faz kaynak yöntemleri ile daha az problemler olacağını düşünülerek, araştırmacılar, teknik literatürde sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) olarak adlandırılan bir katı faz kaynak yöntemi geliştirmişler ve alüminyum alaşımı plakaların alın alına ve köşe birleştirmelerini özellikle yatay oluk pozisyonunda gerçekleştirmişlerdir (Thomas ve ark., 1999; Threadgill, 1997; Dawes ve Thomas 1995; Mathers, 2002; Kaluç ve Bozduman, 1997; Kaluç, 2004).

Alüminyum ve alaşımlarının farklı kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmesinde, kaynak yöntemlerinin bir biri üzerinde üstünlükleri bulunmaktadır. Bu üstünlükler kaynak yapılan ortam, malzemenin boyutu, geometrisi ve kimyasal yapısı gibi faktörlere bağlıdır. Uygun kullanım alanına bağlı olarak seçilen kaynak yönteminde önemli olan ise kaynak kalitesini arttırmaktır. Kaynak kalitesi uygulanan yönteme bağlı olarak değişiklik gösterse de temel olarak kaynak hızı, Amper, koruyucu gaz, kaynak malzemesi, kaynak yapılacak malzemenin cinsi, ortam ve kaynak yapacak kişiye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu doğrultuda kaynak kalitesini arttırmak için kaynak parametrelerine ve kaynak yöntemlerine bağlı olarak literatür çalışmaları yapılmaktadır.

### 1.1. Literatür Çalışmaları

Colligan ve ark. (2002), 25 mm kalınlığındaki AA5083-H131 plakaların FSW yöntemiyle birleştirilmesinde ilerleme hızının oluşan içyapı ve gerilme yığılması üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kaynak dikişinin başlangıç ve bitiş bölgesinde belirgin boşluk hatalarının oluştuğunu belirlenmişlerdir.

Çam (2002), Al alaşım levhalarının alın ve bindirme kaynağındaki etkilerini incelemişlerdir. Son yıllarda geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan FSW yönteminin ergitme kaynağı yöntemlerinden daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiş ve bu yöntemin diğer kaynak yöntemlerine olan üstünlüklerini ele almıştır.

Ericsson ve ark. (2003), FSW, TIG ve MIG kaynaklarını kullanarak birleştirdikleri AA6082 alüminyum alaşımlarının kaynak hızının yorulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sürtünme kaynağında düşük ve yüksek kaynak hızlarının mekanik ve yorulma mukavemetine önemli bir etkisi olmadığını, TIG ve MIG kaynağının FSW kaynağından daha düşük statik ve dinamik mukavemet gösterdiğini vurgulamışlardır.

Guerra ve ark. (2003), FSW işleminde, takım dönme devrinin kaynak esnasındaki malzeme taşınım ve akış mekanizmasına etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Kaynak esnasında malzemenin iki şekilde taşındığını belirtmişlerdir. Bunlardan birincisinin, dönen takımın kenarından ilerleme doğrultusunda oluştuğunu ve bu esnada helisel hareketlerin sonucu dönme yönüne doğru malzeme akışı sağlandığı vurgulamışlardır. İkincisinin ise kaynak esnasında dışarı doğru sarkan parçaların dönen takım ile birlikte kaynak ilerleme yönünde sürüklenmesi şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Lee ve ark. (2003), AA6005 yaşlanabilir alüminyum alaşımını FSW yöntemiyle birleştirerek, kaynak bağlantılarının mekanik ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır. FSW işlemiyle oluşan mikroyapıyı bölgelere ayırmışlardır. I. bölgeyi kaynak metali olarak adlandırarak buradaki sürtünme ısısı ve plastik akışın ince ve eş yönlenmiş tanelerin oluşumuna yol açtığını ileri sürmüşlerdir. II. bölgeyi yassılaşan ve uzayan tanelerden oluşan TEB, III. Bölgeyi de IEB olarak belirlemişlerdir. IEB'in ana metalden pek bir farkının olmadığını ve mikroyapısının ana metalinkinden ayırt edilmesinin çok zor olduğunu vurgulamışlardır. Ancak mikrosertlik analizleriyle bu bölgenin tespit edilebildiğini öne sürmüşlerdir. Kaynaklı bağlantıların gerilme testlerinde, takım dönme devrinin 1600 dev/dk ve ilerleme hızının 507 mm/dk olduğu kaynak parametrelerinde en iyi mukavemet değerini elde etmişlerdir.

Reynolds ve ark. (2003), sabit ilerleme hızı ve farklı iki dönme devri kullanarak 3,2 mm kalınlığındaki 304L paslanmaz çeliğini FSW yöntemi ile kaynak yapmışlardır. Kaynaklı bağlantıların yapısını, özelliklerini ve kalıntı gerilmelerini incelenmişlerdir. Kaynatılan malzemenin çekme gerilmesinin ana malzemeninkine yakın olduğu belirlenmiştir.

Shigematsu ve ark. (2003), AA5083 ve AA6061 alüminyum alaşım çiftlerini hem birbirleriyle hem de kendileriyle FSW yöntemiyle birleştirerek mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Çekme testi sonuçlarında benzer olan kaynakların, benzer olmayan çiftlerle birleştirilenlere göre daha yüksek gerilme değerlerine ulaştığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca mikrosertlik sonuçlarının malzemelerin ısıl işlem karakteristikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Kurt ve ark. (2004), FSW yönteminde kaynak hızının kaynak kalitesine etkisini incelemişlerdir. Bu doğrultuda helisel kanallara sahip tek tip karıştırıcı uç ile 800 dev/dk

sabit dönme devrinde, 4 farklı kaynak ilerleme hızlarında, alüminyum levhaları alın kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak ilerleme hızının artmasıyla, çekme dayanımı ve mikrosertlik değerlerinde artış meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, kaynak esnasında dikiş yüzeyinde oluşan ondülelerin kaynak ilerleme hızı ile doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamışlardır.

Lim ve ark. (2004), 4 mm kalınlığındaki AA 6013-T651 alüminyum alaşımının FSW yöntemiyle birleştirilmesinde, farklı kaynak parametrelerinin, elde edilen kaynağın çekme dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Kaynak parametreleri olarak 1000, 1400, 1600, 2000 ve 2500 dev/dk takım dönme devirlerini, 100, 200, 300 ve 400 mm/dk takım ilerleme hızlarını kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, çekme deneylerinden elde edilen kopma uzamasının kaynak hızı ile doğru, takım devir sayısı ile ters orantılı olarak değiştiğini, mukavemet değerlerinin ise kaynak parametrelerinden az etkilendiğini gözlemlemiş.

Sharma ve ark. (2004), FSW yöntemiyle birleştirdikleri dökme A356 alüminyum alaşımının yorulma davranışının incelemişlerdir. Çalışmaları sonucu mikroyapı homojenliğinin, taneli yapısının ve gözenekliliğin yorulma ömrü üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu görmüşlerdir.

Cavaliere ve ark. (2005a), AA7075 alüminyum alaşımının FSW yöntemiyle birleştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında; kaynaklı bağlantıların, kaynak doğrultusundaki ve kaynağa dik yöndeki çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Çekme testlerini farklı çekme hızları ve sıcaklıklarında gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çekme sonucu kırılan numuneleri SEM görüntülerini analiz etmişlerdir. Bu analiz sonuçlarında kırılma mekanizmalarının farklı tiplerde meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Jones ve ark. (2005), FSW yöntemiyle birleştirilen AA2024-T351 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemesinde kaynak bölgesinin 4 mikron boyutlarda dislokasyon mekanizması sergileyen ince tanelerden oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu ince taneler içindeki dislokasyon yoğunluğunun diğer bölgelere göre daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. IEB'de ise sertliğinin çökelme ve aşırı yaşlanma sonucu düştüğünü belirtmişlerdir.

Srinivasan ve ark. (2005), AA7075/AA6056 alüminyum alaşım çiftlerinin FSW yöntemi ile birleştirilmesindeki gerilmeli korozyon davranışlarını incelemişlerdir. 900 dev/dk ve 250 mm/dk kaynak parametreleri kullanarak birleştirdikleri bağlantıları, %3,5

NaCl çözeltisine maruz bırakarak mekanik ve mikroyapı karakteristiklerini normal koşullar altındaki değerlerle karşılaştırmışlardır. Korozyona tabi tutulmayan numunelerin düşük hızlardaki çekme testlerinde kırılmaların, daha düşük mekanik özelliklere sahip AA6061'in TEB (termo-mekanik etkilenen bölge) bölgesinde meydana geldiğini, korozyonlu numunelerde ise AA7075 tarafında oluştuğunu vurgulamışlardır.

Taban ve ark. (2005), En Aw-5083- H321 Alüminyum alaşımlarında MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özeliklere etkilerini araştırmışlar. Kaynaktan sonra tüm bağlantıları, görsel incelemeye tabi tutulmuşlar, bağlantıların mekanik özeliklerini saptamak amacıyla standartlara uygun olarak hazırlanan numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulamışlardır. Kaynaklı parçaların kırılma yüzeylerini optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanarak incelemişler. Ayrıca kaynak bölgesinden alınan metalografik numunelerin mikrosertlik deneylerini yapmışlardır. Kaynak bölgesinin mikroyapısal özeliklerini Clemex görüntü analiz sistemi ile detaylı biçimde inceleyerek FSW kaynaklı bağlantılarının daha iyi mekanik ve mikroyapısal özeliklere sahip olduklarını belirtmişlerdir.

Wadeson ve ark. (2005), FSW yöntemi ile kaynağı yapılmış AA7108-T79 alüminyum alaşımının korozyon dayanımı üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. TEB'in korozyondan en kolay etkilenen bölge olduğunu bildirmişlerdir.

Cavaliere (2006), yapmış olduğu deneysel çalışmada; FSW ile birleştirdiği zirkonyum ilaveli AA2014 alüminyum alaşımının, çekme dayanımı, yorulma dayanımını ve mikroyapı karakteristiklerini belirlemeye çalışmıştır. FSW işlemi nedeniyle oluşan yoğun ince taneli yeniden kristalleşme gösteren yapının oda sıcaklığındaki çekme ve yorulma deneyinde esas malzemeden daha yüksek mukavemet değerleri gösterdiğini tespit etmiştir. Mikroyapısal incelemelerde, $Al_3Zr$ partiküllerinin malzemeye homojen dağıldığını ve kırık yüzeylerde ise lokal sünek kırılma mekanizması sergilediğini görmüştür.

Cavaliere ve ark. (2006), AA2024/AA7075 alüminyum alaşım çiftini FSW yöntemiyle birleştirerek kaynak bağlantılarının mekanik (çekme ve yorulma dayanımı) ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Yorulma testlerini R=0,1 genlik oranında ve yaklaşık 75 Hz yük frekansı altında gerçekleştirerek S/N yorulma dayanım eğrilerini çıkartmışlardır. Yorulma testlerinin asıl malzemelerde yaklaşık $10^7$ çevrimden büyük

çıkması gerekirken farklı bu iki tip alasımın yorulma ömrünün yaklaşık $10^6$ çevrimde 44 MPa'lık bir gerilme ile sonuçlandığı tespit etmişlerdir.

Fujii ve ark. (2006), FSW ile birleştirilen alüminyum alaşımlarında karıştırıcı uç profillerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu doğrultuda geliştirdikleri üçgen, vida ve silindir şeklindeki üç farklı uç geometrisini, yine tespit ettikleri işlem parametrelerine göre üç farklı alüminyum alaşımına (AA1050-H24, AA5083-0, AA6061-T6) uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuca göre, düşük deformasyon direnci gösteren AA6061 alüminyum alaşımında uç profili önemli bir etki göstermezken, yüksek deformasyon dirençli AA5083 alaşımında karıştırıcı ucun yüksek dönme devirlerinde (1500 dev/dk ve üzeri) üçgen, orta dönme devirlerinde (800-1200 dev/dk) vida ve düşük dönme devirlerinde (600 dev/dk ve altı) silindir profilli uçların etkili olduğunu belirlemişlerdir.

Zeng ve ark. (2006), FSW yöntemiyle birleştirdikleri AA6061 alaşımında, karıştırıcı uçların aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Karıştırıcı uç pimlerinin aşınma sonucu çaplarındaki düşüşleri mikroyapı daralmalarıyla tespit ederek bunların mekanik özelliklerde mukavemet düşüşlerine ve kaynak metalinde gözenek oluşumuna yol açtığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca aşınma sonucunda kaynaklı bağlantılarda da sertlik düşüşleri gözlemlemişlerdir.

Zhou ve ark. (2006), FSW ve MIG yöntemiyle birleştirdikleri Al-Mg alaşımlarının yorulma davranışlarını incelemişlerdir. FSW yöntemiyle birleştirilen numunelerin hesaplanan R=0,1 genlik oranı altındaki yorulma ömrünün MIG ile birleştirilen numunelere kıyasla 6 ile 14 kat daha uzun olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca FSW ile birleştirilen numunelerdeki yorulma karakteristiklerin esas malzemenin değerine daha yakın olduğu belirtilmiştir.

Cavaliere ve ark. (2008), AA2024/AA7075 alüminyum alaşım çiftini FSW yöntemiyle birleştirerek kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini ve mikroyapı karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Karıştırıcı takımın konumunu kaynak bölgesinden 0,5; 1 ve 1,5 mm uzağa paralel olacak şekilde yönlendirerek bu alaşım çiftlerini sabit devir ve ilerleme hızı altında birleştirmişlerdir. Farklı takım uzaklıklarının çekme ve yorulma karakteristiklerinde kademeli oranda düşüşe yol açtığını ve bağlantılarda yorulma kırığı gelişiminin artırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yapılan kaynakların kaynak merkezinden uzaklaşmasıyla mikrosertlik değerlerinin

düştüğünü görmüşlerdir.

Moreira ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada farklı iki alüminyum alaşımının (Al6082-T6 ve Al6061-T6) FSW ve MIG yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak bağlantılarının mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. FSW ve MIG yöntemi ile birleştirilen alaşımlara ait çekme dayanımlarının ana malzemelerin çekme dayanımından daha düşük olduğunu ve FSW yöntemi ile elde edilen sonuçların MIG kaynağından daha iyi değerler verdiğini görmüşlerdir.

Scialpi ve ark. (2007), FSW yöntemiyle birleştirilen 1,5 mm kalınlığındaki AA6082 alaşımının karıştırıcı uç omuz geometrilerinin, kaynak dikiş morfolojisi üzerine etkisini araştırmışlardır. Üç farklı karıştırıcı omuzuz kullanıldığı deneylerde, omuz geometrilerinin kaynağın yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde önemli rol oynadıklarını vurgulamışlardır.

Uzun (2007), yapmış olduğu çalışmada SiC takviyeli AA2124 alüminyum alaşım kompozitinin, FSW yöntemiyle birleştirilmesinde oluşan mikroyapı karakteristiklerini belirlemeye çalışmıştır. Çalışmasında kaynak alanını dört farklı bölgede ele alarak, bu bölgelerin mikroyapı üzerindeki etkilerini belirlemiştir. EDS analizlerinden ince taneli SiC parçacıklarının esas malzemede ve kaynak metalinde homojen dağılım gösterdiğini ve FSW yönteminin kaynak metalinde aşırı ince taneli bir yapı oluşturduğunu belirlemiştir. Kompozit ana malzemesinde ortalama sertlik değerinin 250 HV olduğunu, kaynak metalinde bu değerin 240 HV'ye ve termo-mekanik olarak etkilenen bölgede ise 225 HV'ye düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca kaynak metalindeki elektrik iletkenlik değerinin esas malzemeye göre oldukça yüksek olduğunu belirlemiştir.

Chen ve ark. (2008), farklı özelliklerdeki 3 mm'lik şerit döküm Al-Si ($AC_4C$) ve Mg-Al-Zn (AZ31) alüminyum alaşımlarını FSW yöntemleriyle birleştirmişlerdir. Kaynak sonunda numunelerin SEM ve EDS analizleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda, yüksek ısı girdisi sağlayan düşük kaynak hızı şartlarında mikroyapının daha düzenli bölgelerden oluştuğunu görmüşlerdir. Yüksek kaynak hızlarında ise birleşme bölgesinde çatlak ve gözeneklerin oluştuğunu ve dolayısıyla kararsız mikroyapıların gerilme testleri üzerinde olumsuz etki gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Kalfalı (2009), AA2024 FSW yöntemiyle birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin birleşmeye etkilerini incelemişlerdir. Kaynak işlemi sırasında

karıştırıcı ucun dönme devri ve omuz genişliği ile kaynağın ilerleme hızını değişken parametreler olarak seçmiştir. En iyi akma ve çekme dayanım değerleri ile uzama değerini 2280 dev/dk dönme devri, 180 mm/dk kaynak ilerleme hızı ve 20 mm karıştırıcı ucun omuz genişliği değerlerinden elde edilmiştir. Kaynak numunelerine uygulanan eğme yorulma deneylerinde ise numunelerin kırılma yerlerinin IEB'den başlayarak ilerlediğini ve kaynak dikişinin hemen yanında kopmanın gerçekleştiğini görmüştür.

Barlas ve ark. (2010), Al1050/Cu malzemelerinin FSW yöntemi ile alın alına birleştirmesinde mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Al1050/Cu malzemelerinin kaynaklı birleştirmelerinde çekme mukavemetinin Cu ana metalinkinden %50, Al1050 ana alaşımınkinden ise %24 düşük olduğunu görmüşlerdir. Mikrosertlik ölçümlerinde ise kaynağın sertliğinin ana metallere doğru arttığı ve 74–280 HV arasında değiştiği tespit etmişlerdir.

Şık ve ark. (2010), 4 mm kalınlığa sahip AA2024 alüminyum alaşımlarının FSW yöntemi ile birleştirilmelerinde, farklı kaynak parametrelerinin (kaynak ilerleme hızı ve karıştırıcı ucun dönme devri) birleştirilen alaşımların mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırılmışlardır. Deneylerinde 20 mm omuz genişliğine sahip karıştırıcı uç kullanmışlardır. Kaynak ilerleme hızını 120 ve 200 mm/dk, karıştırıcı ucun dönme devrini 1000, 1500 ve 2500 dev/dk olacak şekilde seçmişlerdir. Yaptıkları mekanik deneylerde en iyi sonucu karıştırıcı ucun 1500 dev/dk ve kaynak ilerleme hızının 200 mm/dk olduğu durumda, en düşük sonucu ise karıştırıcı ucun 1500 dev/dk ve kaynak ilerleme hızının 120 mm/dk olduğu durumda elde etmişlerdir.

Yalçın (2010), yaptığı çalışmada, AA5754-H22 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımlarını FSW yöntemini kullanarak alın alına birleştirmiştir. Birleştirme işleminde, karıştırıcı ucu, takım dönme hızını ve takım açısını sabit tutularak kaynak ilerleme hızlarını ve takım baskı kuvvetlerini değiştirmiştir. Birleştirilen numunelerin mikrosertlik değerlerini, metalografik yapısını, çekme ve eğme dayanımlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda, AA5754-H22 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımlarının başarılı bir şekilde FSW yöntemiyle birleştirildiğini görmüştür. Artan baskı kuvvetinin birleştirilen malzemelerin sertlik ve mukavemetlerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını ancak kırılma mekanizmalarının değişmesine neden olduğunu belirlemiştir.

Sarsılmaz ve ark. (2012), AA7075/AA6061 alüminyum alaşımlarını FSW yöntemi ile birleştirmişler. Kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine ve mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Kaynak hızı ve takım uç profilinin kaynak kalitesi ve mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir.

Aval ve ark. (2013), AA5086 alüminyum plakalarını kullanılarak yaptıkları FSW birleştirmelerinde kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özeliklere etkisini araştırmışlardır. Kaynak bölgesindeki tane boyutunun kaynak ilerleme hızına ve dönme devrine bağlı olarak artığını, karıştırma bölgesindeki sertliğinin azaldığını ve IEB'in daha fazla gerilmeye maruz kaldığını tespit etmişlerdir.

Zhang ve ark. (2013), 2524-T3 alüminyum alaşımını FSW yöntemini kullanarak alın birleştirme ve bindirme kaynağı ile birleştirerek kaynak bağlantılarının yorulma özeliklerini deneysel ve sayısal (ANSYS) olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada yorulma parametreleri için, genlik oranını R=0,06 ve yükleme frekansını ise 10 Hz alınmışlardır. Numunelerin deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen veriler ile çizilen S-N yoruma grafiklerinde alın birleştirme kaynağının mukavemetinin daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

Borrego ve ark. (2014), MIG kaynağı yapılmış AA5083 alüminyum alaşımının FSW yöntemi ile yorulma ömrünün iyileştirilmesini araştırmışlardır. R=0 genlik oranında yaptıkları çalışmada yorulma özeliklerinde önemli bir iyileştirmenin olduğu fakat kaynağın sertliğinde ve mekaniğinde önemli bir değişimin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Güngör ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada 5083-H111 ve 6082-T651 alüminyum alaşımlarının FSW yöntemi ile birleştirilmesinde bağlantı elemanlarının mekanik ve mikroyapısal özelliklere etkilerini belirlemeye çalışmışlardır.

Uzun (2014), kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış AA5000 serisi alaşımların MIG kaynağı ile birleştirilmesinde, kriyojenik işlemin bağlantı elemanlarının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini incelemiştir. Yaptığı deneysel çalışmalar doğrultusunda kriyojenik işlemin mekanik özellikleri arttırıcı etkisi olduğunu görmüştür.

Carlone ve Palazzo (2015), dökme ZE41A magnezyum alaşımının TIG ve FSW yöntemiyle birleştirilmesinde kaynak bölgelerinin karakterizasyonu incelemişlerdir. Kaynak bölgesindeki kimyasal bileşimi spektrometrik analizle tahmin ederlerken

mikroyapıyı geleneksel metalografik tekniklerle incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre FSW yönteminin uygulanabilir olduğunu ve TIG kaynağına göre bazı avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir.

Fadaeifardi ve ark. (2016), TIG kaynağı ile birleştirilmiş AA6061-T6 alüminyum alaşımının kaynak sonraki ısıl işleminin mikroyapı ve mekanik özelikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Isıl işlem ile kaynak bölgesinde iyileşmenin olduğunu, IEB'de tane sınırların belirgin hale geldiğini ve elastik modül'ün kaynak bölgesinde artığını görmüşlerdir. Ayrıca ısıl işlem sonrası kaynağın mekanik özeliklerinin esas malzemeninkinden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Ghogheri ve ark. (2016), ticari saf titanyum ve alüminyum 5083 alaşım bağlantılarını FSW yöntemiyle birleştirmişlerdir. En yüksek sertlik değerinin bağlantının karıştırma bölgesinde olduğunu ve karıştırma bölgesi dışındaki alanların da kaynaktan etkilendiğini belirlemişlerdir.

Infante ve ark. (2016), FSW yöntemi ile birleştirilen AA5754 ve AA6082 alüminyum alaşım çiftlerinin yorulma özeliklerini belirlemişlerdir. Genlik oranını R=0,1 alarak yaptıkları yorulma deneylerinde düşük gerilme aralığında farklı alüminyum alaşımlarının kaynak bağlantılarının benzer alüminyum alaşımlarının kaynaklarından daha iyi yorulma performansı gösterdiğini belirlemişlerdir.

Xu ve ark. (2016), içerisinde ağırlıkça %5,8 Mg; %0,4 Mn; %0,25 Sc ve %0,10 Zr içeren Al alaşımını TIG ve FSW yöntemlerini kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını mikrosertlik ölçümleri, çekme testleri ve mikroskopi yöntemler ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda, nihai gerilme mukavemeti, akma mukavemeti ve kopma uzamasının, TIG bağlantılarında sırasıyla 358, 234 MPa ve %27,6 olduğunu FSW bağlantılarında ise 376, 245 MPa ve %31,9 olduğunu belirtmişlerdir.

Imam Fauzi ve ark. (2017), TIG ve MIG ile borusu bağlantı şeklinde kaynak edilmiş AA6082-T6 alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özeliklerini inceleyerek kaynak yöntemlerini bir biri ile kıyaslamışlardır. Kıyaslamalar neticesinde TIG kaynağının MIG kaynağına göre dar alanda daha iyi birleşme sağladığını, TIG kaynağının MIG kaynağından daha iyi mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sharma ve ark. (2017), FSW yöntemi ile farklı ilerleme hızları ve takım dönme devirlerinde kaynak edilmiş zırh metal sınıfına ait Al-Zn-Mg alaşımında, kaynak parametrelerinin kaynak edilmiş alaşımın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Takım dönme devrinin artması ve kaynak ilerleme hızının azalması ile kaynak edilmiş malzemenin mekanik özelliklerinin (mikrosertlik, nihayi kopma mukavemeti ve kopma uzaması) artığını tespit etmişlerdir. IEB'de, mikrosertlik üzerine kaynak hızının takım dönme devrinden daha etkili olduğunu görmüşlerdir.

Hynes ve Velu (2018), Ti-6Al-4V/AA6061 alaşımlarının FSW yöntemi ile birleştirilmesinde farklı dönme devirlerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini mikroyapıdaki değişimlere bağlı olarak araştırmışlardır. Dönme devrindeki artışın ara yüzeyde sürtünmeli ısınmayı arttırdığını ve bu durumun dinamik yeniden kristalleşmeye yol açtığını belirtmişlerdir. Ayrıca dönme devrinin ortak ara yüzde Ti3Al ve TiAl oluşma eğilimi gösterdiğini vurgulamışlardır. Çekme ve darbe mukavemeti gibi mekanik testlerin dönme devrinin 1000 rpm ile en iyi elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Jafarlou ve ark. (2018), Al5086 alaşımının FSW yöntemi ile birleştirilmesinde korozyon davranışı üzerine karıştırıcı uç geometrilerinin (düz silindirik, konik silindirik, dişli silindirik, üçgen ve kare) etkilerini incelemişlerdir. Bağlantıları, $Al_2O_3$ nano tozları ve çoklu geçiş tekniği kullanılarak üretmişlerdir. Korozyon özelliklerini, Tafel polarizasyonu ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testlerini kullanılarak araştırmışlardır. Kare uç profilli takım kullanılarak birleştirilen bağlantılarda en yüksek korozyon direncinin elde edildiğini ve bu durumun dinamik-statik oranın daha yüksek olması ve uç geometrisinin titreşimli karıştırma yapmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Mishra ve Nidigonda (2018), 4mm kalınlıktaki AA6061-T6 alüminyum alaşımlı levhaları TIG ve FSW yöntemlerini kullanılarak farklı kaynak parametrelerinde birleştirmişlerdir. FSW yönteminin TIG kaynağından daha iyi mekanik özellikler sergilediğini tespit etmişlerdir.

Moradi ve ark. (2018), farklı iki alüminyum alaşımının (AA2024 ve AA6061) FSW yöntemi ile birleştirilmesinde kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve kristalografik dokusunun gelişimini araştırılmışlardır. Dokuları karakterize etmek ve FSW esnasında mikroyapıların evrimini açığa çıkarmak için elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) tekniğini kullanmışlardır. İlerleme yönündeki TEB'inde sürekli dinamik yeniden

kristalleşmenin geri çekilme tarafınınkinden daha düşük olduğunu ve yeniden kristalleşen tanelerin ilerleme doğrultusunda nadiren oluştuğunu gözlemlemişlerdir. İlerleme yönündeki mikrosertlik profilinin hemen hemen aynı, ancak geri çekilme tarafında üç farklı ayırt edilebilir mikrosertlik profilinin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sinhmar ve Dwivedi (2018), AA2014'ün FSW ve TIG yöntemi ile birleştirilmesinde, daldırma testini, potansiyodinamik polarizasyon testini ve elektrokimyasal empedans spektroskopisini (EIS) kullanarak kaynaklı bağlantıların elektrokimyasal davranışını incelemişlerdir. Kaynak termal döngülerinin ve mikrosertliğin kaynak bağlantılarının korozyon davranışı ile ilişkili olduğunu, TIG kaynağının FSW yönteminden daha düşük korozyon direncini gösterdiğini, IEB'in her iki kaynak yönteminde en duyarlı korozyon bölgesi olduğunu belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde günümüzde yaygın kullanım alanına sahip TIG, MIG ve FSW yöntemleri birlikte kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarının analizi ile ilgili çalışmaların az olduğu ve bu konu üzerinde özellikle ayrıntılı çalışmaların yapılması gerektiği görülmüştür. Bu doğrultuda yapılan bu çalışmada, havacılık, uzay ve savunma sanayisi gibi yaygın alanlarda kullanılan farklı özelliklere sahip AA7075 ile deniz suyu korozyon dayanımı çok iyi, yorulma dayanımı yüksek ve deniz araçların yapımında çokça kullanılan AA5182 alaşımları, TIG, MIG ve FSW kaynak yöntemlerini kullanılarak birleştirilmiştir. FSW birleştirmelerde; karıştırıcı ucun dönme hızı (devir sayısı), karıştırıcı ucun geometrisi ve kaynak ilerleme hızı, TIG ve MIG kaynak yöntemlerinde ise tel ilerleme hızı, gaz debisi, kaynak akımı ve kaynak ağız şekilleri gibi değişken parametreler, literatür ışığında belirli aralıklarda değiştirilerek, farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip birleştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların ara kesitinden alınan mikroyapılar, optik mikroskobu ile incelenmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla kaynaklı numunelere; mikrosertlik, çekme ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen kırık yüzeyler, SEM ile incelenerek, kırılma tipi ve kırık yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veri ve bulgular, ilgili literatür ışığında değerlendirilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

## 2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Tabiatta en çok bulunan ve çelikten sonra en çok kullanım alanı bulan element alüminyumdur. Alüminyumla ile ilgili çalışmalar, 18 ve 19. yüzyıllarda yapılmaya başlanılmıştır (ASM Handbook, 1979). 1807'de Sir Humprey Davy, alüminyum bileşiklerin içerisinde bir metal bağlı olduğunu ileri sürmüş ve buna alüminyum adını vermiştir. 1821'de Fransa, Les Bauz'ta alüminyum üretiminin temel hammaddesi olan cevheri bulmuş ve buna boksit adını vermiştir. Daha sonra 1825'te Hans Cristian Oersted, metal alüminyum üretimi için önemli bir bileşik olan alüminyum klorür bileşiğini hazırlamayı başarmıştır. Bundan iki yıl sonra 1827'de Friedrich Wöhler, bu bileşiğin potasyum ile reaksiyonu sonucu ilk metal alüminyumu kimyasal yollarla elde etmeyi başarmıştır. 18. yüzyılın ikinci yarısına doğru alüminyum üretimi için değişik kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Aynı yüzyılın sonlarına doğru alüminyumu sulu çözeltilerinden elektroliz ile elde etmek için yapılan çalışmalar başarısızlıkla sonuçlanmıştır (Anık, 1960). 1900'lü yılların başlarında ise endüstri alanındaki hızlı gelişme, alüminyum metalini ve alaşımlarını üstün mekanik özelliklerinden dolayı demir-çelik alaşımlarından sonra, ikinci sıraya çıkarmıştır. Bu yılların başlarında doğal filizlerden elde edilen alüminyum üretimi yılda 172.000 ton iken, 1977'de 14 milyon tona, 1980'lerde 17,5 milyon tona ve 2006 yılında 22 milyon tona ulaşmıştır. Alüminyum endüstrisindeki bu hızlı sıçrama, alüminyum metalin mükemmel karakteristiklerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyumun bu çok yönlü özelikleri ihtiva etmesi, yapı ve mühendislik malzemelerinin en çok aranan malzemesi haline getirmektedir. Alüminyum ağırlıkça çeliğe göre daha hafiftir. Alüminyumun yoğunluğu, 2,7 g/cm$^3$ olup, çelik 7,83g/cm$^3$ ve bakır 8,93 g/cm$^3$ metalleri yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Mukavemetinin çelikten düşük olmasını, kesit alanını artırılarak çeliğe eşdeğer mukavemet haline getirmeyi sağlanabilmektedir. Birçok yapıda alüminyum alaşımlarının kullanılması ağırlıkta azalma meydana getirdiği için avantaj sağlamaktadır. Doğru yapılan bir yapı tasarımında alaşımsız çelik yerine alüminyum kullanmak konstrüksiyon üzerine %50'den fazla hafiflik sağlamaktadır (ASM Handbook, 1979; Anık, 1960; Tülbentçi, 1990).

Alüminyumu, malzeme alanında önemli bir konuma getirilen özelikler; iyi elektriksel ve ısıl iletkenliği, yüksek ısı ve ışık yansıması, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kolaylığı, sünek ve yumuşak olması ve bazı alaşımlarının çökelme yoluyla sertleştirilebilmesi sayılabilir. Alüminyum ve alaşımlarının bu üstün özeliklere

sahip olması, dünya da büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzeme grubu haline getirmiştir (Oğuz, 1990; Anık, 1960; Tülbentçi, 1990).

Alüminyum ve alaşımları tüm imalat sanayisinin hemen her kademesinde; tarım, inşaat, kimya, gıda, otomotiv, ulaştırma, uzay ve havacılık, elektrik ve elektronik sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ülkemizde alüminyum sanayisi gelişiminin henüz başında olmasına rağmen, alüminyum ve alaşımlarına olan talep ve buna paralel olarak yurt içinde üretilen ve işlenen alüminyum ürünlerinin miktarı giderek artmaktadır (Oğuz, 1990). Özellikle otomobiller, havacılık ve gemicilik sektörü alüminyum alaşımlarının kullanım alanları için oldukça önemli olmaktadır. Ayrıca bu kullanım alanlarını; montaj ve taşımacılık sektörleri takip etmektedir. Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları, dövme ve döküm alüminyum alaşımları şeklinde üretilip sınıflandırılmaktadır. Üretilen bu alaşımlar soğuk ve sıcak olmak üzere plastik şekil değiştirme yöntemlerinden geçirilerek alaşımlara istenilen mekanik özellikler kazandırılmakta ve farklı uygulamalar için kullanılmaktadırlar. Alüminyum alaşımlarında olan 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serileri farklı uygulama alanları için en çok tercih edilen alaşımlardır (http://www.aluminium.org/).

## 2.1. Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik özellikleri

Yüksek kimyasal etkileşime sahip alüminyumun oksijene karşı ilgisi oldukça fazladır. Hava ile temas etmesi sonucu, oksijen ile birleşerek alüminyum oksidi ($Al_2O_3$) oluşturur ve alüminyum metalinin yüzeyi alüminyum oksit tabakası ile kaplanır. Elektron mikroskobu ile yapılan incelemelerde bu örtü tabakasının sık ve gözeneksiz olduğu görülmüştür. Ancak bu örtü tabakası, metaldeki oksitlenmenin devam etmesini engeller. Alüminyumun bu özeliği korozyona karşı direnci artırır. Fakat bazı asitler ve tuzlar bu oksit tabakasını çözebilmektedir. Alüminyum bu maddelere karşı dayanıklı değildir (Kurtuluş, 2001).

Yüksek saflıktaki alüminyum, teknik saflıktaki alüminyuma göre daha yumuşak olup, mukavemeti de daha düşüktür. %99,25 alüminyum bileşimine sahip bir metalin elastiklik modülü 71000 N/mm$^2$ iken, en saf alüminyumun elastiklik modülü ise ancak 67000 N/mm$^2$'dir. Alüminyum metalinin sertliği, saflık oranına göre değişmektedir. Alüminyum oranı %99,2 olan metalin sertliği 24-54 HB iken %99,8 alüminyum oranına sahip olan metalin sertliği 19-41 HB arasında değişmektedir. Ayraca yapılan statik

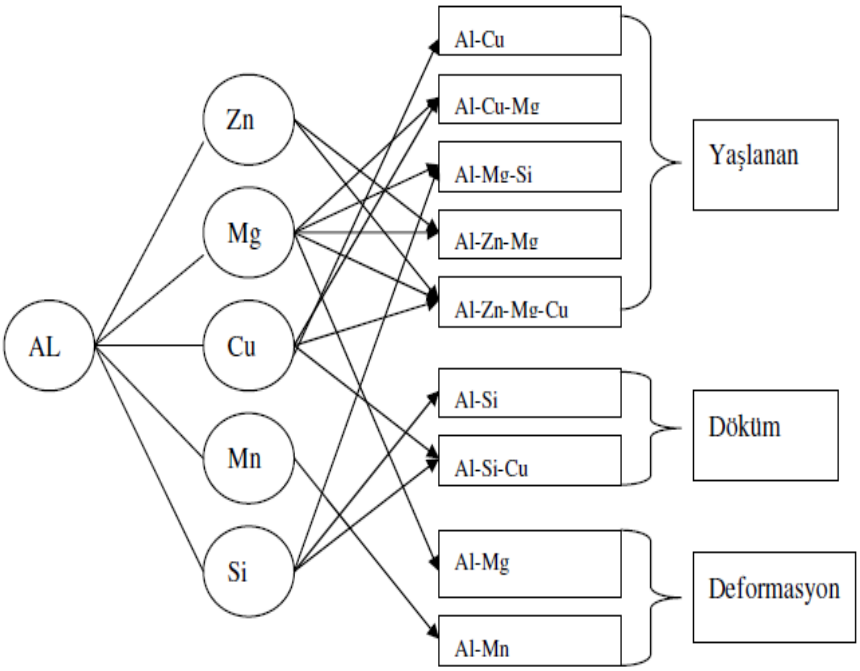
çekme deneylerinde de, alüminyumun çekme mukavemetinin saflık derecesine bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Kopma anında boyun vererek kesit yüzeyinin küçülmesi ise yüksek saflıktaki alüminyumda (>%99,9) en fazladır (Tablo 2.1). Yani alüminyumun saflık oranı arttıkça, alüminyum metali daha sünek hale gelmektedir. Soğuk haddeleme ile elde edilmişse çok saf alüminyumun çekme dayanımı 110-130 $N/mm^2$ iken tavlama işlemi görmüş bu metalin çekme dayanımı 35-60 $N/mm^2$ aralığındadır. Uzama miktarı da %5,5'den %40-50 seviyelerine kadar değişmektedir (Öksüz, 1996; Yıldırım, 1983).

**Tablo 2.1**. % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri (Öksüz, 1996)

| | |
|---|---|
| Sembol | Al |
| Atom Numarası | 13 |
| Atom Ağırlığı | 26,97 g/mol |
| Kristal Yapısı | YMK |
| Erime Noktası | 660 °C |
| Yoğunluğu(oda sıcaklığında) | 2,7 $g/cm^3$ |
| Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı | 150-320 °C |
| Buharlaşma Noktası | 2540 °C |
| Isıl Genleşme Katsayısı | 23,5 |
| Özgül Isısı | 0,224 cal/g (100 °C'de) |
| Gizli Ergime Isısı | 94 cal/g |
| Çekme Mukavemeti | 40-100 $N/mm^2$ |
| Akma Mukavemeti | 10-30 $N/mm^2$ |
| Elastiste Modülü | $72*10^3$ $N/cm^2$ |
| Kayma Modülü | $27*10^5$ $N/cm^2$ |
| % Uzama | 45 |
| % Kopma Uzaması | 30-40 |
| Sertlik | 20 (HV) |
| Çentik Darbe Tokluğu | 100 $J/cm^2$ |
| Elektrik İletkenliği | %59,5 IACS |
| Elektrik Direnci | $2,65*10^{-8}$ |
| Katılaşma esnasında Kendini Çekme | %6,7 |
| Yansıtıcılık | Tungsten flamadan gelen beyaz ışık için %90 |

## 2.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları üretim metotlarına göre, dövme ve döküm (dökme) alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarında, temel üretim yöntemiyle dökülen alaşım, plastik şekil verme yöntemleriyle ürün haline getirilir. Döküm alaşımlarında ise sıvı halde her türlü ayarlaması yapılmış olan alaşımın, direkt ürün kalıbına dökümü yapılır. Dövme ve döküm alaşımları, element bileşimlerine göre Şekil 2.1'deki gibi altsınıflara ayrılmaktadır (Öksüz, 1996; Yılmaz, 2002).




**Şekil 2.1.** Alüminyum alaşım elementlerinin temel bileşimleri (Şaldır, 2003)

### 2.2.1. Dövme alüminyum alaşımları

Genellikle dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması alaşım elementlerinin katkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıl işlem uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır. Daha çok sürekli döküm yöntemi ile blok halinde elde edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanıp, haddeleme veya ekstrüzyon ile son şekle getirilir. Dört rakamlı sayısal sembol ile gösterilir. Tablo 2.2'de çeşitli alüminyum serileri, ısıl işlem durumları ve oluşturdukları alaşım grupları verilmiştir.

**Tablo 2.2.** Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması (Öksüz, 1996)

| | | |
|---|---|---|
| Alaşımsız alüminyum | 1XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum bakır alasımı | 2XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum mangan alasımı | 3XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum silisyum alasımı | 4XXX | Yaşlandırılamaz |
| Alüminyum magnezyum alasımı | 5XXX | Yaşlandırılamaz |
| Alüminyum-silisyum-magnezyum alasımı | 6XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum çinko alasımı | 7XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum ve diğer elementler ( lityum vs.) | 8XXX | Yaşlandırılabilir |
| Boş | 9XXX | Yaşlandırılabilir |

Alüminyum alaşımlarının ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içerdiğini gösterir. Örneğin, 1xxx dizisi saf alüminyumu (%99) gösterir. Son iki rakam %99 değerinden sonraki rakamlarını belirtir. Soldan ikinci rakam ise 1'den 9'a kadar değişebilen özel olarak denetlenen katkı elementlerin sayısını belirtir.

#### 2.2.1.1. 1xxx serisi alaşımlar

Bu alaşım serisi en yüksek 70-190 N/mm$^2$'lik çekme mukavemetine sahip olup, ısıl işleme tabi tutulmayan alüminyum alaşım seridir. Bu alaşım grubu genelde saf alüminyum serisi olarak bilinir, zira bu seriden en az %99 alüminyum içeriğine sahip olması istenir. Bu alaşım grubu kaynağa uygundur, fakat dar ergime bölgesine sahip olması sebebiyle uygun kaynak işlemlerinin uygulanmasına dikkat edilmelidir.

#### 2.2.1.2. 2xxx serisi alaşımlar

2xxx serisi Al-Cu alaşımların temel alaşım elementi bakırdır. 2024 alaşımı bu gruba ait alaşımlar arasında mekanik mukavemeti en yüksek olanıdır. Bileşiminde %4,5 Cu ve %1,5 Mg vardır. Bu alaşımın kullanım bulduğu en önemli alan uçak ve uzay endüstrisidir. Başlıca otomotiv, vagon, uçak, mühimmat sanayisinde, dişli ve bağlantı elemanlarında, voltaj yükselticilerinde, süspansiyon parçalarında, perçinlerde, vida mekanizmalarında yüksek dayanım ve hafifliğin gerekli olduğu yerlerde de kullanılmaktadır.

#### 2.2.1.3. 3xxx serisi alaşımlar

Bu grubun ana alaşım elementi mangandır. Mangan çözünürlüğü 658 $^{\circ}$C'de maksimum %1,82 kadardır. Sıcaklık düştükçe mangan çözünürlüğü azalır. Azalan çözünürlük ile alaşımların çeşitlendirilmesi de azalmış olur. Mukavemetleri 1xxx serisi alaşımlarından %20 daha fazladır. En çok kullanılan 3003 alaşımıdır. Boru, yağ tankı, gıda kutusu gibi amaçlar için tercih edilir (Saldır, 2003).

Manganın ilavesiyle alüminyumun çekme mukavemetinde iyileştirme sağlanmaktadır. Bu alaşım grubundaki malzemelerde yüksek süneklik ve çok iyi korozyon özelliklerine sahiptirler.

### 2.2.1.4. 4xxx serisi alaşımlar

4xxx serisi Al alaşımlarında ana alaşım elemanı silisyumdur. Si, alüminyuma yeterli miktarlarda (%12'ye kadar) ilave edilerek alaşımı gevrekleştirmeden ergime derecesinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, alüminyum-silisyum alaşımları alüminyum birleştirmede esas metalin ergime sıcaklığından daha düşük ergime aralıklarında sert lehim alaşımı olarak ve kaynak telinde kullanılırlar. Bu gruptaki alaşımların çoğuna ısıl işlem uygulanamaz. Fark edilir miktarlarda Si içeren alaşımlar anodik oksitlemeden sonra koyu gri renge dönüşür. Yüksek silisyumlu alaşımlı malzemeler, düşük termal genleşme katsayısına, yüksek korozyon direncine ve yüksek aşınma direnci sahiptirler. Bu özeliğinden dolayı dövme motor pistonları 4032 alaşımlarından yapılır (Saldır, 2002). Diğer taraftan bu alaşımlar ısıl işlem ile sertleştirmeye elverişsizdirler (Öksüz, 1996). Önemli miktarlarda silisyum içeren alaşımlara anodik oksidasyon uygulandığında koyu gri renk alırlar, bu yüzden mimari uygulamalarda dekoratif amaçlı olarak kullanılırlar (Yılmaz, 2002).

### 2.2.1.5. 5xxx serisi alaşımlar

5xxx grubunda ana alaşım elementi, alüminyumda çok etkili ve geniş oranda kullanılan magnezyumdur. Magnezyum ana alaşım elemanı olarak veya mangan ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkan alaşım orta ve/veya yüksek dayanımlı ısıl işlem uygulanamayan alaşımdır. Magnezyum mangandan daha etkili bir sertleştiricidir. %0,8 civarında magnezyum ilavesi ile elde edilen sertlik değeri yaklaşık %1,25 mangan ilavesi ile sağlanabilir. Bu gruptaki Al alaşımları iyi kaynak özelliklerinin yanında deniz ortamında iyi bir korozyon direncine sahiptirler. Bununla birlikte, gerilmeli korozyon çatlamasını engellemek için yüksek magnezyumlu alaşımlarda müsaade edilen güvenli işlem sıcaklıklarında (yaklaşık %3,5 üzerinde magnezyum içeren alaşımlarda 65 °C'nin üzerindeki işlem sıcaklıklarında) ve soğuk deformasyon miktarında belirli kısıtlamalar yapılmalıdır. Mukavemetin artırılmasında en önemli element olan Mg, %0,8-4,5 arasında değişen miktarlarda kullanılmaktadır (Tablo 2.3).

**Tablo 2.3.** Bazı 5xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri (Öksüz, 1996)

| Alaşım | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti+Zr | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AA5049 | 0,40 | 0,50 | 0,10 | 0,5-1,1 | 1,6-2,5 | 0,30 | - | 0,20 | 0.10 | Kalan |
| AA5052 | 0,25 | 0,40 | 0,10 | 0,10 | 2,2-2,8 | 0,15-0,35 | - | 0,10 | - | Kalan |
| AA5154 | 0,50 | 0,50 | 0,10 | 0,1-0.3 | 3,1-3,9 | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,20 | Kalan |
| AA5083 | 0,30 | 0,40 | 0,10 | 0,4-10 | 4,0-4,9 | 0,05 | - | 0,25 | 0,15 | Kalan |

Çok iyi bir sünekliğe sahip olmak ile birlikte bu alaşımlar ayrıca, deniz koşullarında iyi korozyon dirençlerinde dolayı, özellikle gemi ve bot yapı malzemeleri üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Oğuz, 1990).

#### 2.2.1.6. 6xxx serisi alaşımlar

Bu alaşım grubuna silisyum ve magnezyumun birlikte ilave edilmektedir. 6xxx serisi alaşımları, içyapılarında magnezyum silikat ($Mg_2Si$) oluşturacak oranlarda Mg ve Si içeren ısıl işlem uygulanabilen alaşımlardır. 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar kadar dayanıklı olmasalar da, 6xxx serisi alaşımlar şekillendirilebilen, kaynaklanabilir, işlenebilir ve korozyon dirençli orta dayanımlı alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilen bu gruptaki alaşımlara çözeltiye alma işleminden sonra yapay yaşlandırma işlemi (T6 işlemi) uygulandığında alaşımların dayanımları önemli ölçüde arttırılabilir. Mimari uygulamalar, ulaşım endüstrisi, köprüler ve kaynaklı yapılar bu alaşımların uygulama alanlarıdır (ASM Handbook, 1979).

6xxx serisi Al alaşımları genellikle ekstrüzyon edilmiş halde kullanılırlar. Bileşimlerinde bulunan Si ve Mg alaşım elementleri, kısmen α-Al matriste çözünmüş olarak ve kısmen intermetalik faz olarak bulunurlar. Alaşımın bileşimine ve katılaşma koşullarına bağlı olarak katılaşma esnasında değişik intermetalik fazlar oluşabilir. Bütün ticari alaşımlarda Fe, empurite olarak bulunur ve katılaşma esnasında Al-Fe ve Al-Fe-Si gibi intermetalik fazları oluşturur. α -Al matriste veya Al-Fe-Si intermetalik fazında Si, Mg ile birleşerek katılaşma işleminin ileriki safhasında $Mg_2Si$ partiküllerini oluşturur. Alaşımın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde intermetalik partiküllerin çeşidi, boyutu, morfolojisi ve dağılımı önemli bir yer tutar (ASM Handbook, 1979). Oluşturdukları kimyasal bileşiklerle, iyi mekanik özelliklerinden dolayı uçak ve uzay konstrüksiyonlarda ve donanımlarında, tasıma araçlarında, demiryolu taşıtlarında vb. sanayi sektörünün çeşitli alanlarında kullanılmakta olan bu alaşımlar, ayrıca ısıl işlemle sertleştirilen alaşımlar arasında soğuk şekillendirmeye elverişli alaşım grubudurlar (Öksüz, 1996).

#### 2.2.1.7. 7xxx serisi alaşımları

Bu serinin ana alaşım elementi çinko ’dur. Küçük oranlarda magnezyumla ilave edildiğinde çok yüksek mukavemete sahip, ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar meydana getirilebilir. Ana alaşım elementi olan çinko %5 civarında kullanıldığında, alaşımlara

çok yüksek çekme dayanımı kazandırır. Çinkonun ana alaşım elementi yanı sıra bir miktar Mg ile birlikte kullanılması malzemenin ısıl işlemle sertleştirilmesini sağlar. Uçak gövdelerinin yapımında kullanılan AA7075 alüminyum alaşımı çok yüksek mukavemet özeliğine sahiptir. Al-Zn-Mg serisi alasımlar orta mukavemetli ve çökelmeyle sertleşebilir konstrüksiyon malzemesidir. Ayrıca bu alaşım grubu, tavan vinçleri, kamyon kasaları, vidalı makine parçaları, uçak, roket ve savunma sanayi parçalarında kullanılmaktadırlar (Coşkuner, 2001). Tablo 2.4'de bazı 7xxx serisi alaşımların kimyasal bileşenleri verilmiştir.

**Tablo 2.4.** 7xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri (Öksüz, 1996)

| Alaşım | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AA7010 | 0,12 | 0,15 | 1,5-2,0 | 0,10 | 2,1-2,6 | 0,05 | 0,05 | 5,7-6,7 | 0,11-0,17 | Kalan |
| AA7178 | - | - | 2,00 | - | 2,70 | 0,23 | - | 6,80 | - | Kalan |
| AA7049 | - | - | 1,6, | - | 2,40 | 0,16 | - | 7,70 | - | Kalan |
| AA7075 | 0,40 | 0,50 | 1,2-2,0 | 0,30 | 2,1-2,9 | 0,18 | - | 5,1-6,1 | 0,15 | Kalan |

### 2.2.2. Döküm alüminyum alaşımları

Bu grubun alaşımları genellikle pres döküm, kum döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak üretilmektedirler. Bu alaşım grupları iyi derecede fiziksel özelliklere sahip olup, işlenmeye ve kaynak işlemine uygundurlar.

Isıl işlem yaygın bir şekilde dövme alüminyum alaşımlarında kullanmakla birlikte, döküm alaşımların bir kısmına da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı döküm alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri, dövme alüminyum alaşımlarından farklıdır.

Silisyum %5-12 oran ile en önemli alaşım elementidir. Silisyum ötektik reaksiyon veren bir element olduğundan, ilavesiyle alaşımın akıcılığı ve besleme kabiliyeti artırmasına ilaveten malzemenin mukavemeti de artırır. Magnezyum elementi %0,3-l arasında ısıl işlem uygulanabilen alaşımlara eklenir ve çökelme işlemi ($Mg_2Si$) ile malzeme mukavemetinin artmasını sağlar. Bakır, yüksek sıcaklık direncin arttırmak amacıyla %l-4 arasında ilave edilip, $CuAl_2$ bileşiği şeklinde çökelme fazı oluşturur. Çinko elementi de aynı şekilde yaşlanma amaçlı olarak malzemeye ilave edilip, $MgZn_2$ çökeltisi oluşturur. Bor (B) ve titanyum (Ti) döküm alüminyum alaşımlarına tane küçültücü olarak ilave edilirken sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri ötektik

yapıyı modifiye edici olarak eklenir. Kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementler kullanılabilir (Öksüz, 1996).

Döküm alüminyum alaşım grubunun özellikleri hafif bir döküm alaşım yapısını her ne kadar sergiliyor olsa da, özellikle otomotiv sanayisinde çok geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Döküm alüminyum alaşımları genellikle iki fazlı olup, bazı bileşim özellikleri ısıl işlemle veya ergimiş metali kalıba dökmeden önce döküm yapısında bir iyileştirme işlemi yapılarak düzeltilebilir (Oysu, 1996; Fine, 1975).

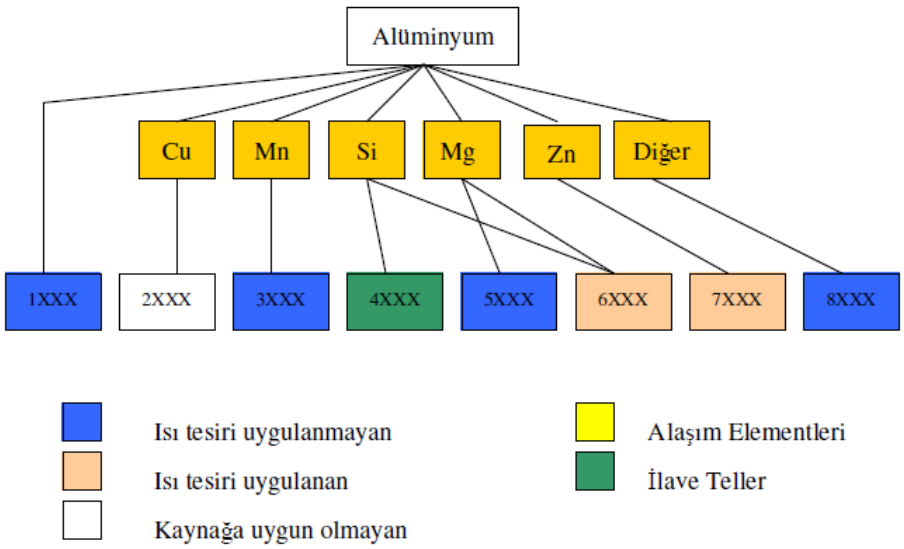
# 3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

Günümüzde yapıştırma, lehim, perçin, cıvata ve kaynak gibi farklı birleştirme yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Özelikle bağlantı güvenirliliğinin gerektirdiği havacılık, uzay, otomotiv, inşaat ve deniz endüstrilerinde parça değişimi yerine parçanın tamirinde bağlantı elemanlarının kullanımı çok önemli yer tutmaktadır. Eğer parçaların birleştirmesinde kaynak kullanılacaksa bağlantı bölgesinin yapısı veya kaynak metalurjisi birleştirme bölgesinin güvenirliği açısından çok önemlidir. Bunun için alüminyum ve alaşımlarının kaynak metalurjisi ve prosesleri özellikle artan bir öneme sahip olmaktadır. Önceleri kısıt olarak görülen yüzeydeki oksidin kaldırılması günümüzde daha iyi anlaşılmaktadır. Birleşenlerin ve tükenen malzemelerin hazırlanmasında daha dikkatli olunması gereği alüminyum alaşımlarının kaynağında genel olarak kabul görmüştür. Alüminyum alaşımlarının kaynağında ısı tesiri altındaki bölge kaynaklı parçanın en hassas bölgesini oluşturmaktadır. Kaynak metodolojisi diğer demir alaşımlı malzemelerin kaynağında ortak olmasına rağmen alüminyumda değişmektedir. Alüminyumun kaynak sıcaklığına ısıtıldığında renginin değişmemesi kaynak havuzunun belirlenmesinde güçlülük yaratır (Jang ve ark., 2005). Yüksek sıcaklıkta (2050 °C) alüminyum alaşımlarının yüzeyi ergiyen bir oksit tabakası ile kaplanır. Bu oksit tabakası yüzeyi çok sıkı bir şekilde sarar ve iç kısımlara doğru oksitlenmenin ilerlemesini önler. Kaynak sıcaklığında ergimeyen bu oksit tabakasının varlığı, bağlantının sürekliliğini sağlayan damlacıkların bağ oluşturmasına, elektrodun kaynak dikişine ergimesi ile geçerek engel olur. Ayrıca oksit tabakasının kaynak banyosu içerisinde katılaşarak bağlantının mukavemetini azaltır. Bazı alüminyum alaşımlarında kaynak esnasında uygulanan ısıl çevrim, ana katı çözelti içerisinde bulunan alaşım elementlerinin, ergimiş bölgeye veya esas metale çökelmesine neden olur ve bu durum bağlantının mekanik ve kimyasal özelliklerinin esas metalden farklı olmasına neden olur (Tülbentçi, 1986).

Alüminyumun ısıl iletkenliğinin yüksek olması, kaynak bölgesinde yerel sıcaklık yoğunlaştırmasını zorlaştırmakta ve birçok hallerde ön tavı gerekli kılmaktadır. Ayrıca ısıl genleşme katsayısının yüksek olması kaynak bölgesinde şiddetli şekil değişimlerine yol açmakta ve çarpılmaları arttırmaktadır (Tülbentçi, 1986). Metalurjik birleştirmede birleşmenin sağlanması için ana metal ve ilave metalin ya da sadece ilave metalin gerekli ısı etkisi altına alınması gerekir. Bu ısı plazma ark, elektron ışın, lazer ışın,

şaloma ya da sürtünme sonucu sağlanabilir. Genel olarak alüminyum alaşımlarının kaynağı diğer metal ve alaşımlarının kaynağından zor olmamakla birlikte biraz dikkat gerektirmektedir. Alüminyum alaşımlarının kaynağında, karbonlu çeliklerin kaynağı için gereken akımın üç katı fazla akıma gerek duymaktadır. Kaynakta gözeneklilik riskinin en aza inmesini sağlamak için ıslak ya da nemli parçalar asla kaynak edilmemelidir. Ortam sıcaklığı 0 °C altında olduğunda kaynak bölgesi ısıtılmalıdır.

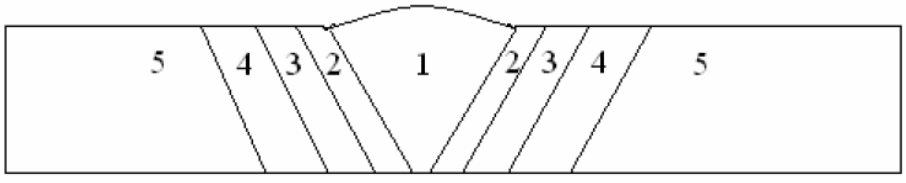
Alüminyum ve alaşımları hafiflik ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı sanayide kullanılmaktadır. Düşük mekanik özelliklerde olmalarına rağmen daha karmaşık alaşımlar çeliklere eşdeğer mekanik özelliklere sahiptirler. Saf alüminyum yumuşak olduğundan küçük miktarlarda alaşım elementleri katılarak mekanik özellikleri arttırılabilir. Dövme alüminyum alaşımları bu bakımdan alaşım elementlerine göre 4 haneli şekilde gruplandırılırlar. Daha geniş anlamda ise alaşım malzemesi yanında ısıl işlem uygulanmış ve ısıl işlem uygulanmamış şekilde gruplandırılabilir. Isıl işlem uygulanmamış alaşımlarda malzeme dayanımı Magnezyum ve mangan içeren 1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi alaşımlarında sertleştirme işlemi ve çözelti sertleştirilmesi yapıldığında bu işlemlere bağlı olarak değişir. Bu alaşımlar kaynak yapıldığında sertleşme işlemlerinde kazandığı etkiler kaynak bölgesi yanındaki IEB'de yumuşama oluşması ile ortadan kalkar. Isıl işlem uygulanmış alaşımlarda malzeme sertliği ve dayanımı alaşım kompozisyonu ve ısı tesirine bağlı olan gruplardır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx grupları bu tanımlamaya uyar. 1xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx ve orta sertlikteki 7xxx (örneğin 7020) grubunda yer alan dövme alaşımlar TIG, MIG gibi kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirler. 5xxx serisindeki alaşımlar mükemmel kaynak kabiliyetine sahiptirler. Yüksek dayanımlı alaşımlar (7010 ve 7050 gibi) ve çoğu 2xxx serisi alaşımları soğuk çatlama probleminden dolayı kaynağa uygun değillerdir. Şekil 3.1'de alüminyum alaşımlarına ait gruplar ve bazı özellikleri verilmiştir (Özdinçer, A., 2006).




**Şekil 3.1.** Alüminyum alaşımları (Özdinçer, 2006)

Kaynaklı halde ısıl işlem kabul eden orta ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının birleştirme yeteneğinin azalmasının esas nedeni, ana metalden başka Şekil 3.1'den de görüleceği üzere yapısal farklılıklar sergileyen dört farklı bölgenin mevcut olması olarak tanımlanabilir. Bölgesel farklılıkların etkilerini yok etmek zordur. Kaynak işlemi sırasındaki ısı girdisi, dövme sertleşmesinin etkilerini ve uygulanan ısıl işlem özelliklerini kısmen veya tamamen yok eder. Bu durumda IEB'de akma sınırı düşer. Özellikle 6xxx ve 7xxx serileri alaşımları kaynak edildiklerinde, 1. ve 3. bölgelerde çatlama meydana gelebilir. 2xxx serileri bu tür etkiye daha yatkın olup bu nedenle bunlarda normal olarak ergitme kaynağı önerilmez (Oğuz, 1990).

Şekil 3.2'de ısıl işlem kabul eden orta ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının kaynağında ısıdan etkilenen bölgeler verilmiştir.




**Şekil 3.2.** Alüminyumun alaşımlarında ısıdan etkilenen bölgeler (Oğuz, 1990)

Burada 1 ile gösterilen bölge kaynak metalini gösterir. 2 numaralı bölge, kısmi erimenin olduğu ve dolayısıyla aşırı ısınmanın olduğu bölgedir. Bu bölge oldukça dar alanda gözlemlenir. 3 numaralı bölge eriyik işlemli bölgeyi ve 4 numaralı bölge sıcaklıkların 200 ile 300 °C'ye vardığı bölgeyi gösterir. 4 numaralı bölgede fazla

yaşlanma ve yumuşama meydana gelebilir. 5 numaralı bölge ise sıcaklığın 200 °C'yi geçmediği ve kaynak işleminin etkisiz olduğu ana metali gösterir (Oğuz, 1990).

Döküm alaşımlarının çoğu gaz korumalı ark kaynağı ile birleştirilebilip tamir edilmektedir. Birçok halde alüminyum kaynak metalinin kaynağında sıcak çatlama gözlemlenebilir. Sıcak çatlama bir kusur olup kaynak esnasında çekme (büzülme) gerilimi gibi nedenlerden ileri gelmektedir. Normal olarak sıcak çatlama olayı, saf alüminyum veya ötektik bileşimde kaynak metalinde meydana gelmez.

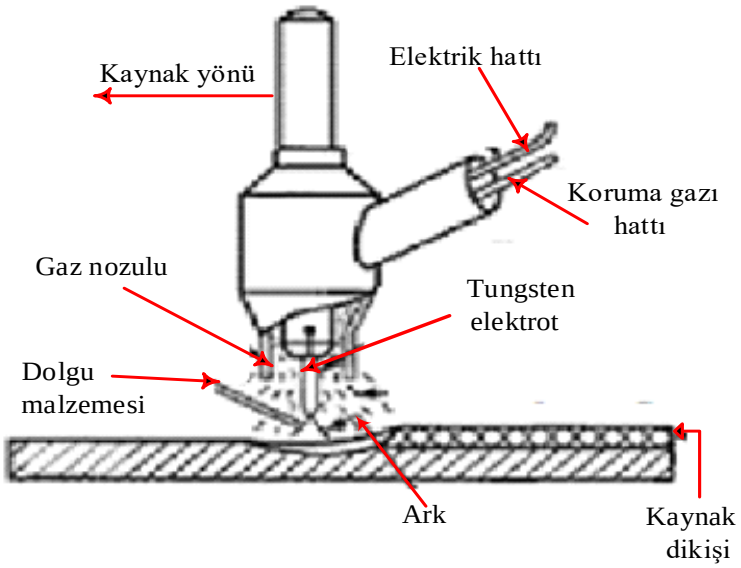
Kullanılan kaynak metali, ilave metalle ana metalin karışımından oluşur. Kaynak bölgesindeki mukavemet, süneklik, kaynak çatlaması direnci, korozyon dayanımı, ısıl işlem gibi özellikler ilave metalin ana metale karışma derecesinden büyük ölçüde etkilenir. Ana metalin ergime miktarı ve ilave metalle karışması, birleştirmenin tasarımı, kullanılan kaynak süreci ve yönteme bağlıdır. Kaynakta çatlama eğilimi genellikle ana metal karışmasını en az düzeyde tutarak azaltılır. Uygun ilave metal ile V kaynak ağzı, özellikle ısıl işlem kabul eden alüminyum alaşımlarının kaynağında, sıcak çatlak oluşumunun azalmasına neden olur. Ayrıca alüminyum kaynağında ilave alaşımın seçimi, dikiş çatlamasını yok etmekte önemli bir etken olmaktadır. Bu durum da çatlama genellikle, ana metalden daha yüksek alaşımlı ilave metal kullanmakla azaltılabilir.

## 3.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri

### 3.1.1. TIG kaynağı

Tungsten Asal Gaz kelimelerinin ilk harflerinden oluşmuş TIG kelimesi ile alınılan yöntem ilk olarak 1930'lu yılların ortalarında denenmiş ve ABD'de II. Dünya savaşında özellikle alüminyum alaşımlarının ve paslanmaz çeliklerin kaynağında yoğun bir şekilde kullanılmıştır.

TIG yönteminde kaynak arkı, ergimeyen bir tungsten elektrod ile kaynak yapılan iş parçası arasında oluşur. Ark, elektrod ve ergimiş kaynak banyosu havanın zararlı etkisinden argon, helyum veya her ikisinin belirli oranlardaki karışımları ile korunur. Koruyucu gazın soy gaz olarak seçilmesinin nedeni oksidasyon ve nitrür oluşumu gibi istenmeyen durumların oluşmasını engellemektir (Oysu, 1996). Alüminyumun TIG kaynağı; doğru akım düz kutuplama, doğru akım ters kutuplama veya alternatif akımla yapılabilir (Şekil 3.3).




**Şekil 3.3.** TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi (Kadayifçi, 2013)

Kaynak edilebilir ince kesitli alüminyuma ve alaşımlarına ilave metalsiz TIG kaynağı uygulanabiliyor olsa da, 6061-T6 gibi bazı ısıl işlem kabul eden alaşımlarda çatlama meydana gelebilir. 25 mm kalınlıktaki levhalar kaynak ağzı açılıp ilave metal kullanılarak kaynak edilebilir. Doğru akım düz kutup otomatik donanımı ile ilave metal kullanmadan 32 mm kalınlığa kadar birleştirilebilir. Alüminyum kaynağında toryumlu tungsten, alternatif akımda saf tungsten kadar kararlı (stabil) ark sağlayamamaktadır. Toryumlu tungsten genellikle doğru akım düz kutuplamada otomatik kaynakta kullanılır. Alüminyumun alternatif akım kaynağı için elektrodlar 0.25 mm'den 6.3 mm çapa kadar olur. Her iş için uygun elektrod çapının seçilmesi önemlidir. Elektrodun kirli ve pürüzlü olması, asal gazın elektrodun soğumasından önce kesilmiş olması, üflecin içinde gaz besleme sisteminde hava sızmasının varlığı veya elektrod ucunun metale değmesiyle gerçekleşebilir. Elektrodun ucu, alternatif akımda küresel, doğru akımda ise konik şekillidir (Oğuz, 1990).

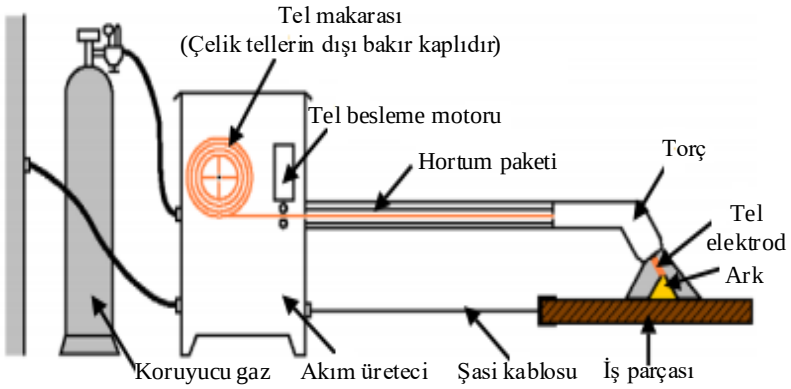
Alüminyumun alternatif akım ile kaynağında kalın parçalar ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır. Çevre sıcaklığı 5 °C'nin altına düşmedikçe 9,5 mm'ye kadar kalınlıkta olan levhalarda ön ısıtmaya gerek yoktur. 9,5 ile 12,5 mm arasındaki kalınlıklara sahip levhaların ön ısıtılması isteğe bağlıdır. 19 mm ve daha kalın levhaların ön ısıtılması gereklidir ve bu da 175 °C'yi aşmamalıdır. Tek taraflı kaynaklarda alt tarafın argonla korunmamış olması halinde bütün dikişler saçların arasında aralık bırakılmadan puntalanmalıdır (Büyükarslan, 2006).

TIG kaynak yöntemi günümüzde, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında geniş çapta kullanıldığından büyük bir önem taşır. Bu konuda TIG kaynak yönteminin başlıca üstünlükleri söyle sıralanabilir:

- ✓ Kaynak hızının yüksek olması,
- ✓ Kaynak enerjisinin belirli bir bölgeye yoğunlaştırılması,
- ✓ Isıl çarpılmaların az olması,
- ✓ Mekanik özellikleri çok iyi bir şekilde koruması,
- ✓ Kaliteli kaynak dikişlerinin elde edilmesi,
- ✓ Kaynak sonrası cüruf oluşturmadığından temizleme işlemine ihtiyaç duyulmaması,
- ✓ Kolay bir şekilde mekanize edilmesi ve birçok pozisyonda uygulanabilmesidir.

### 3.1.2. MIG kaynağı

Alüminyum ve alaşımlarının ergitme yöntemiyle yapılan kaynaklarından çoğu MIG (Metal Asal Gaz) yöntemiyle yapılmaktadır. Bu yöntemle IEB, elektrik ark kaynağı ve oksi-asetilen gibi kaynak yöntemlerinkinden daha dardır ve kaynak hızı daha yüksektir. Şekil 3.4'te şematik görüntüsü verilmekte olan bu kaynak yönteminde doğru akım ters kutuplama kullanılmakta olup, imalatta 1,6 mm'ye kadar kalınlıktaki alüminyum alaşımları birleştirile bilmektedir (Büyükarslan, 2006).




**Şekil 3.4.** MIG kaynak donanımı (https://abs.cu.edu.tr/ )

MIG kaynak yönteminde, torç'un ucundan yarı otomatik ya da tam otomatik bir şekilde sürekli olarak ayarlanan ilave bir metal (ergiyen elektrod tel) ile kaynak yapılmaktadır. Kaynak, argon ve helyum gibi asal koruyucu gazlar altında yapılır. Kullanılan koruyucu gazlar asal olduğu için malzemeler arasında tepkime oluşmaz.

Argon korumasıyla; elektrik akımı, kaynak banyosunun önünde, ana metalin üstündeki oksit tabakasını parçalar. Bu temizleme etkisinin, ana metal levhasını terk eden elektronlar veya levhaya çarpan asal gaz iyonları ile yâda bu iki olayın birlikte gerçekleşmesinden ileri geldiği düşünülmektedir (Oysu,1996).

MIG yönteminin bir karakteristiği olan enerjinin verimli kullanılması, çoğu kez ön ısıtmayı gereksiz kılar. Bu nedenle yöntem kalın alüminyum kesitlerinin kaynağında rahatlıkla uygulanmaktadır. Bu kaynak yönteminde, diğer kaynak yöntemlerine göre, daha yüksek bir kaynak hızı, iyi bir nüfuziyet ve yüksek kaynak kalitesi elde etmek daha kolaydır. IEB'ın genişliği, örtülü elektrod ve oksi-asetilen kaynaklarından daha küçük olur. Ayrıca kaynakçı ustası için, kaynak uygulaması diğerlerine göre çok daha kolaydır. Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynak yönteminin, diğer kaynak yöntemlerine göre üstünlükleri su şekilde sıralanabilir (Saldır, 1996);

- ✓ Düzgün ve kaliteli bir kaynak dikişi ele edilir.
- ✓ Kaynak sırasında ayrı bir dekapana gereksinim duyulmaz.
- ✓ Kaynak uygulaması diğer yöntemlere göre daha kolaydır.
- ✓ Bu yöntemde dekapan kullanılmadığı için korozyon oluşmaz.
- ✓ Kaynak sonrası temizliğe (cüruf oluşumu gibi) ihtiyaç yoktur.
- ✓ Koruyucu gaz kullanıldığı için kaynak bölgesi atmosferk koşullardan iyi korunur.
- ✓ Her çeşit birleştirme sekli mümkündür. Özellikle iç köse kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine göre daha kolay yapılır.
- ✓ Büzülme ve çekme olayı gaz eritme kaynağına göre daha azdır.
- ✓ Diğer kaynak yöntemlerinden daha yüksek hızda kaynak yapılır. Kesintisiz sürekli dikişler elde edilir.
- ✓ Rahatlıkla otomatik olarak çalışabilir.
- ✓ Sınırsız kalınlıkta birleştirme yapmak mümkündür. Ayrıca kalın parçaların kaynağında yüksek akım uygulayarak ön ısıtmasız da birleştirme yapılabilir.
- ✓ Tüm kaynak pozisyonlarında çalışmak olasıdır ve TIG kaynağına nazaran daha iyi bir çalışma sağlar.
- ✓ İyi bir ark kararlığı oluşturulur.

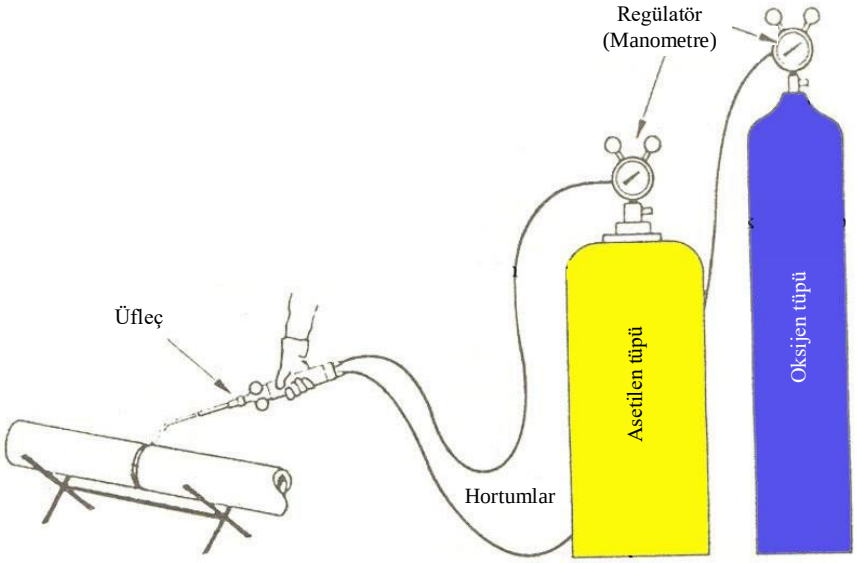
Bazı kaynaklı birleşmelerde sınırlı miktarda gözeneğe izin verilse de bu kusur süneklik, yorulma ve çekme dayanımı üzerinde olumsuz etki yapar. Kaynak gözeneklik düzeyi dört önemli etken tarafından kontrol edilir. Bunlar; malzemenin başlangıçtaki

hidrojen içeriği, hidrojenin absorbe edilme oranı, kaynak metali içinde katı eriyik halinde tutulabilen gaz hacmi ve gaz kabarcıklarının kaçabilme oranıdır. Ticari saflıktaki alüminyum, hidrojen için düşük bir çözünürlük ve yüksek bir absorpsiyon oranı sunar. Bu nedenle bu malzeme gözenekliliğe eğimlidir (Oğuz, 1990; Büyükarslan, 2006).

Alüminyum kaynaklarında gözeneklilik oluşumunun başlıca nedeni, kaynak banyosunda sıkışıp kalan gazlardır. Çıkış için gazın zaman bulamadığı katılaşmalarda, katılaşan metal ya da alaşımda gözenek meydana gelir. Gazlar, koruyucu gazda bulunabilen kalıntı maddelerden, havadan ve sudan, kirli ana ve ilave metalden, fazla uzun ark ya da şiddetli ark etkisinden ileri gelebilirler. Koruma gazı, hava veya gaz akımının taşıdığı kirletici maddelerden oluşan gazlar; şiddetli ark etkisinin sonucu olarak kaynak banyosunda sıkışıp kalabilirler. Aşırı yüksek akım şiddetleri, kaynak banyosunda bir gaz kabarcığı üzerine metal yığarak gaz sürükleyebilir. Tüm kabarcık kaçmaya vakit bulamadan eriyik metalle birlikte katılaşır. Bu tip gözenekler şekil olarak genellikle düzensiz olurlar (Oysu, 1996). Hava sıkışmalarına ek olarak kirletici yabancı maddelerden hidrojen gazının meydana gelmesi, alüminyumda gaz gözenekliliğinin bir başka nedenidir. Ergimiş alüminyum, atomik hidrojene karsı büyük bir tutma eğilimi gösterir. Hâlbuki katı alüminyum, çok az hidrojen içerebilir. Şu halde, kaynak banyosu katılaştıkça hidrojen difüze olur. Katılaşma süreci hızlı olduğundan gaz yüzeye yükselemez ve içerde kalıp gözenek oluşturur. Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağı, TIG kaynağına nazaran daha iyi sonuçlar vermektedir. MIG kaynağı daha hızlı bir kaynak işlemi sağlar. Elektrod pozitif (+) kutba bağlandığında derin bir nüfuziyet elde edilir.

### 3.1.3. Oksi asetilen kaynağı

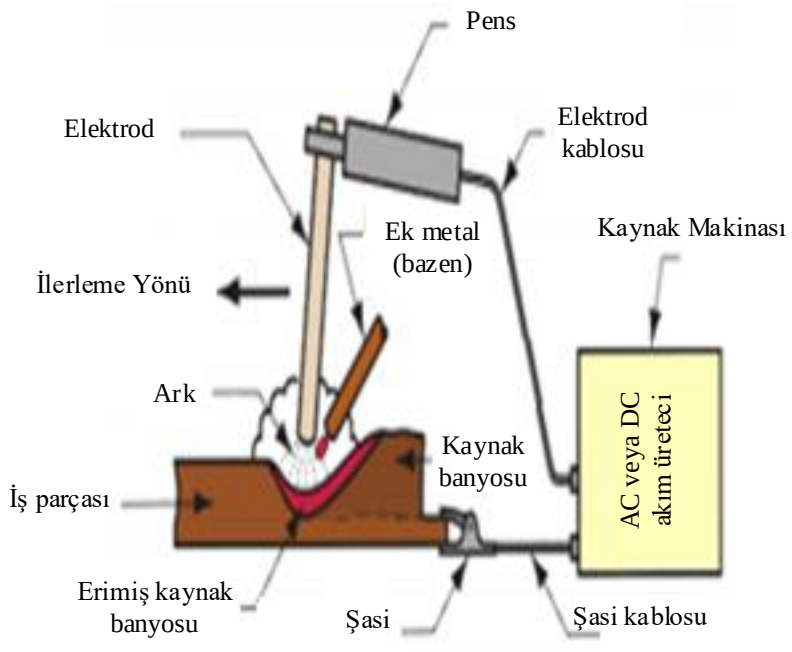
Oksijenin yanıcı bir gaz ile yakılması sonucu yüksek ısı oluşur. Yüksek ısının yardımıyla metal eriterek kaynak işlemi yapılabilir. Oksijenin yanmasında kullanılan en yaygın yakıt asetilen gazıdır ve genellikle oksijenin yanmasında bu gaz kullanıldığı için oksi asetilen kaynağı olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.5). Asetilenin oksijen ile yakılmasında sıcaklık yaklaşık olarak 3200 °C'ye kadar çıkmaktadır. Genellikle aynı karışım oranında oksijen asetilen kaynağı yapılır. Yüksek ısı ile oluşturulan kaynak banyosu istenilen kaynak dikiş boyunca ilerletilirken, yük ısı sonucu oluşturulan kaynak banyosuna genellikle metal kaynak teli damlatılarak istenilen miktarda dolgu yapılır.




**Şekil 3.5.** Oksi asetilen kaynağı şematik gösterimi (http://www.metaluzmani.com)

### 3.1.4. Elektrik ark kaynağı

Bu kaynak yönteminde, kaynak için uygun elektrik akımı, bu iş için geliştirilmiş kaynak makinesi tarafından sağlanır. Akım, kablolar vasıtasıyla iş parçasına ve elektrod pensesine iletilir. Kaynakçı, elektrodu penseye takar ve sonra elektrodu iş parçasına temas ettirerek ark oluşumunu kontrol eder (Şekil 3.6). Arkın başlatılması, yanması, yüksekliğinin ayarı, söndürülmesi ve kaynak hızı gibi çeşitli özellikler kaynakçı tarafından ayarlanır.




**Şekil 3.6.** Elektrik ark kaynağının şematik gösterimi (https://abs.cu.edu.tr/ )

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kaynakçı kalitesi çok daha önemlidir. Çünkü ark çeliklerin kaynağında olduğu gibi kendini belli etmez ve ergime derecesinin düşük olması gibi özellikler kaynağı zorlaştırır. Bu yüzden kaynakçının bilgi ve becerisi alüminyum kaynağı için çok önem taşır (Saldır, 2003). Alüminyum ve alaşımlarının örtülü elektrodlarla ark kaynağında ark, iş parçası ve ergiyen elektrod arasında oluşur ve bu şekilde ergiyen elektrod kaynak metali haline geçer. Elektrod örtüsü aynı zamanda yanarak ergir. Bu sırada açığa çıkan gaz karışımı, ark bölgesini korur ve oluşan cürufun yoğunluğu kaynak metalinden az olduğu için, cüruf kaynak dikişinin üzerini örterek onu dış ortamın olumsuz etkilerinden korur. Bu yöntemde ısıl işlem yoluyla sertleşmeyen alüminyum alaşımlarını kaynak etmek mümkündür. Yapısal sertleşmeli alaşımlar arasında Al-Si-Mg ve Al-Mg-Si tipi alasımlar da uygun şekilde örtülü elektrodlarla birleştirilebilirler. Fakat dikişe yakın bölgelerde mekanik özellikler düşer. Zn ve Mg alaşımlar, kaynaktan sonra herhangi bir işlem gerektirmeden mekanik özelliklerin aşağı yukarı tümüne sahip olurlar. Kaynak için doğru akım ters kutuplama yöntemi kullanılır. Bu yöntem 2 mm'den kalın alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılır. 6 mm'den ince malzemelerin kaynağında sıvı ve gaz sızdırmazlığı elde etmek güçtür (Oğuz, 1990).

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağını mümkün olduğu kadar yatay pozisyonda yapmaya çalışılmalıdır. Düşey ve tavan kaynaklarından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Kaynak işleminden sonra 200-300 °C'de çekiçlenirse iri taneli döküm yapısı ince taneli hadde yapısına dönüşür ve aynı zamanda dikişin mukavemeti yükselir. Yalnız büyük ve karmaşık parçalarda kaynak yerinin civarı 200 °C'lik bir ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır. Cu içeren Al alaşımları 150-200 °C'lik ön ısıtmaya tabi tutulurlar. Kaynaktan sonra parçanın yavaş soğumaya bırakılması gerekmektedir (Anık, 1960).

Alüminyum ve alaşımları açısından bu yöntemin iyi yanları şu şekilde sıralanabilir;

1. Kaynak süresi, oksi asetilen kaynağına göre daha kısadır.
2. Bölgesel ısınma dolayısı ile deformasyon tehlikesi azdır.
3. İç köse ve bindirme kaynakları kolayca yapılır.
4. Tek paso ile daha kalın kaynak dikişi elde edilir.

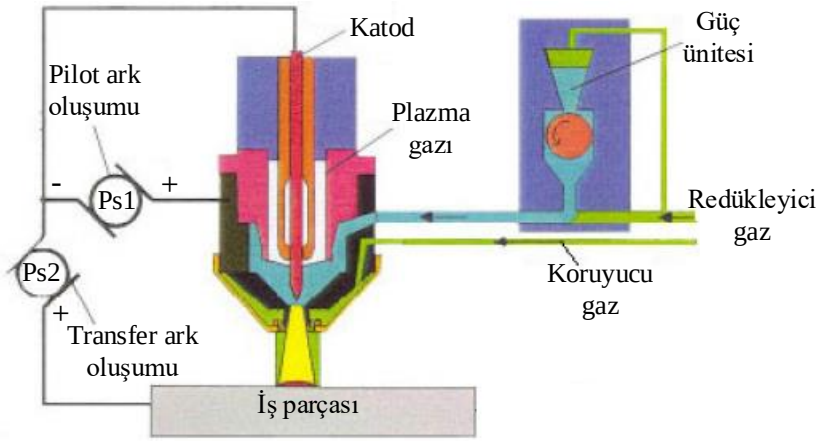
Olumsuz yanları ise;

1. Esas malzeme ile kaynak dikişinin içyapısının çabuk soğuma nedeniyle farklı olması,

2. İnce sacların kaynağının yapılamaması,
3. Elektrodların yanlış kullanılmasından doğan gözeneklerin oluşmasıdır (Anık, 1960; Büyükarslan, 2006).

### 3.1.5. Plazma kaynağı

Alüminyumun plazma ark kaynağıyla birleştirilmesinde, akım üreteçleri kullanılarak oluşturulan kare dalgalı alternatif akım ile yüzeydeki oksit filmi kırılarak kaliteli kaynak dikişleri elde edilir. Alüminyumun plazma ark kaynağı oluk, yatay ve aşağıdan yukarıya dik pozisyonda uygulanabilir. Bu kaynak metodunda doğrudan kısa arklı bir plazma üflecinde sıkıştırılmış, enerji yoğunluğu büyük bir plazma elde edilir. Şekil 3.7'de yöntem şeması verilen plazma üflecinde çift gaz kullanılmaktadır.




**Sekil 3.7.** Plazma ark kaynağı (www.industrialmotionsystems.com)

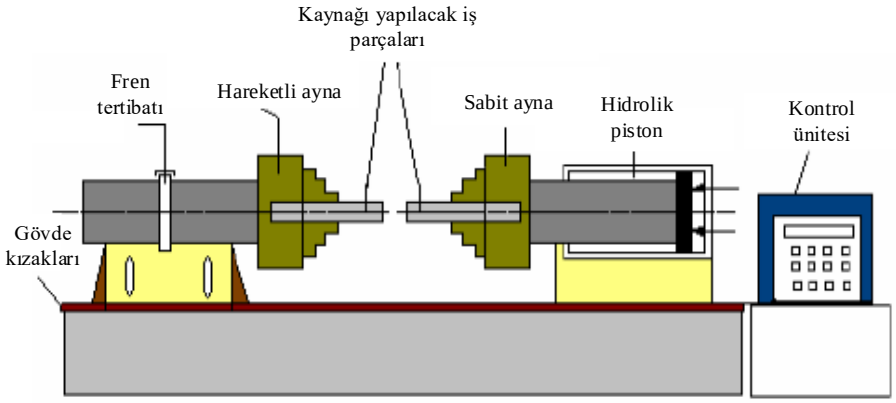
İçten verilen gaz, plazma gazı adını alır. Genellikle asal gaz grubundan argon, plazma gazı olarak kullanılır. Koruyucu gaz, daha dıştan iş parçası ile üfleç arasına, plazmayı çepeçevre saracak şekilde verilir. Bu gaz genelde argon ve moleküler bir gaz ($H_2$ veya $N_2$) karışımıdır. Oluşan plazma is parçasında derin nüfuziyet oluşturmaktadır. Tek pasoda herhangi bir dolgu metali kullanmadan, 8mm'ye kadar kaynatmak mümkün olur (Binan, 2006; Karadeniz, 1990).

## 3.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

### 3.2.1. Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynak yöntemi, öncelikle enerji ve malzeme tasarrufunun sağlaması bakımından 1950 yılından sonra kendisine özel kaynak yöntemleri içerisinde yer

bulmuş bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde; biri sabit, diğeri hareketli olan iki silindirik parça, alın alına eksenel basınç yardımıyla yüzeylerin birbirlerine sürtünmesi sonucu meydana gelen sürtünme ısısı altında birleşir. Bu yönteminde kaliteli bir kaynak elde etmek için; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi ve yığma basıncı gibi parametrelere dikkat edilmesi gerekir. Sürtünme kaynağı işlemine başlamadan önce, alın alına kaynağı yapılacak parçaların yüzeylerinin yağ, pas ve kirden arındırılması; iyi bir kaynak kalitesi elde etme açısından büyük önem arz etmektedir. Normal şartlarda kaynağı çok zor olarak görülen bazı yüksek mukavemetli ısıl işlem kabul eden alüminyum alaşımlarının, sürtünme kaynağı ile birleştirilmektedir. Parçanın mukavemettin de her hangi bir kayıp olmadığı gibi kaynak bölgesi de tamamen sünek olur. Bu kaynak yönteminde malzemelerin ergimesi için gerekli olan enerji kullanımına ihtiyaç duyulmadığından maliyetten ve işçilikten tasarruf sağlanır (Özdemir, 2002). Şekil 3.8'de sürtünme kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir.




**Şekil 3.8.** Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi (Özdemir, 2002).

Sürtünme kaynağında, birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikleri dört bölge ayırarak incelenir. Bunlar; birleşme ara yüzeyindeki temas alanı, tamamen deformasyona uğramış bölge, kısmen deformasyona uğramış bölge ve deformasyona uğramamış bölge olarak tanımlanır. Sürtünme kaynağında bir ergime bölgesinin olmayışı, ısının tesiri altındaki bölgenin darlığını ve kaynağın çevresinde plastik olarak deforme olmuş malzemenin varlığını teşkil eder. Kaynak kalitesi; uygun malzeme seçimi, kaynak tasarımı, sürtünme süresi, sürtünme basınç kuvveti, devir sayısı, yığma basınç kuvveti ve yığma süresi gibi kaynak parametrelerine bağlıdır. Hız,

zaman ve basınç kuvveti gibi kaynak parametrelerinin geniş çapta kullanımı ile kaliteli bir kaynak elde edilebilir (Özdemir, 2002).

### 3.2.2. Sürtünme karıştırma kaynağı

1991 yıllarının baslarında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı, ilk olarak alüminyum alaşımlarında uygulanmaya başlanılmış daha sonra, bu yöntem sadece İngiltere'de uygulanmakla kalmamış, diğer birçok ülkede geniş çaplı bir araştırma ve uygulama konusu olma niteliği kazanmıştır. Günümüzde başta Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avrupa ülkeleri olmak üzere, birçok kaynak teknik enstitülerinin üretim birimlerinde yöntemin geliştirilmesiyle ilgili bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Diğer yandan, aynı ülkelerin öncülüğünde büyük organizasyon şirketleri, bu tekniği kullanabilmek için genel lisans çalışmaları yapmışlardır. Ülkemizde, yöntemin organize sanayi bölgelerinde, kullanımının artırılması için TÜBİTAK ve KOSGEB başta olmak üzere yerli araştırma ve proje kuruluşları, konuyla ilgili araştırma ve uygulama yapan kuruluşlara maddi destek sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle (MIG, TIG, elektrik ark kaynağı) birleştirmelerinde karşılaşılan problemlerin azaltılması amacıyla araştırmacılar, yeni katı hal kaynak yöntemleri üzerindeki çalışmalara yönlenmişlerdir (Kurt ve ark., 2004). Sürtünme karıştırma kaynağı ya da kısaca FDW yöntemi, diğer kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi kolay olmayan alüminyum alaşımlarının kolaylıkla birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş bir başka şeklidir. Bilindiği gibi, birçok metal ve alaşımların birleştirilmesinde kullanılan sürtünme kaynağı, genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan bir katı hal kaynak yöntemidir (Özsoy ve Kaluç, 2002). Yöntemin uygulanması sırasında duman ve isin oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave elektrod teline ihtiyaç duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığının gerekmemesi, fazla bir işçilik gerektirmemesi ve otomasyona uyumluluğu gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, FSW yönteminin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Şık, 2003). İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi kullanılarak yapılacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda elde edilen bilimsel sonuçlar, yöntemin gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılabilen ve gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan alüminyum ve alaşımlarında başarılı ve güvenli

birleştirmelerin elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca bakır, kurşun, titanyum, magnezyum alaşımları ve metal matrisli alüminyum kompozitlerin de bu yöntemin uygulanmasına başlanılmıştır (Çam, 2007).

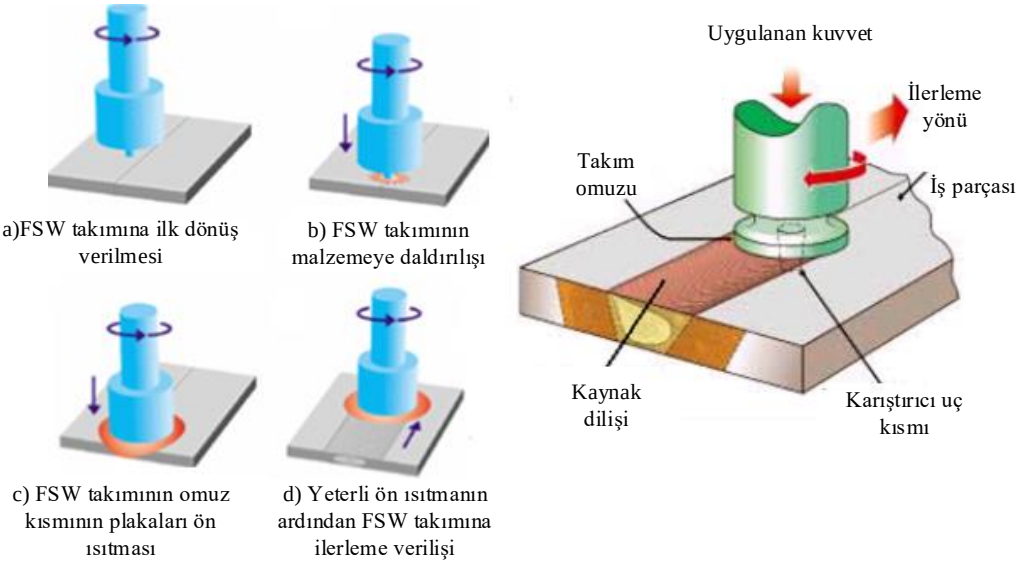
### 3.2.5.1. Kaynak yönteminin uygulanışı

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı zor olmamakla birlikte kaynağın uygulanışı esnasında dikkat edilmesi gereken bazı unsurlar vardır. Örneğin kaynak işlemi esnasında oluşabilecek titreşim ve hareketleri önleye bilmek için alın alına birleştirilecek parçaların bir mengene ya da tutucu pabuçlar yardımıyla sıkı bir şekilde sabitlenmesi gerekir. Eğer parçalar yeterli düzeyde sabitlenmemişse, kaynak işlemi sırasında iş parçaların sağa sola hareketi olur. Bu durumda düzgün bir kaynak işlemi yapılamaz ve hatta kaynak yapılacak makineye de zararı olur.

Bu kaynak yönteminin uygulana bilmesi için sürtünme ısısını ve karışımı sağlayabilecek karıştırıcı uçlara ihtiyaç vardır. Freze tezgâhının pensine bağlanan karıştırıcı uç önceden belirlenmiş bir devirde döndürülür ve birleşimi istenilen levhalara daldırılır. Özel olarak hazırlanmış karıştırıcı uç; sabit düzlem boyunca ekseni etrafında dönme hareketi yaparak levhalar için gerekli sürtünme ısısı oluşturur ve freze tablasına önceden belirlenen ilerleme hızı ile iki levha arasındaki birleşmeyi sağlar. Karıştırıcı uç takımı, iki görev üstlenmektedir. Bunlardan birincisi malzemeyi ısıtarak gerekli birleştirme sıcaklığına getirmek, ikincisi ise doğrusal harekettin sağlandığı freze tablası ile karıştırma yaparak iki levhanın birleşmesini sağlamaktır. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi karıştırıcı uç etrafındaki malzeme, sürtünmeyle ısınıp yumuşayarak pimin ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır ve karıştırılan malzeme soğuyarak katılaşır (Özarpa, 2005). Plastik deformasyonla alüminyum yüzeyinde oluşan oksit tabakası da bu şekilde kırılmaktadır. Bundan dolayı sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı sırasında koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaz. Tüm bu olaylar alaşımın ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir.

Alüminyum alaşımları farklı kimyasal ve mekanik özeliklere sahiptir. Kaynak işlemine başlamadan önce mutlaka, kaynak değişkenlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar birleştirilecek malzeme çiftlerine göre farklılıklar göstermektedir. Bu kaynak yönteminin 1 mm'den daha az ve 35 mm'den kalın olan ve kaynatılamaz olarak düşünülen alüminyum alaşımlarına başarıyla uygulandığı ve araştırmacılar tarafından,

kaynaklı malzemelerde çok iyi mekanik özelliklere ulaşıldığı belirtilmektedir (Özdemir, 2003).




**Şekil 3.9.** Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin aşamaları

Sürtünme karıştırma kaynağı süresince malzeme yüksek sıcaklıklarda yoğun kalıcı plastik deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bunun sonucunda malzemenin içyapısında ince taneli ve yeniden kristalleşmiş tane yapıları meydana gelmektedir. Bu durum malzemenin iyi mekanik özellikler sergilemesine yol açmaktadır (Mishra ve ark., 2005). Ayrıca ark kaynağına göre işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, sürtünme kaynağının yüksek performans sağlamasına katkı sağlamaktadır (Özarpa, 2005).

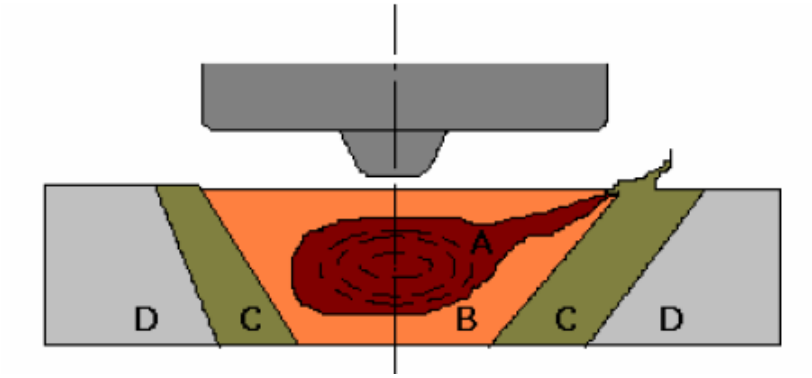
### 3.2.5.2. Kaynağın işlem karakteristiklerini etkileyen faktörler

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, kaynak kalitesini etkileyen dört temel etmen vardır. Bunlardan ilki karıştırıcı uç geometrisidir. Çünkü uç geometrisi birleştirilecek malzemelerin karışmasını doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin plastik deformasyonla karıştırılması ve malzeme akışı, kaynağın mekanik özeliklerini doğrudan etkilemektedir. İkincisi karıştırıcı ucun devir sayısı ve sabitlendiği tablanın ilerleme hızıdır. Devir sayısı ve ilerleme kaynağın sürtünme sıcaklığını etkilemekte ve böylece kaynak bölgesinin metalurjik özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Üçüncüsü; birleşimi yapılacak malzemedir. Birleştirilecek malzemelerin ergime sıcaklıkları ve mekanik özellikleri birbirine yakın olduğunda daha iyi bir birleşmeden bahsedilebilir. Sonuncusu ise karıştırıcı ucun birleşme bölgesindeki batma derinliğidir. Diğer üç

etmenin kontrolü kolay olmakla beraber, karıştırıcı ucun batma derinliği kritik bir faktördür ve kontrol edilmesi güçtür. Çünkü batma derinliğinin kaynak süresince sabit kalması gerekmektedir. Ancak uzun levhaların birleştirilmesinde yüzeylerin çok düzgün olmaması, bu kontrolü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça önemlidir ve dikkat edilmesi gerekmektedir (Çam, 2002).

### 3.2.5.3. Kaynağın metalurjik yapısı

Bu kaynak tekniği, ergime derecesinin altında kaynak yapan bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde ısıdan etkilenen bölge, ergitme esaslı kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık altında oluşmadığından, oldukça dardır. Kaynak bölgesinden esas metale doğru bu bölgelere bakıldığında, sırasıyla dinamik yeniden kristalleşen bölge (DKB), TEB, IEB ve esas malzemeden oluşmaktadır. Şekil 3.10'da sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum alaşımının mikroyapısındaki farklı bölgeler görülmektedir.



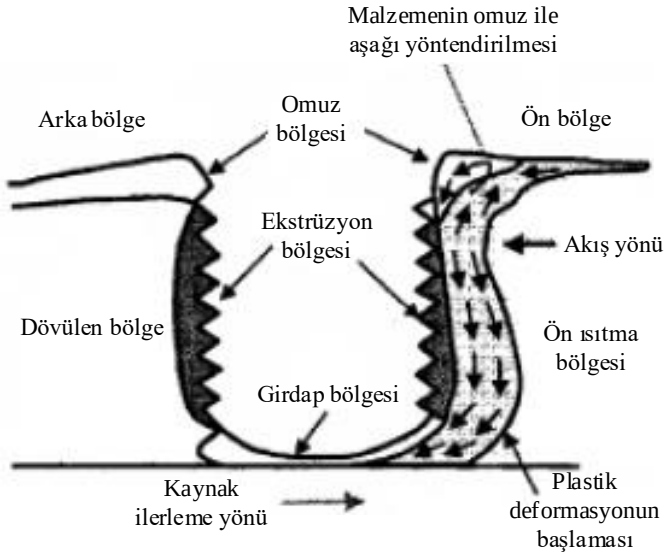

**Şekil 3.10.** Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımın mikroyapısı (Sarsılmaz, 2008)

Şekil 3.10'da A ile gösterilen bölge DKB'yi, B ile gösterilen bölge TEB'i, C ile gösterilen bölge IEB'i ve D ile gösterilen bölge esas malzemeyi temsil etmektedir.

### 3.2.5.4. Karıştırıcı uç malzemesi ve tasarımı

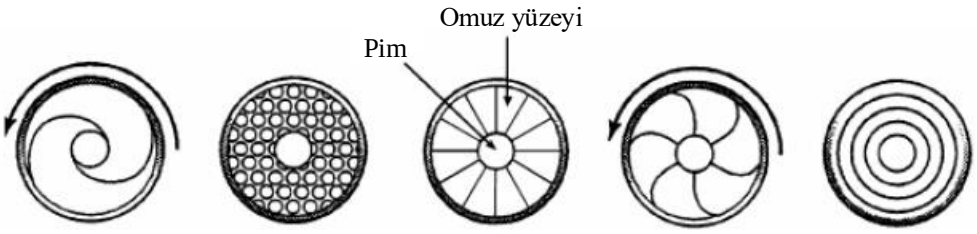
Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, yüksek sıcaklıklarda sürtünme direncine sahip malzemelerden imalatı yapılan takımlar kullanılır. Alüminyum alaşımlarının kaynağı için yüksek karbonlu çeliklerden üretilen takımlar ve bazı yüksek hız (HSS) çeliklerinin kullanımı yeterli olurken, bakır ve paslanmaz çeliklerin kaynağında ise yüksek sıcaklık ve aşınma direncine sahip sert karbür uçlar kullanılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynak uygulamasında, kullanılan karıştırıcı

ucun iki bölgesi kaynak işlemini gerçekleştirmektedir. Bunlar; karıştırıcı uçun pimi ve karıştırıcı uç omuzudur. Belirli bir geometride üretilen karıştırıcı uçlar, kaynak esnasında yumuşayarak akıcı hale gelen malzemenin karıştırma işlemini yaparak aynı zamanda malzemenin taşınmasında ve ekstrüzyonunda etkin rol almaktadır (Şekil 3.11).




**Şekil 3.11.** FSW işleminde karıştırıcı ucun malzemedeki deformasyon evreleri (Mishra ve ark., 2005)

Karıştırıcı uç omuzu, bu pimin hemen üzerinde, belirli bir çapa sahip, yaklaşık 2,5-3°'lik bir iç eğimde veya kanallı olarak imal edilir. Bu kısım kaynak dikiş genişliğini oluşturan ve kaynak esnasında yukarıya taşınan viskoz malzemenin tekrar aşağıya bastırılarak yüzeye sıvanmasında etkin rol oynamaktadır. Şekil 3.12'de farklı omuz geometrileri görülmektedir.




**Şekil 3.12.** Karıştırıcı uç omuz geometrileri (Mishra ve ark., 2005)

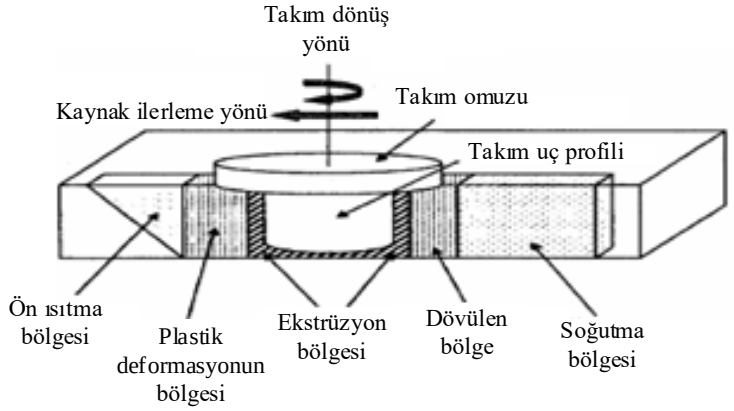
Karıştırıcı ucun pim kısmı ve pim profilleri gelişi güzel bir şekilde üretilemezler. Parçalarda düzgün ve kaliteli kaynak yapıları elde etmek için farklı geometrik şekillerde tasarımları yapılan profillere ihtiyaç duyulmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde birleştirme kalitesini etkileyen en önemli faktör, karıştırıcı ucun geometrik profili ve diş yapısıdır. Bu etmenlere bağlı olarak birleştirilecek parçaların kaynak

kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle iyi bir parametre araştırması yapıldıktan sonra en uygun ve ideal sonuçlar verecek özelliklere sahip bir karıştırıcı uç seçmek oldukça önemlidir (Özdemir, 2003). Karıştırıcı uç profil tasarımı, kaynak bölgesindeki viskoz metalin akış yolunu kolaylaştıracak bir tasarımda imal edilmelidir. Vidalı profilde bir karıştırıcı uç, yapılan literatür araştırmalarında farklı adımlarda ve farklı ağız sayılarında imal edilerek araştırmacılar tarafından çeşitli alüminyum alaşımları üzerinde denenmiştir. Bu farklı tasarımlar, ayrıca vida haricindeki; koni, üçgen, kare, kanallı vida, konik vida, düz vida gibi geometrik biçimlerde de uygulanmaktadır (Mishra ve ark., 2003). Çeşitli takım geometrilerine sahip tasarımlar Şekil 3.13'de verilmiştir. Yapılan çalışmalarda vidalı geometriye sahip çeşitli karıştırıcı uç tasarımları ön plana çıkmaktadır (Fujii ve ark., 2006). Vidalı geometrideki bir takımda, karıştırıcı ucun helisel dişleri arasındaki uzaklık (hatve), dişlerin kalınlığından daha büyük olması halinde, karıştırma esnasında sekil değiştiren malzemenin helisel diş aralıklarından daha kolay aktığını göstermiştir (Özdemir, 2003). Helisel dişlerin yüzeysel alanı, malzeme özelliklerine göre farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle en uygun malzeme akışını sağlayacak helisel diş formu daima tercih edilmelidir.



**Şekil 3.13.** Farklı geometrilere sahip karıştırıcı uçlar (Zhao ve ark., 2005)

Karıştırıcı ucun omuz bölgesi kaynak işleminde önündeki malzemenin ön ısıtma işlemi sağlamaktadır. Şekil 3.14'te karıştırıcı pim ve omuzun kaynak işlemi sırasında malzemede yol açtığı deformasyon aşamaları verilmiştir. Omuz iç geometrisi, kaynak işlemi esnasında yüksek basınca maruz kalarak alttan yukarı taşınan malzemenin yüzeye belirli periyotlarla sıvanmasında etkin rol oynamaktadır. Öte yandan; karıştırıcı uç omuzu, karıştırma sonucu viskoz hale gelen ve dışarıya doğru çıkmak isteyen metalin kaçışını engellemektedir. Bunun için Şekil 3.13'te görülen çeşitli geometrilere sahip karıştırıcı uç omuzları imal edilmelidir.




**Şekil 3.14.** FSW işleminde karıştırıcı omzunun malzemedeki deformasyon aşamaları (Mishra ve ark., 2003)

# 4. MATERYAL VE YÖNTEM

## 4.1. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada, özellikle havacılık, uzay ve savunma sanayisi gibi yaygın alanlarda kullanılan farklı özelliklere sahip AA7075 ile deniz suyuna korozyon dayanımı çok iyi, yorulma dayanımı yüksek, yumuşak temper formunda soğuk şekillenilebilir özelliği iyi olup deniz araçların yapımında çokça kullanılan AA5182 alaşımı TIG, MIG ve FSW yöntemleri ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde; TIG ve MIG kaynak yöntemlerinde tel ilerleme hızı, gaz debisi, kaynak akımı ve kaynak ağız şekilleri gibi değişken parametreler kullanılırken, FSW yönteminde karıştırıcı ucun dönme devri (devir sayısı), uç geometrisi ve kaynak ilerleme hızı gibi değişken parametreler kullanılmıştır. Her üç kaynağın parametreleri literatür ışığında belirli aralıklarda değiştirilerek, farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip birleştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların ara kesitinden alınan mikroyapılar, optik mikroskobu ile incelenmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla kaynaklı numunelere; mikrosertlik, çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen kırık yüzeyler, taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenerek, kırılma tipi ve kırık yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veri ve bulgular, ilgili literatür ışığında değerlendirilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

## 4.2. Kaynak Öncesi İşlemler

### 4.2.1. Malzeme

Deneylerde birleştirilecek olan AA7075 ve AA5182 alüminyum alaşımları, Konya Nursan Alüminyum Ltd. Şti. ve Ankara Seykoç Alüminyum A.Ş.'den temin edilmiştir. Temin edilen alaşımların boyutları 210cm x 150cm x 5mm'dir. Bu alaşımlara ait kimyasal bileşimler Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri

| Malzeme | Alaşım Elementleri | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cu | Cr | Fe | Si | Zn | Mn | Mg | Ti | Al |
| AA5182-H111 (EN-14286) | 0,15 | 0,10 | 0,35 | 0,20 | 0,25 | 0,20-0,50 | 4-5 | 0,10 | Kalan |
| AA7075-T6 (EN-14726) | 1,2-20 | 0,18-0,28 | 0,40 | 0,40 | 5,10-6,10 | 0,30 | 2,1-2,9 | 0,20 | Kalan |

AA7075 ve AA5182 alaşımlarına ait mekanik ve fiziksel özellikler ise sırasıyla Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

| Malzeme | Çekem Dayanımı (MPa) | Kopma Uzaması (%) | $R_{0.2}$ Akma Dayanımı (Mpa) | Elastiste Modülü (GPa) | Sertlik (HV) |
|---|---|---|---|---|---|
| AA5182-H111 | 280-350 | 27 | 154 | 69.6 | 71 |
| AA7075-T6 | 580-583 | 10 | 509-513 | 72 | 150 |

**Tablo 4.3.** Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

| Malzeme | Özgül Ağırlık ($g/cm^3$) | Genleşme Katsayısı ($\mu m\ m^{-1}K^{-1}$) | Elektriksel İletkenliği (% 1ACS) | Isıl İletkenlik ($Wm^{-1}K^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| AA5182-H111 | 2710 | 24 | 28 | 123 |
| AA7075-T6 | 2810 | 23,5 | 33 | 134 |

AA7075 ve AA5182 alaşımlarının TIG ve MIG kaynağıyla birleştirilmesinde kullanılan dolgu malzemesinin kimyasal ve mekanik özelikleri Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'te verilmiştir.

**Tablo 4.4.** Deney çalışmasında kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimi

| Tel Alaşımı | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Cr | Ti | Be | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AWS- A5.10 AlMg4.5Mn0.7(A) | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.5-1.0 | 4.3-5.2 | 0.25 | 0.25-0.5 | 0.15 | 0.0003 | Kalan |

**Tablo 4.5.** Deney çalışmasında kullanılan kaynak telinin mekanik özelikleri

| Tel Alaşımı | R0.2 Akma Dayanımı (Mpa) | Çekme Mukavemeti (Mpa) | Uzama (%) |
|---|---|---|---|
| AWS- A5.10 AlMg4.5Mn0.7(A) | 125 | 275 | 17 |

### 4.2.2. Malzemelerin kaynağa hazırlanması ve kaynaklar

Ticari olarak Konya Nursan Alüminyum Ltd. Şti. ve Ankara Seykoç Alüminyum A.Ş.'den, 210cm x 150cm x 5mm boyutlarında temin edilen AA7075 ve AA5182 alüminyum plakaları giyotin makas kullanılarak 80cm x 12cm x 5mm boyutlarında kesilerek TIG, MIG ve FSW kaynakları için uygun boyuta getirilmiştir. TIG ve MIG kaynakları Konya Nursan Alüminyum Ltd. Şti.'de gerçekleştirilmiştir. Kaynaklara başlamadan önce tel çapının belirlenmesi için birtakım ön hazırlıklar yapılmıştır. MIG kaynağında kullanılan telin çapı 1,2 mm olduğunda aynı tel çapı ile TIG kaynağı

yapılamamıştır. Bunun nedeni kaynaklı bağlantıda birleşme sağlanamamasıdır. TIG kaynağında kullanılan telin çapı 4 mm olduğunda kaynak işlemi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Ancak aynı kalınlıktaki tel ile MIG kaynağı yapıldığında kaynak bölgesinde taşmalar ve kaynak dikişlerinde yanmalar gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda MIG kaynağında 1,2 mm çapa, TIG kaynağında ise 4 mm çapa sahip kaynak telleri kullanılmıştır. Her iki kaynak yönteminde kaynak bölgeleri Argon gazı ile korunmuştur. Ayrıca plakaların bütün kaynakları üç pasoda yapılmıştır. FSW kaynakları ise Batman Ek Sanayi Sitesi Yılmazlar Tornada yapılmıştır.

#### 4.2.2.1. TIG kaynakların yapılması

Kaynak öncesi, uygun ebatlar da kesilen AA7075 ve AA5182 alüminyum plakalarına kaynak ağız açma makinesi ile V ve X kaynak ağızları açılmıştır. Daha sonra kaynağın çekileceği plaka ağızları kir ve pas gibi benzeri kaynak kalitesini etkileyebilecek dış etmenlerden temizlenmiştir. Deney parçaların TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde 4mm çapında ve 1m boyunda ER5183 (AW-AlMg4.5Mn0.7A) çubuk biçiminde TIG teli çubuğu kullanılmıştır. TIG kaynakları farklı özeliklere sahip AA7075/AA5182 alüminyum alaşımlarının üç farklı kaynak akımı, iki farklı gaz debisi, iki farklı kaynak ağzı kombinasyonları için toplam 12 adet plaka olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de TIG kaynağının makinesi ve Şekil 4.2'de ise kaynağı yapılmış AA7075/AA5182 plaka gösterilmiştir.



**Şekil 4.1.** TIG kaynak makinesi



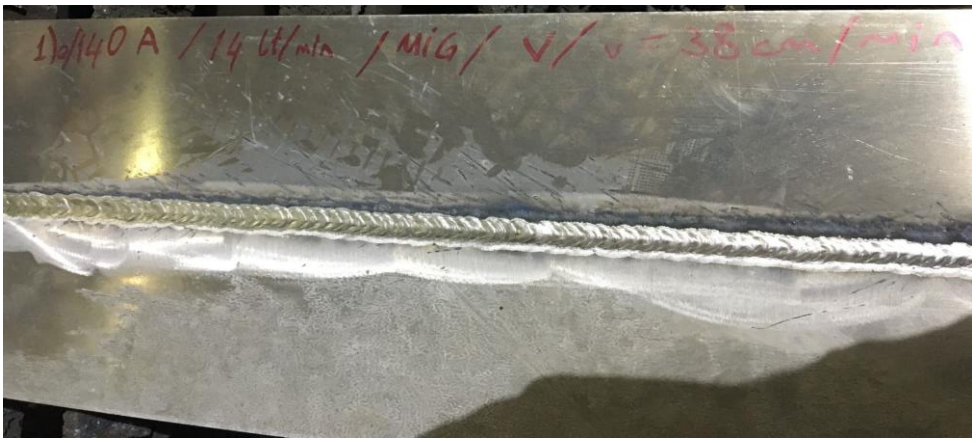
**Şekil 4.2.** TIG kaynağı yapılmış plaka (AA7075/AA5182**)**

### 4.2.2.2. MIG kaynakların yapılması

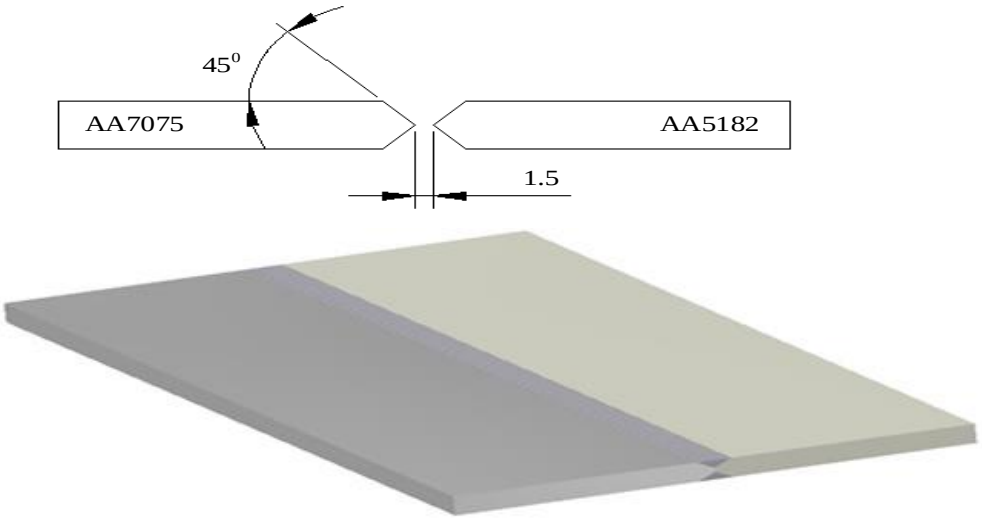
80cm x 12cm x 5mm boyutlarında farklı özeliklere sahip AA7075 ve AA5182 alüminyum alaşımları MIG kaynağında; üç farklı kaynak akımı, iki farklı tel ilerleme hızı ve iki farklı kaynak ağzı kombinasyonları için toplam 12 adet plaka olacak şekilde yapılmıştır. Deney birleştirilmesinde 1,2mm çapa sahip ER5183 (AW-AlMg4.5Mn0.7A) alüminyum alaşım teli kullanılmıştır. Kaynak öncesi işlemler TIG kaynağında olduğu gibi MIG kaynağında da yapılmıştır. Şekil 4.3'te MIG kaynak makinesi, Şekil 4.4'te MIG kaynağı yapılmış AA7075/AA5182 plaka, Şekil 4.5'de TIG ve MIG kaynakların X ve Şekil 4.6'da TIG ve MIG kaynakların V kaynak ağız yapıları gösterilmektedir.



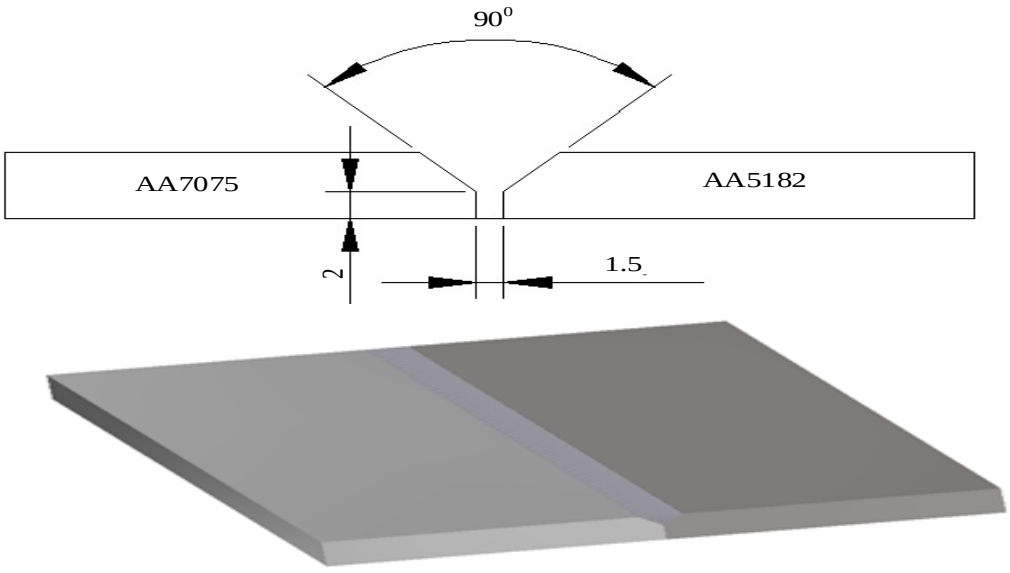
**Şekil 4.3.** MIG kaynak makinesi




**Şekil 4.4.** MIG kaynağı yapılmış plaka (AA7075/5182)



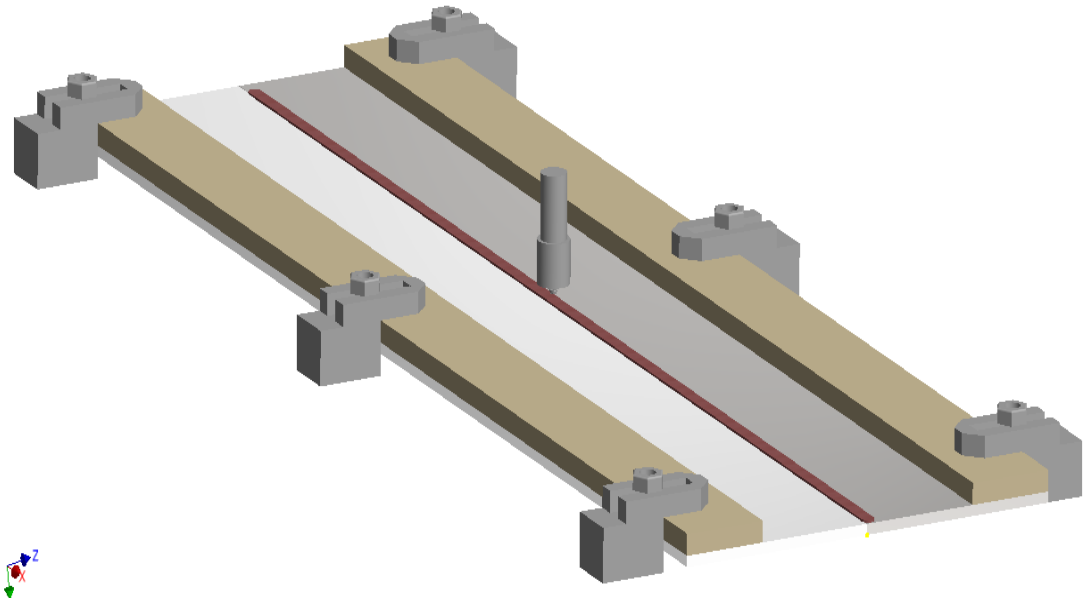

**Şekil 4.5.** TIG ve MIG kaynakların X kaynak ağız yapısı




**Şekil 4.6.** TIG ve MIG kaynakların V kaynak ağız yapısı

#### 4.2.2.3. FSW kaynakların yapılması

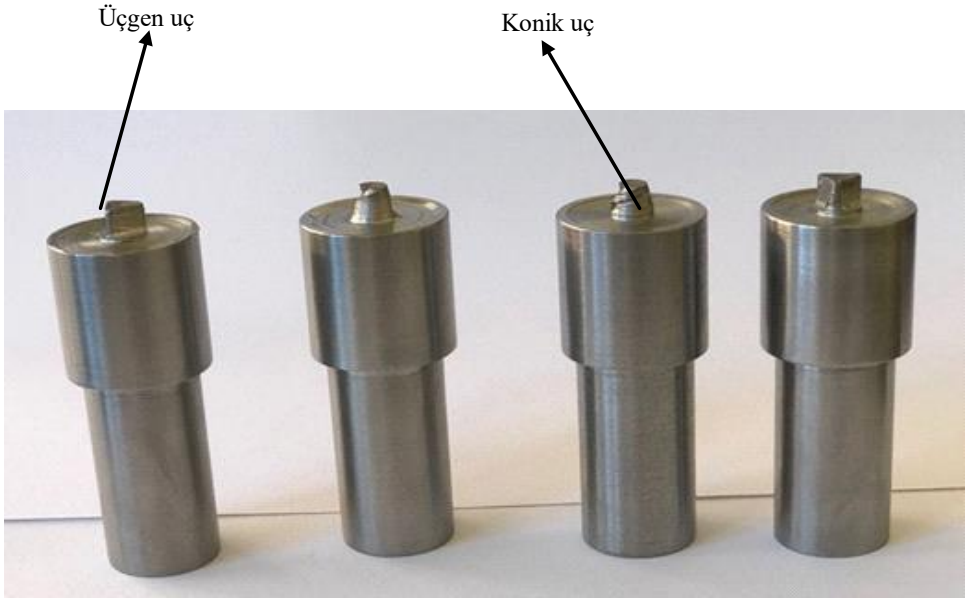
Kaynak işleminden önce, ticari olarak temin edilen plaka halindeki standart alüminyum alaşımlar, freze tezgâhında 80cm x 12cm x 5mm boyutlarında, parmak freze çakısıyla işlenmiştir. Birleştirilecek plakaların alın yüzeyleri, kir, pas ve oksit tabakasından arındırılmıştır. Bu işlemden sonra bütün plakalar, kaynak parametre numarasına göre numaralandırılmıştır. Eşleştirilen plaka çiftlerinin kaynak başlangıç noktasının kılavuz deliği, sütunlu matkap tezgâhına bağlanarak, 2mm çapında ve 2mm derinliğinde açılmıştır. 8mm kalınlıktaki üstlük malzeme düzlem yüzey taşlama tezgâhında yüzeyi taşlanarak, freze tablası üzerine yerleştirilmiştir. Birleştirilecek plakalar bu üstlüklerin altına konduktan sonra Şekil 4.7' deki düzende, bağlama pabuçları yardımıyla sıkıştırılarak kaynak işlemine hazır hale getirilmiştir. Ayrıca freze başlık açısı literatüre uygun olarak $3^0$ alınmıştır.



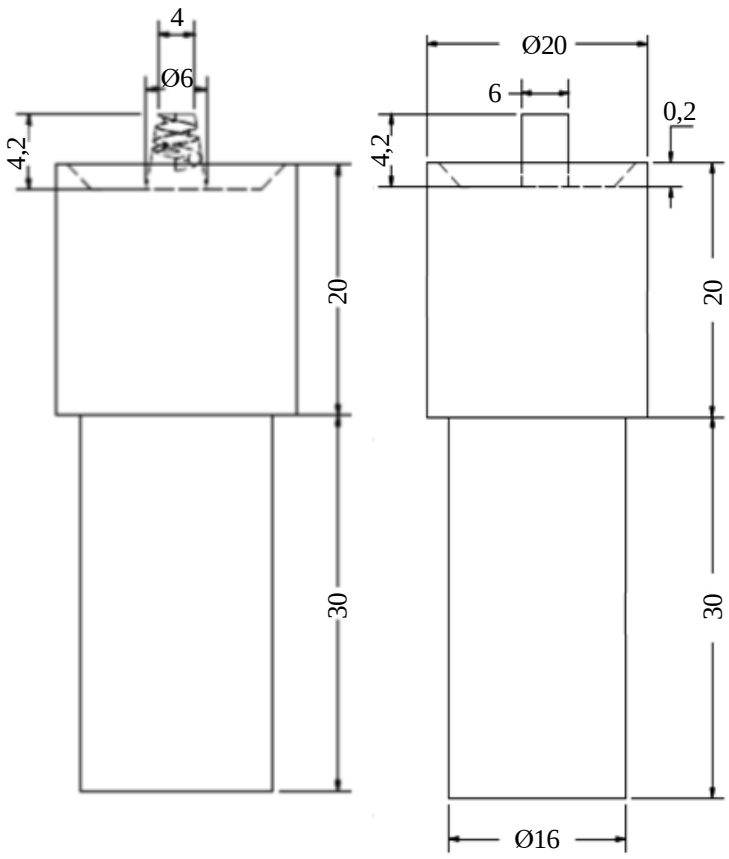
**Şekil 4.7.** Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi

##### 4.2.2.3.1. Karıştırıcı uçların hazırlanması

Sürtünme karıştırma kaynağı ya da kısaca FSW yöntemiyle AA7075/AA5182 alüminyum alaşımları; iki farklı devir sayısı, iki farklı ilerleme hızı ve iki farklı geometriğe sahip uç kombinasyonları kullanılarak birleştirilmiştir. Karıştırma kaynaklarında kullanılan karıştırıcı uçlar, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi K100 çelik malzemesinden üçgen ve konik olmak üzere iki farklı geometride imal edilmişlerdir. Şekil 4.9'da üretilen uçlara ait teknik resim verilmiştir. İmal edilen uçlara kaynak işlemi için mukavemet kazandırmak amacıyla ısıl işlem uygulanmıştır.




**Şekil 4.8.** FSW Deneysel çalışmasında kullanılan karıştırıcı uçlar



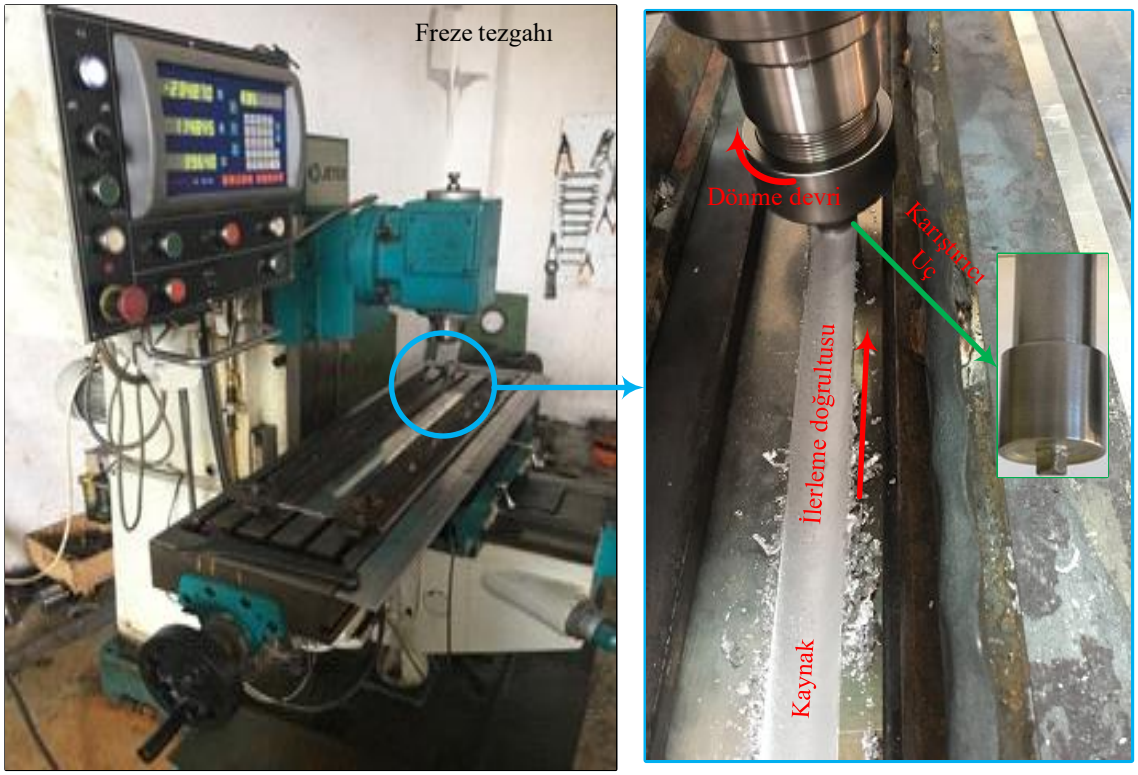

**Şekil 4.9.** FSW kaynağında kullanılan karıştırıcı uç boyutları

#### 4.2.2.3.2. FSW kaynağın uygulanması

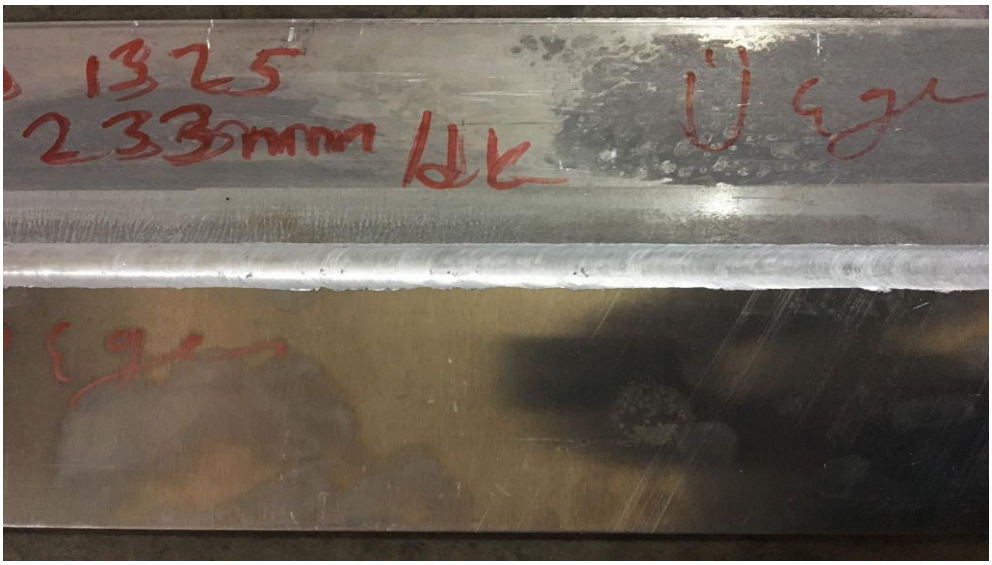
FSW yöntemi ile kaynak işleminde, JVHM-4 320x1320 marka 5,39 kW motor gücüne sahip konsol tipi üniversal başlıklı freze tezgâhı kullanılmıştır. Freze tezgâhı,

yarı otomatik X, Y, Z koordinatlarına sahip olup 20-1800 dev/dk dönme devirlerinde iki farklı dönme yönünde ve 20-360 mm/dk ilerleme hızında çalışmaktadır.

Birleştirilmek üzere eşleştirilen AA5182 ve AA7075 plakalar, alın alına Şekil 4.10'daki düzende, tezgâh tablası üzerine sabitlenmiştir. Freze tezgâhı tablası üzerine yerleştirilen plakaların birleşme hattı ile karıştırıcı ucun paralelliği, kaynak işlemine başlamadan önce kontrol edilmiştir. Başlangıç noktasına getirilen karıştırıcı uç, kılavuz deliğe oturacak biçimde ayarlandıktan sonra freze tezgâhı devir ve ilerleme ayarları yapılmıştır. Sonra tezgâh saat yönünde çalıştırılarak ucun Z yönünde parçaya 0.2mm omuz batma derinliğinde daldırılmıştır. Bu konumda yaklaşık 1 dakika beklenerek karıştırıcı ucun omuz bölgesinin plakaları ısıtması sağlanmıştır. Sürtünme sıcaklığı sağlandıktan sonra, tezgâhın otomatik ilerleme hızında birleşme çizgisi boyunca ilerlemesi sağlanmış ve plakaların bitim noktasına yakın kaynak işlemi tamamlanmıştır. Böylece 5mm kalınlığındaki plakalar, pim uzunluğu 4,2mm olan karıştırıcı uç kullanılarak birleştirilmiştir. Şekil 4.10'da FSW kaynağının uygulanışı ve Şekil 4.11'de karıştırıcı uçlar ile yapılan deneylerden elde edilen bir plaka örneği gösterilmiştir.




**Şekil 4.10.** FSW kaynağının uygulanışı



**Şekil 4.11.** FSW yönteminde karıştırıcı uçlar ile yapılan denelerden elde edilen bir plaka

## 4.3. Kaynak Parametreleri ve Tasarımı

TIG, MIG ve FSW kaynaklarında kullanılan parametreler Tablo 4.6, Tablo. 4.7 ve Tablo 4.8'de sırasıyla verilmiştir.

**Tablo 4.6.** TIG kaynağında kullanılan parametreler

| Malzeme | Akım(amper) | Gaz Debisi (lt/dk) | Kaynak Ağzı |
|---|---|---|---|
| AA7075/AA5182 | 130 | 12 | V/X |
| | | 17 | V/X |
| | 140 | 12 | V/X |
| | | 17 | V/X |
| | 150 | 12 | V/X |
| | | 17 | V/X |

❖ **TIG kaynağında torç ilerleme hızı: 12 cm/dk**

**Tablo 4.7.** MIG kaynağında kullanılan parametreler

| Malzeme | Akım(amper) | Tel İlerleme Hızı (cm/dk) | Kaynak Ağzı |
|---|---|---|---|
| AA7075/AA5182 | 130 | 38 | V/X |
| | | 45 | V/X |
| | 140 | 38 | V/X |
| | | 45 | V/X |
| | 150 | 38 | V/X |
| | | 45 | V/X |

❖ **MIG kaynağında gaz debisi: 12 lt/dk**

**Tablo 4.8**. FSW yönteminde kullanılan uç profilleri ve kaynak parametreleri

| Malzeme | Karıştırıcı Uç Profili | Dönme Devri(dev/dk) | İlerleme Hızı(mm/dk) |
|---|---|---|---|
| AA7075/AA5182 | Konik | 980 | 108 |
| | | | 233 |
| | | 1325 | 108 |
| | | | 233 |
| | | 1800 | 108 |
| | | | 233 |
| | Üçgen | 980 | 108 |
| | | | 233 |
| | | 1325 | 108 |
| | | | 233 |
| | | 1800 | 108 |
| | | | 233 |

TIG, MIG ve FSW yöntemleri kullanılarak kaynak edilmiş plakalardan çıkarılan çekme, yorulma, metalografik inceleme ve sertlik taraması numuneleri, belirli bir sistematik oluşturularak kodlanmışlardır. Bu kodlama sistemi TIG, MIG ve FSW yöntemleri için Tablo 4.9-Tablo 4.11'de sırasıyla belirtilmiştir.

**Tablo 4.9.** TIG kaynaklı numunelerin kodlama sistemi

| Kaynak | Akım (Amper) | Gaz Debisi (lt/dk) | Kodlama |
|---|---|---|---|
| TIG-V | 130 | 12 | $Tv_{12}13$ |
| | 140 | 12 | $Tv_{12}14$ |
| | 150 | 12 | $Tv_{12}15$ |
| | 130 | 17 | $Tv_{17}13$ |
| | 140 | 17 | $Tv_{17}14$ |
| | 150 | 17 | $Tv_{17}15$ |
| TIG-X | 130 | 12 | $Tx_{12}13$ |
| | 140 | 12 | $Tx_{12}14$ |
| | 150 | 12 | $Tx_{12}15$ |
| | 130 | 17 | $Tx_{17}13$ |
| | 140 | 17 | $Tx_{17}14$ |
| | 150 | 17 | $Tx_{17}15$ |

**Tablo 4.10.** MIG kaynaklı numunelerin kodlama sistemi

| Kaynak | Akım (Amper) | Tel İlerleme Hızı (cm/dk) | Kodlama |
|---|---|---|---|
| MIG-V | 130 | 38 | $Mv_{38}13$ |
| | 140 | 38 | $Mv_{38}14$ |
| | 150 | 38 | $Mv_{38}15$ |
| | 130 | 45 | $Mv_{45}13$ |
| | 140 | 45 | $Mv_{45}14$ |
| | 150 | 45 | $Mv_{45}15$ |
| MIG-X | 130 | 38 | $Mx_{38}13$ |
| | 140 | 38 | $Mx_{38}14$ |
| | 150 | 38 | $Mx_{38}15$ |
| | 130 | 45 | $Mx_{45}13$ |
| | 140 | 45 | $Mx_{45}14$ |
| | 150 | 45 | $Mx_{45}15$ |

**Tablo 4.11.** FSW kaynaklı numunelerin kodlama sistemi

| Kaynak | Dönme Devri (dev/dk) | İlerleme Hızı (mm/dk) | Kodlama |
|---|---|---|---|
| FSW-Konik | 980 | 108 | $FSW_{k1}09$ |
| | 1325 | 108 | $FSW_{k1}13$ |
| | 1800 | 108 | $FSW_{k1}18$ |
| | 980 | 233 | $FSW_{k2}09$ |
| | 1325 | 233 | $FSW_{k2}13$ |
| | 1800 | 233 | $FSW_{k2}18$ |
| FSW-Üçgen | 980 | 108 | $FSW_{u1}09$ |
| | 1325 | 108 | $FSW_{u1}13$ |
| | 1800 | 108 | $FSW_{u1}18$ |
| | 980 | 233 | $FSW_{u2}09$ |
| | 1325 | 233 | $FSW_{u2}13$ |
| | 1800 | 233 | $FSW_{u2}18$ |

## 4.4. Kaynak Sonrası Yapılan Muayeneler

### 4.4.1. Metalografik incelemeler

Optik mikroskop incelemeleri için kaynak işlemi öncesi ve sonrasında ana malzemeden ve kaynak bölgesinden numuneler çıkartılmıştır. Presi marka Manuel Mecatome T260 kesme cihazı kullanılarak bütün bağlantılardan birleşme hattına dik yönde, her parametre için 30 mm genişliğinde numuneler kesilmiştir. Bu numunelerin

iki yüzeyi; sırasıyla 220, 400, 800 ve 1200 gritlik zımparalar kullanılarak parlatılmıştır. Daha sonra 3 mikronluk elmas pasta ile malzemelerin son parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemleri Presi marka Minitech 233 parlatma cihazında yapılmıştır. Şekil 4.12'de metalografik incelemelerin yapılması için kullanılan kesme ve parlatma cihazları verilmiştir.




Numune kesme cihazı Parlatma cihazı

**Şekil 4.12.** Numunelerin hazırlanmasında kullanılan cihazlar

Parlatılan numuneler 6 ml nitrik asit, 2 ml HF ve 92 ml saf sudan oluşan Kroll dağlayıcı çözeltisi içine 55-75 saniye süreyle daldırılarak numune yüzeyi dağlanmıştır. Böylece birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kaynak bölgesinde birbirinden farklı tanımlanan bölgeler üzerinden SEM ve EDS analizleri alınarak bu bölgelerin hangi alaşıma ait olduğu belirlenmiştir. SEM ve EDS analizi JSM-6510 görüntüleme cihazında yapılmıştır (Şekil 4.13). Ayrıca bu cihazda çekme deneyleri sonucu oluşana kırılma yüzeyleri de incelenmiştir.



**Şekil 4.13.** SEM ve EDS analizlerinin gerçekleştirildiği cihaz

### 4.4.2. Mikrosertlik incelemeleri

Bir malzemenin sertliği, kendisinden daha sert bir malzemeye karsı gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve malzemenin deformasyon davranışı için ölçüdür (Bilgin, 2007). Bundan dolayı kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesinin sertlik değerlerini elde etmek için, metalografik incelemelerde olduğu gibi kaynak yönüne dik doğrultuda kesilen ve parlatılan numunelerin sertliği belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri Şekil 4.14'te verilen Shimadzu HMV mikrosertlik ölçüm cihazıyla yapılmıştır.



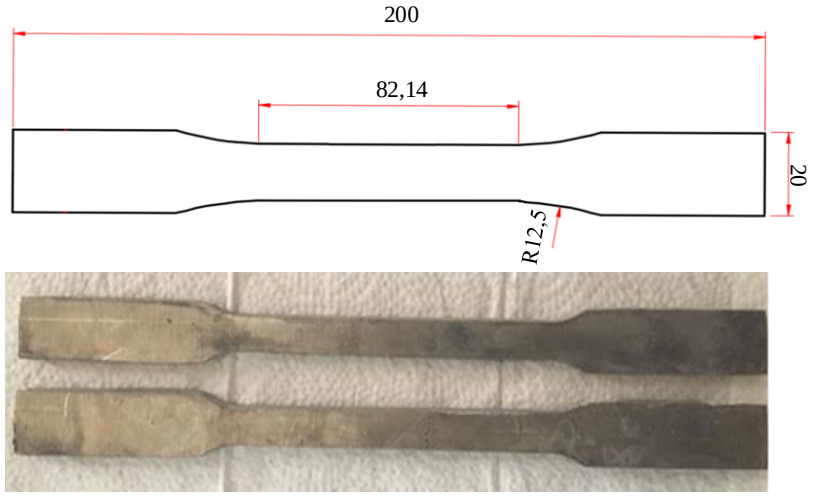
**Şekil 4.14.** Sertlik ölçüm cihazı

Bu çalışmada, kaynaklı bağlantıların tek taraflı yüzeyleri üzerinden 1mm'lik aralıklarla mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde; numunelere, 1N yük uygulanmış ve Vickers ($HV_{0.1}$) sertlik ölçüm birimi kullanılmıştır. Daha sonra bu değerler bilgisayar ortamına aktarılarak mikrosertlik grafikleri çizilmiştir.

### 4.4.3. Çekme deneyleri

Çekme deneyi; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarının (mekanik özeliklerinin) belirlenmesi, mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması ve malzeme seçimi amacıyla yapılır. Bu yöntemde çoğu kez silindirik bazen de belirli bir geometrik kesite sahip numuneler, sürekli artan bir statik çekme zorlanmasına maruz bırakılarak numunenin çekmeye karşı gösterdiği dayanım araştırılır. Bu test sonucunda malzemenin elastiklik modülü, akma dayanımı, en yüksek çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri tespit edilebilmektedir (Savaşkan, 1999).

Kaynaklı bağlantıların maksimum gerilme değerlerini belirlemek için levhalara, çekme testi uygulanmıştır. Çekme numuneleri ASTM E8 standardına uygun olarak Şekil 4.15'te görüldüğü gibi kaynaklı plakalar üzerinden kaynak yönüne dik doğrultuda plazma kesimi yapılmıştır.




**Şekil 4.15.** Plazmadan kesilen ve AutoCAD'ten çizilen ASTM-E8 çekme numunesi

Çekme deneyleri; Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 4.16'da gösterilen 250000 N yük kapasitesine sahip SHMADZU marka çekme test cihazında 1mm/dk sabit ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre için 3 kez tekrarlanan çekme testinde ortalama çekme dayanımı belirlenerek hata payı minimize edilmiştir.



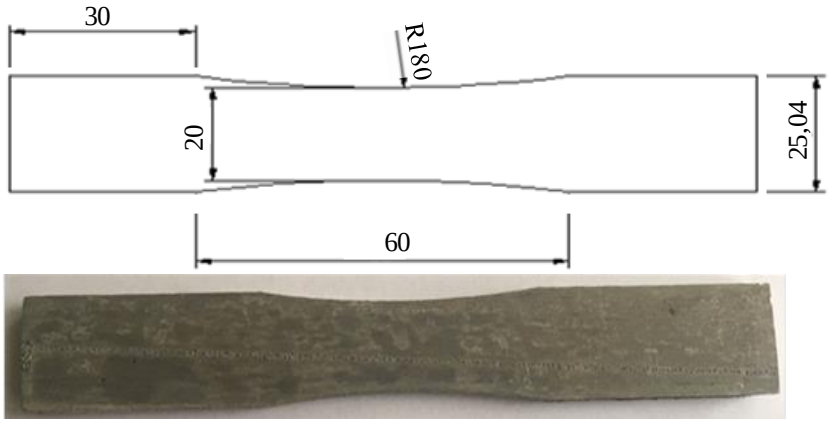

**Şekil 4.16.** Çekme deney cihazı

### 4.4.4. Yorulma deneyleri

Pek çok makine parçası ve yapı elemanı, kullanımı esnasında tekrarlı yüklere ve titreşimlere maruz kalacak şekilde çalışmaktadırlar. Tekrarlı yükler altında çalışan makine parçalarında, gerilmeler parçanın statik dayanımından daha küçük olmasına rağmen, belirli bir yük tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeylerinde bir çatlama ile başlayıp ve devamında kopma ile sonuçlanan bir olay görülür. Bu tür yüklenmeler sonunda kopma olayı, yorulma dayanım sınırı aşıldığında ortaya çıkmaktadır. Yorulma dayanım sınırı ya da yorulma dayanım ömrü konusunda yapılan araştırmalar özellikle kaynaklı birleştirme tekniği endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Alsaran, 1997).

Yorulma olayı ilk olarak 1829 yılında demir zincirleri üzerinde tekrarlı yüklerin etkisini araştıran Alber tarafından incelenmiştir. Yorulma dayanım araştırmaları ya da bugünkü bilinen adıyla S-N diyagramları da August Wöhler tarafından bulunmuştur (Alsaran, 1997; Karcı, 2002; Kalafat, 2001; Reyes, 2007).

Kaynaklı bağlantıların yorulma ömürlerini belirlemek amacıyla plakalardan kaynak yönüne dik doğrultuda, ASTM E466 standartlarına uygun numuneler hazırlanmıştır. Yorulma numunesinin teknik resim ölçüleri Şekil 4.17'de verilmiştir.




**Şekil 4.17.** Plazmadan kesilen ve AutoCAD'ten çizilen ASTM-E466 yorulma numunesi

Numuneler daha sonra Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Test Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka yorulma test cihazında (Şekil 4.18) numunelere eksenel gerilme şartlarında, genlik oranı $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}=0,1$ olacak şekilde çekme/çekme yorulma testi uygulanmış ve Wöhler diyagramları elde edilmiştir. Bütün testler için işlem frekansı 10 Hz olarak belirlenmiş ve tüm bağlantılara eksenel sinüzoidal yüklemeye tabi tutulmuştur.




**Şekil 4.18.** Yorulma deney cihazı

Mühendislik yorulma deney verilerinin değerlendirilmesi, "N" çevrim sayısına karşılık gelen "S" gerilmesi işaretlenerek yapılır. N için daima logaritmik taksimat kullanılır. İşaretlenen gerilme değeri, ortalama gerilme ($\sigma_m$), maksimum gerilme($\sigma_{max}$) veya minimum gerilme ($\sigma_{min}$) olabilir. S-N ilişkileri, ortalama gerilme ($\sigma_m$), gerilme oranı (R) ya da gerilme genliği ($\sigma_a$) olarak tanımlanır (Kalafat, 2001). Bu çalışmada S/N diyagramları, logaritmik N tabanındaki çevrim sayılarının, S gerilme genliğine ($\sigma_a$) karşılık değerleri elde edilmiştir. İlk numuneler düşük çevrimli ve çekme gerilmesinin 3/4'üne isabet eden gerilmelerde başlatılarak, malzemelere plastik deformasyon bölgesinde gerilmeler uygulanmıştır. Buradan elde edilen verilere göre yorulma test cihazının kalibrasyonu yapılarak geri kalan numunelerin tamamına elastik sınır içerisinde sünek malzemeler için tercih edilen yüksek çevrimli ($10^6$) yorulma deneyi uygulanmıştır. Yorulma testlerinde çevrim şartları için herhangi bir limit belirlenmeden, bütün numunelerin kırılma şartlarına kadar mekanik testleri devam ettirilmiştir. Fakat bazı numunelerde kırılma olmadığından ve çevrim $1x10^6$ sınır değerini aştığı için deneyler bitirilmiştir. Ayrıca yapılan yorulma deneylerinde bir değer için 5 numune esas alınarak deneyler yapılmıştır.

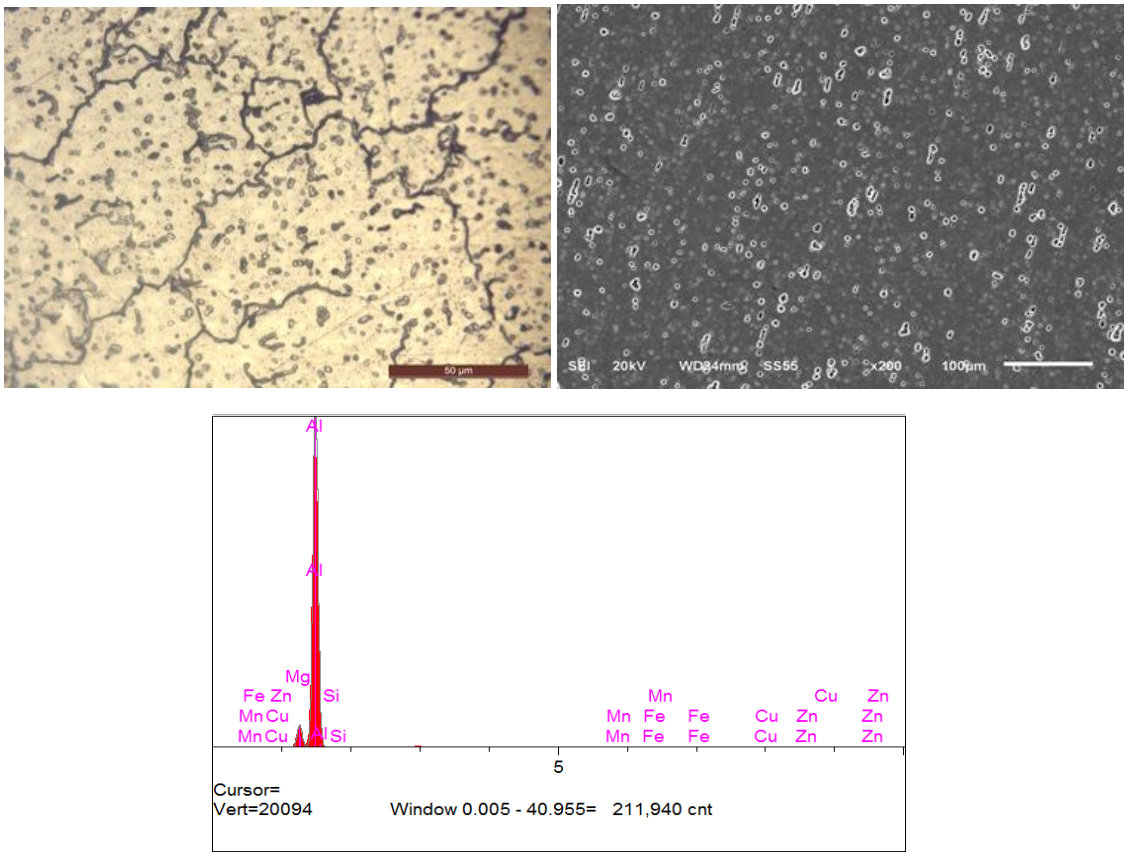
# 5. DENEY SONUÇLARIN İRDELENMESİ

## 5.1. Kaynaklı Bağlantıların Makro ve Mikroyapıların Değerlendirilmesi

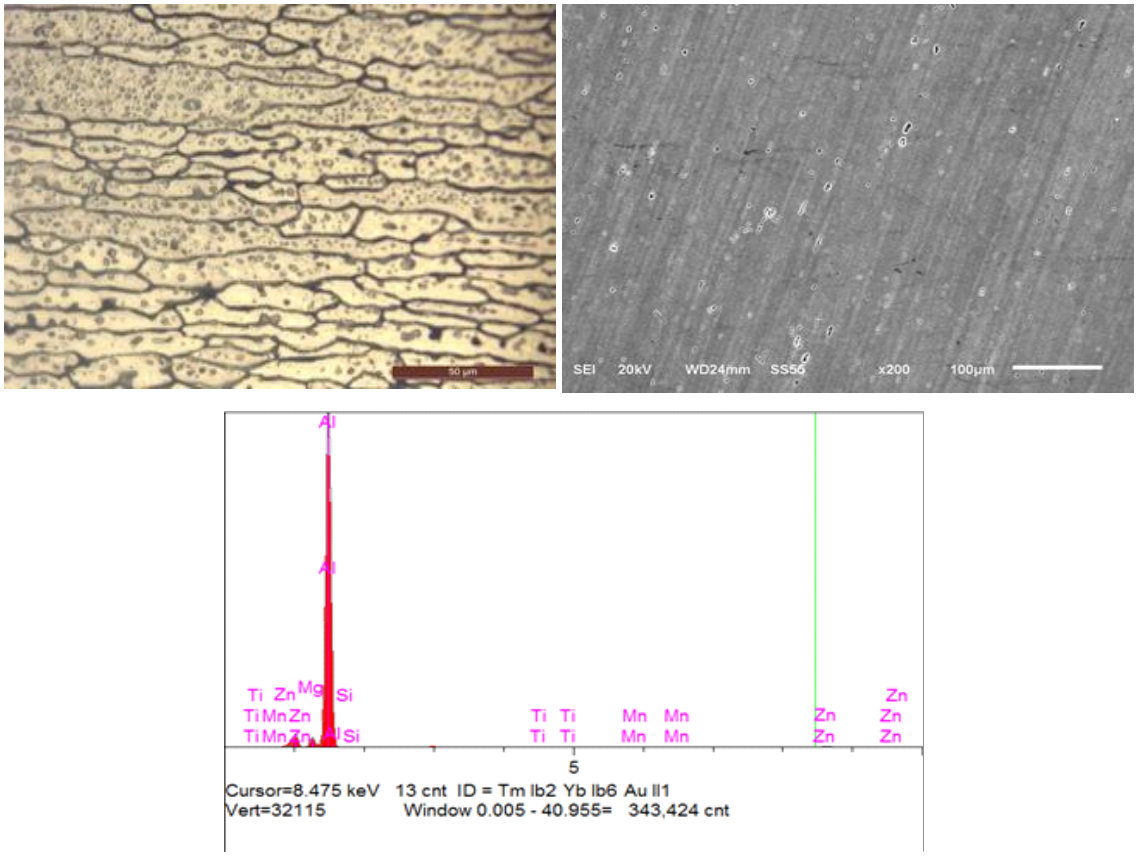
TIG, MIG ve FSW kaynak yöntemleri kullanılarak birleşimi yapılan AA7075 ve AA5182 plaklardan çıkarılan numunelerin, kaynak bölgesi üzerindeki metalografik yapısı detaylı bir biçimde incelenmiştir. TIG, MIG ve FSW kaynaklı bağlantılarda, Esas Metal (EM), IEB ve Kaynak Metali (KM) bölgelerinden oluşan yapılar, makro ve mikroboyutta incelenmiştir. Mikroboyut için 4x, 10x ve 40x büyütme oranlarına sahip optik mikroskop ile SEM kullanılmıştır. Her üç kaynağın en iyi ve en kötü mukavemet gösteren numuneleri için makro ve mikroyapıları ayrı ayrı ele alınarak incelenmiştir.

### 5.1.1. AA5182 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının yapısı

Kaynaklı bağlantıların mikroyapısı hakkında ayrıntılı yorumlar yapabilmek için ana malzemelerin mikroyapılarının bilinmesi gerekmektedir. Şekil 5.1'de AA5182 alaşımına ve Şekil 5.2'de ise AA7075 alaşımına ait optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile EDS analizleri verilmiştir.




**Şekil 5.1.** AA5182'in optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile EDS analizleri

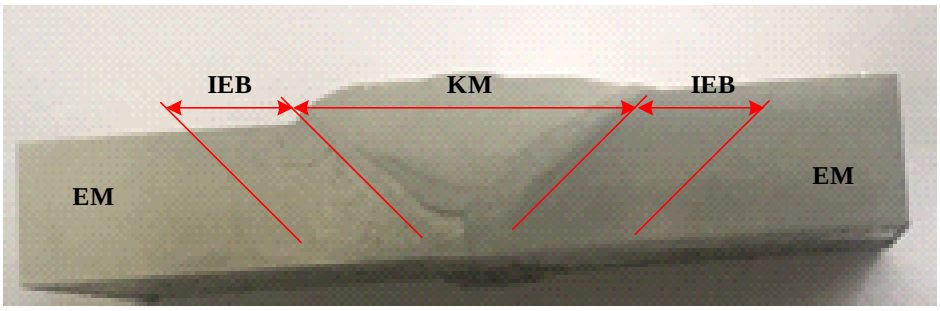



**Şekil 5.2.** AA7075'in optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile EDS analizleri

Şekil 5.1'deki optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde AA5182 alaşımının mikroyapısında haddeleme hatlarının gözlemlenmediği ve yapısının ince taneli homojen çökelti dağılımlı olduğu görülmüştür. Ayrıca EDS analizlerinde alaşımda farklı elementlerin olduğu ve ana alaşım elementi olan Al'den sonra ikinci alaşım elementi olarak Mg'nin olduğu görülmektedir. Şekil 5.2'deki optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde ise AA7075 alaşımında haddeleme hatları belirgin bir şekilde görülmektedir. Alaşımdaki tane yapısı haddeleme yönünde uzamıştır. EDS analizinde ise ana alaşım elementinin Al ve Zn olduğu görülmektedir.

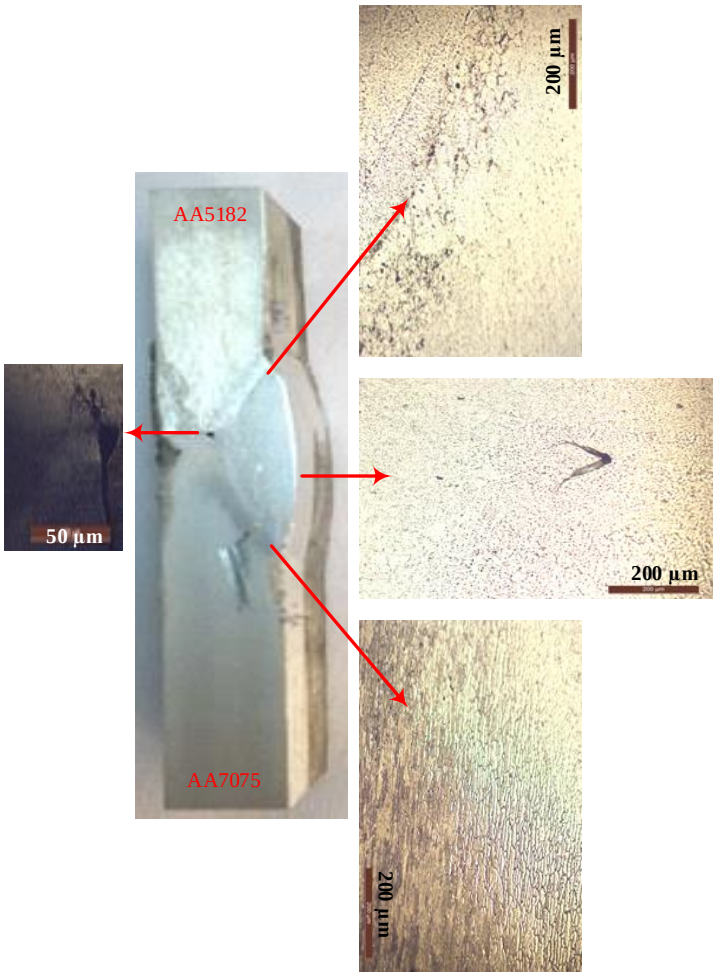
### 5.1.2. TIG kaynaklı bağlantıların yapısı

TIG kaynaklı bağlantıların makro ve mikroyapıları incelemelerinde kaynak bölgelerinde üç farklı bölgenin varlığı belirlenmiştir. Bu bölgeler: EM, IEB ve KM olarak mikroyapı karakteristiğine bağlı olarak adlandırılmış olup Şekil 5.3.'te makro görüntü üzerinde gösterilmiştir.




**Şekil 5.3.** TIG kaynağı ile birleştirilen numunelerin kaynak kesitinde oluşan bölgeler

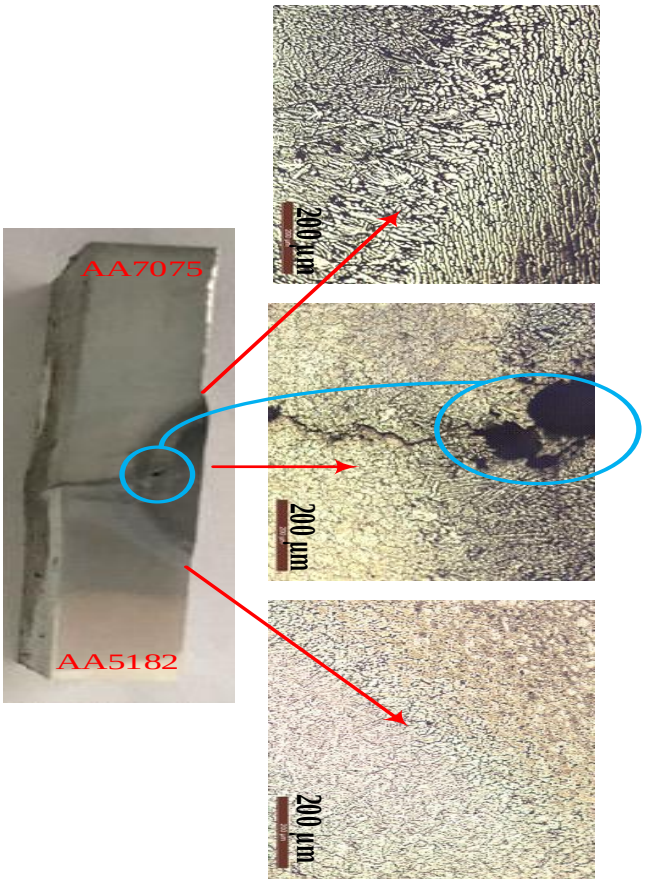
EM'nin mikroyapısı ana alaşım elementlerinin mikroyapısını yansıtmaktadır. KM açık renkte olup IEB, KM'ye göre daha koyu renktedir ve mikroyapısında oldukça fazla çökelti (sığ yapı) mevcuttur. KM ve IEB geçiş bölgesi keskin ergime çizgisine sahip makroyapılarda da ortaya çıkmış olup bu bölgedeki mikroyapı geçişi de açık ve koyu renk tonlarındadır. TIG kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş numunelerine ait makro ve mikroyapı görüntüleri Şekil 5.4-Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



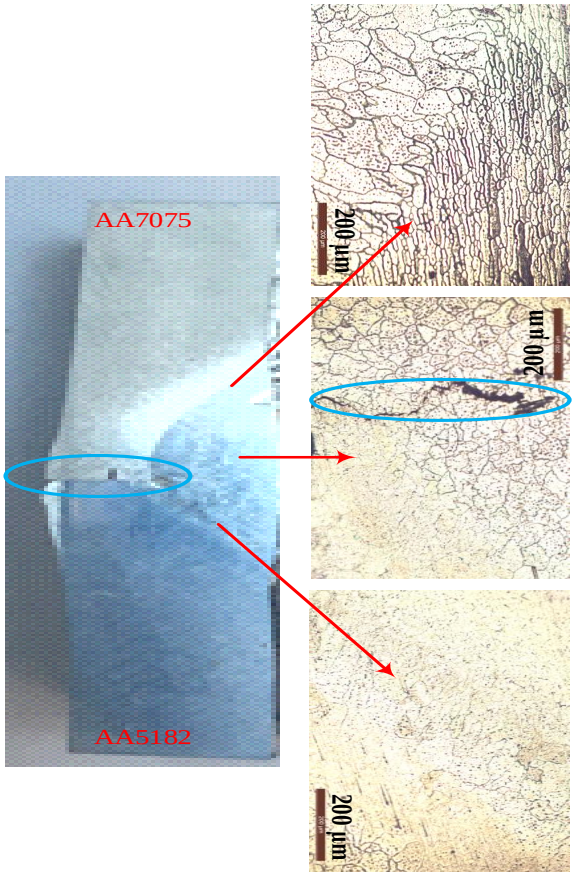

**Şekil 5.4.** $Tv_{12}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



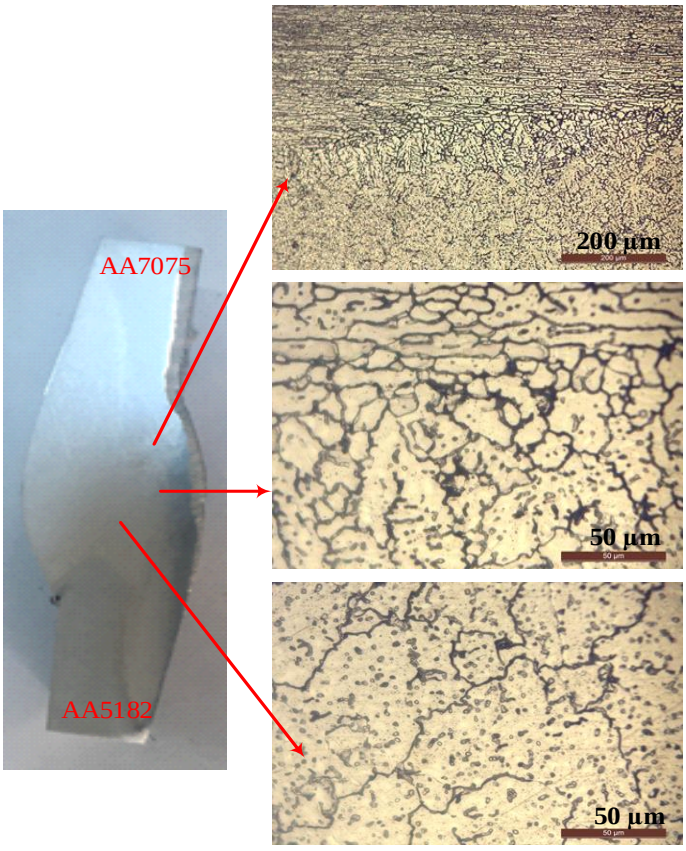

**Şekil 5.5.** $Tv_{12}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



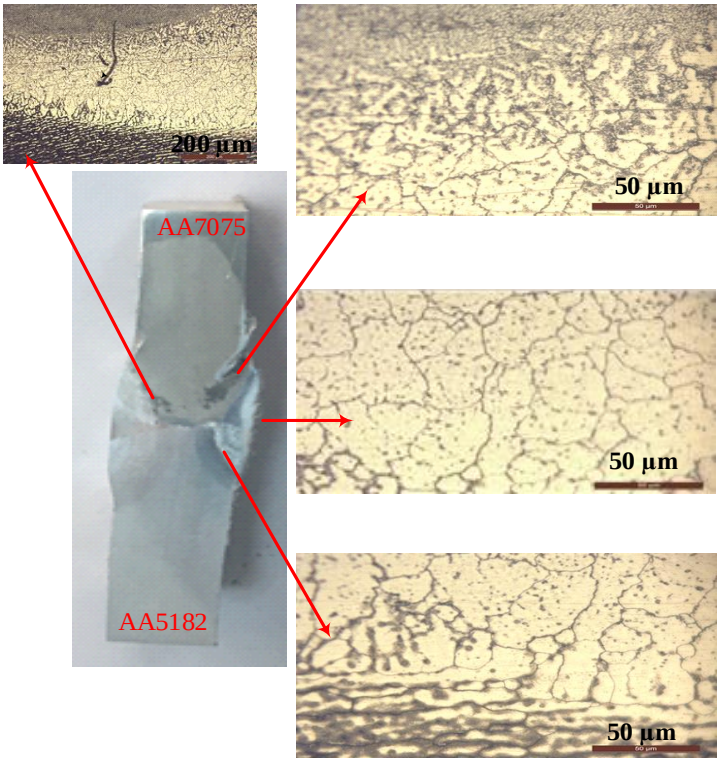

**Şekil 5.6.** $Tv_{17}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



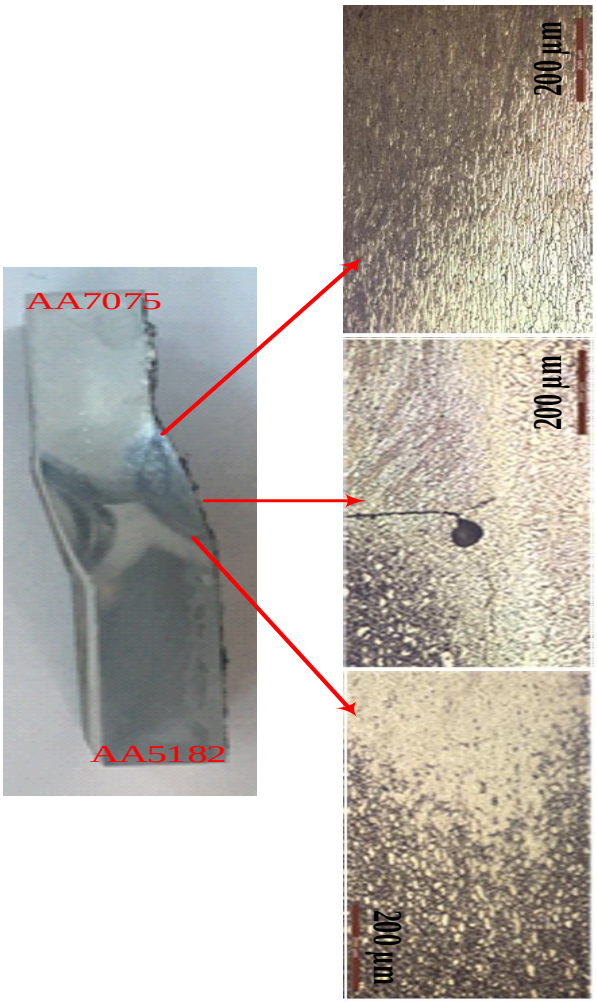

**Şekil 5.7.** $Tv_{17}14$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



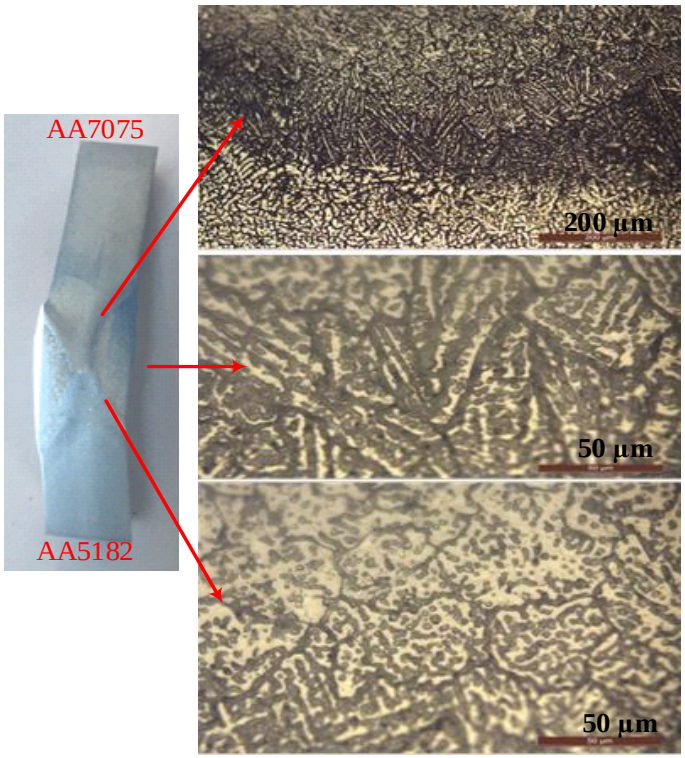

**Şekil 5.8.** $Tx_{12}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.9.** $Tx_{12}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.10.** $Tx_{17}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.11.** $Tx_{17}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar

Şekil 5.4-Şekil 5.7'de TIG kaynağında V kaynak ağzı açılarak birleştirilen numunelerin görüntüleri incelendiğinde, kullanılan $Tv_{12}13$ kodlu numunede, AA7075 ve AA5182 alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan kaynak akımı (130 A), kaynaklı bağlantının kök bölgesinde yeterince nüfuziyet sağlamamasına neden olmuştur. Bu eksiklik özellikle alaşımların kök bölgesinde boşluk oluşumunu tetiklemiştir. $Tv_{12}15$ kodlu numunede kullanılan akım (150 A), $Tv_{12}13$ numunesinden daha yüksek olduğu için AA7075 ve AA5182 alaşımlarının kaynak kök bölgesinde oldukça kaliteli bir kaynak dikişi elde edilmesine katkı sağlamıştır. $Tv_{17}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılara bakıldığında ise artan gaz debisi ile kök pasosunun yüz pasosu ile birleştiği bölgede, bağlantı boyunca kaynağın oldukça kötü elde edildiği ve kaynak kök bölgesinde yanık şeklinde gözenekliklerin oluştuğu görülmektedir. Bu durumun $Tv_{12}15$ kodlu numunenin makro ve mikroyapısında oluşmadığını göz önüne alındığında, kaynak akımı ile gaz debisinin uyumsuzluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. $Tv_{17}14$ kodlu numunede ise kaynak kök yapısında gözenekliliğe rastlanmadığı, AA5182 alaşımı ile iyi bir ergime geçiş bağlantının sağlandığı; fakat AA7075 alaşımı ile geçiş bağlantısında simetrik olmayan iri yapıların oluştuğu görülmüştür.

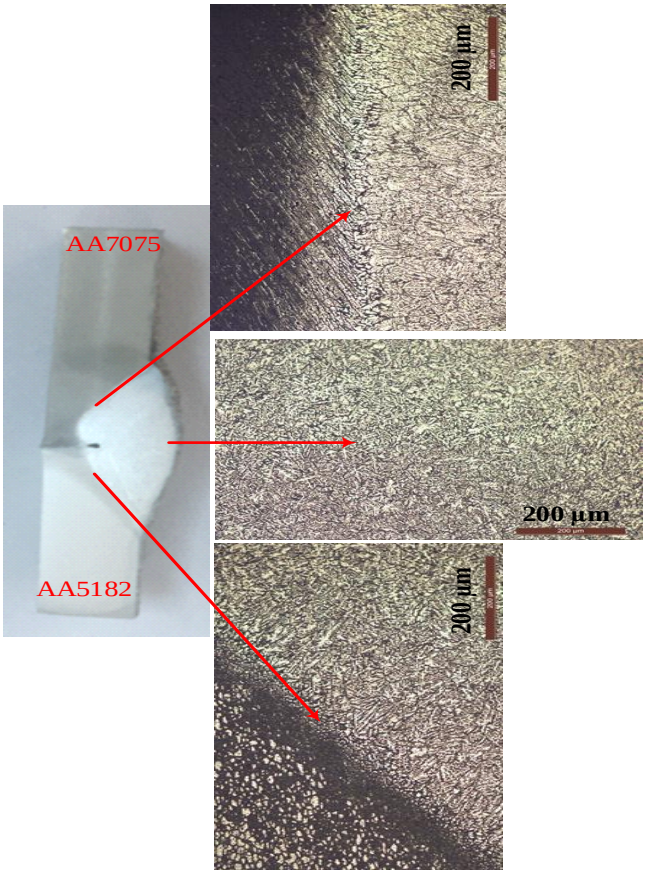
Şekil 5.8-Şekil 5.11'de TIG kaynağında X kaynak ağzı açılarak birleştirilen AA7075 ve AA5182 alaşımlarının makro ve mikroyapıları incelendiğinde V kaynak

kök yapısında oluşan gözenekliklerin oluşmadığı görülmüştür. $Tx_{12}13$ kodlu numunesinin makroyapısında seçilen akım ve gaz debisinin uyumsuzluğundan dolayı kaynaklı bağlantılarda aşırı çarpılmalar oluşmuştur. Bu çarpılmalar $Tx_{12}15$, $Tx_{17}13$ kodlu numunelerde de görülse de $Tx_{12}13$ kodlu numunedeki kadar olmamıştır. $Tx_{17}15$ kodlu numune ise diğer numunelere göre daha simetrik ve kaliteli çift taraflı bir kaynak dikişi elde edilmiştir. Çarpılmaların aşırı gözlemlendiği parçalarda 200 µm boyutta görüntü alınamamıştır. Bu doğrultuda bunlar 50 µm boyutta büyütme ile incelenmiştir. Ancak 50 µm büyütmede geçiş bölgeleri 200 µm büyütmedeki kadar belirgin görülmemiştir.

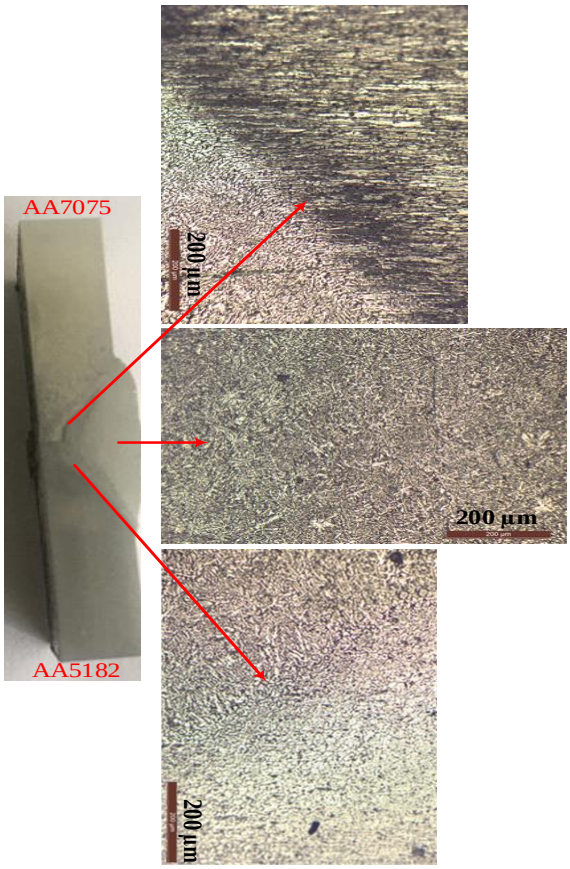
Hem V hem de X kaynak ağzı açılarak birleştirilen numunelerde, AA7075 alaşımın geçiş bölgelerinde AA5182 alaşımına göre daha belirgin bir ergime çizgisi oluşmuştur. Makroyapılarda, kaynak dikişinde oluşan gözeneklilik, kullanılan TIG kaynak telinin ve koruyucu gazın, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında neden olabileceği normal bir durumdur (Mathers 2002). Özellikle V kaynağında elde edilen mikroyapılardaki gözenekli yapıların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir. Ayrıca TIG kaynağında IEB bölgesi, genel olarak AA7075 alaşım malzemesine göre AA5182 alaşım malzemesinde daha büyük alanda gözlemlenmiştir.

### 5.1.3. MIG kaynaklı bağlantıların yapısı

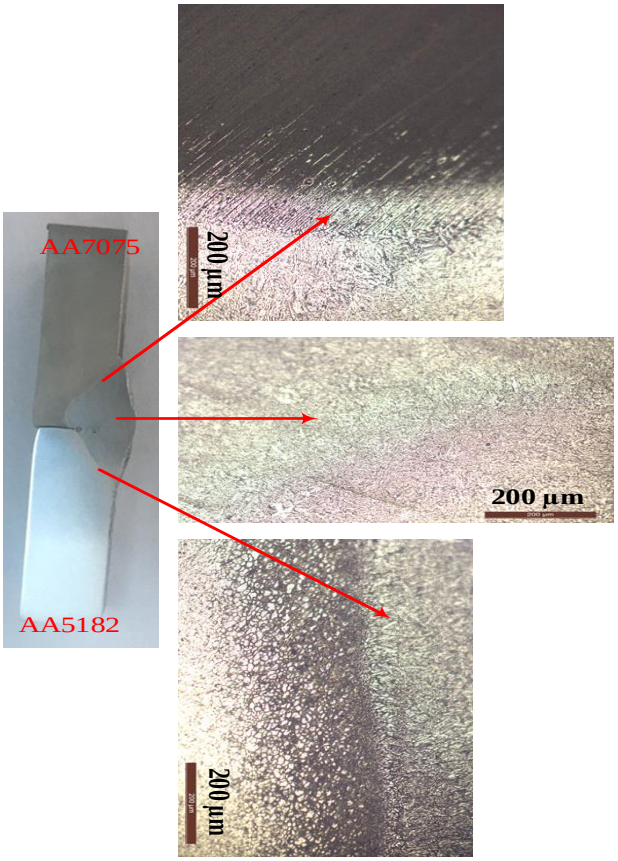
TIG kaynağında olduğu gibi MIG kaynağında da EM, IEB ve KM olarak adlandırılan bölgeler bulunmaktadır (Şekil 5.3). Farklı kaynak parametrelerinin MIG kaynağı ile birleştirilmesinde bu bölgelerin nasıl değiştiği oldukça önemlidir. MIG kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş numunelerine ait makro ve mikroyapı görüntüleri Şekil 5.12-Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



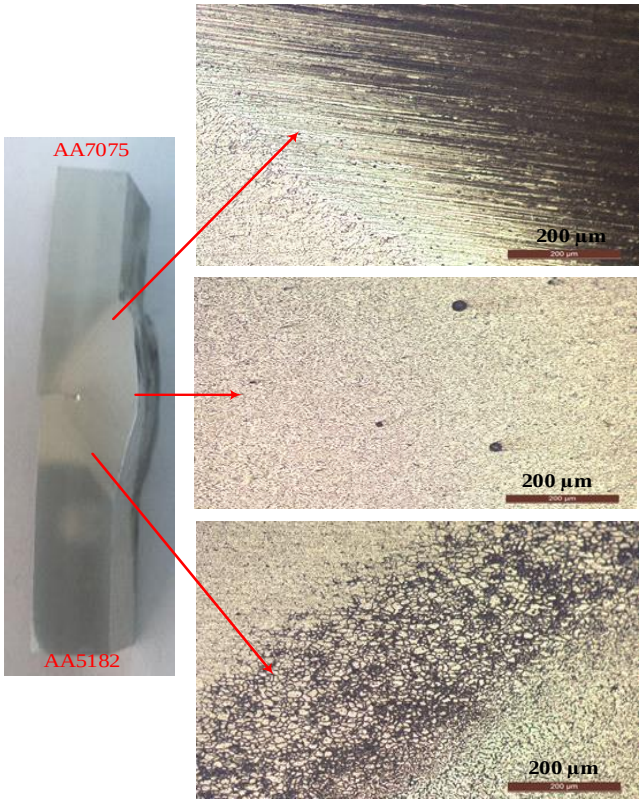

**Şekil 5.12.** $Mv_{38}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



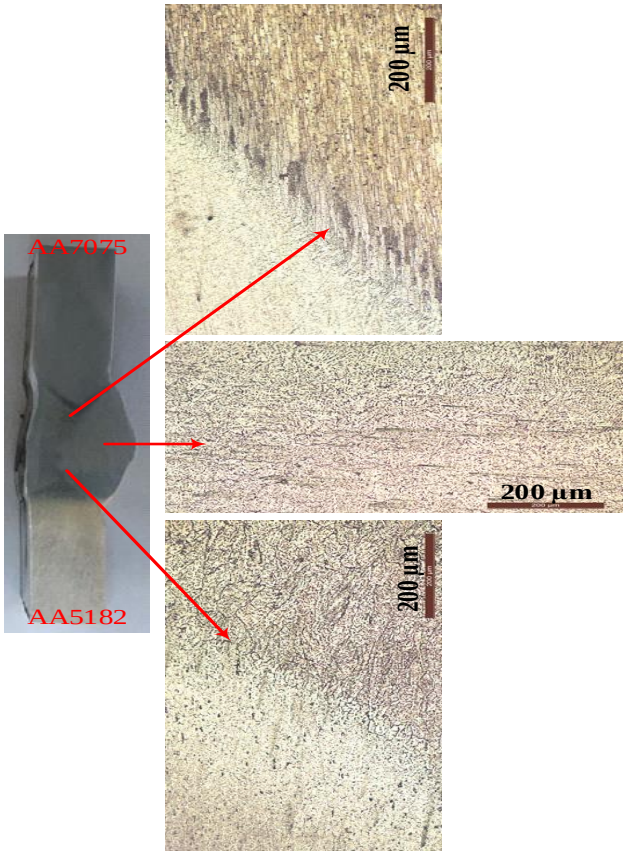

**Şekil 5.13.** $Mv_{38}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



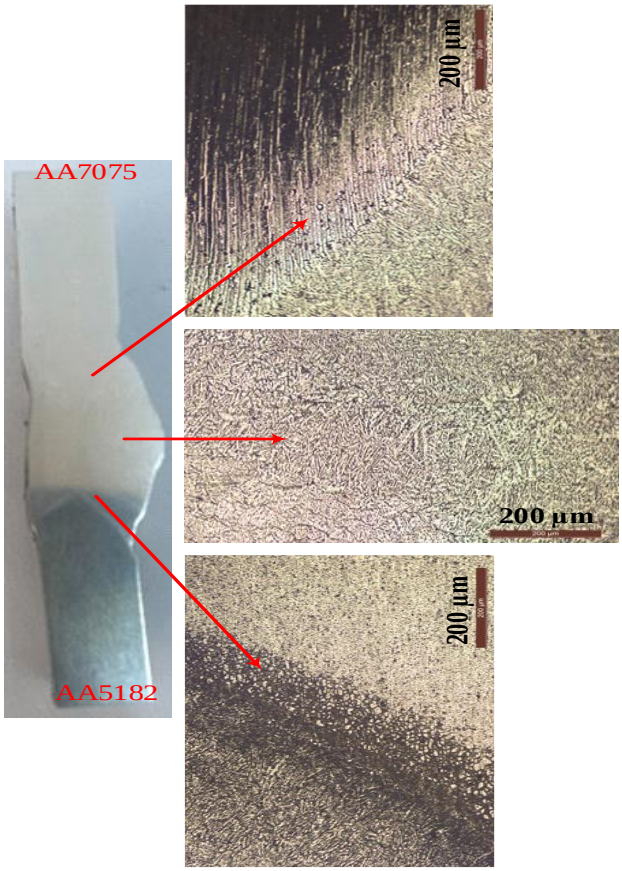

**Şekil 5.14.** $Mv_{45}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



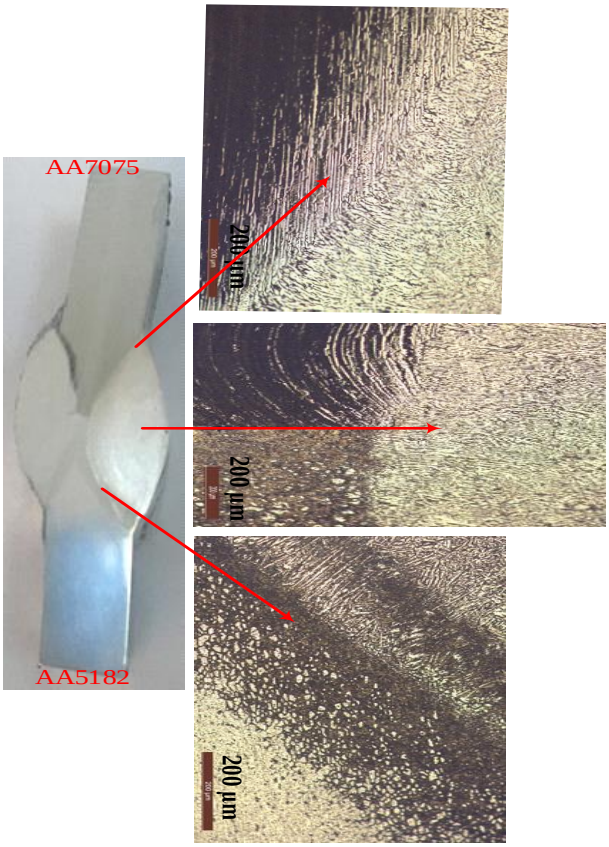

**Şekil 5.15.** $Mv_{45}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar



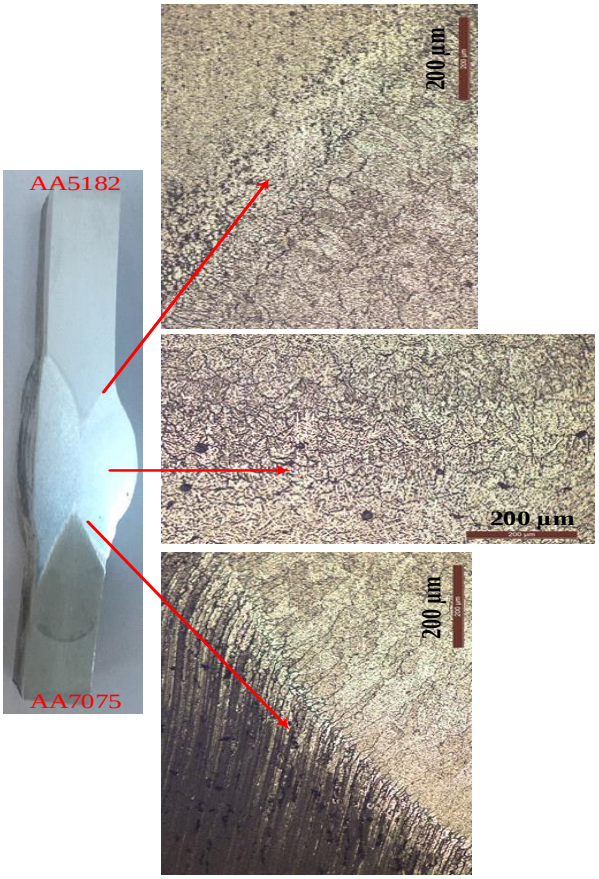

**Şekil 5.16.** $Mx_{38}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.17.** $Mx_{38}14$ numunesine ait makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.18.** $Mx_{45}15$ numunesine ait makro ve mikroyapılar

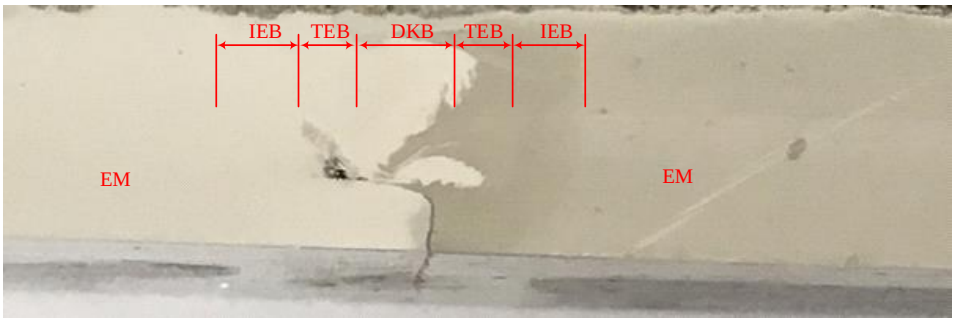



**Şekil 5.19.** $Mx_{45}13$ numunesine ait makro ve mikroyapılar

Şekil 5.12-Şekil 5.15'de gösterilen V kaynak ağzı açılarak MIG kaynağı ile birleştirilen malzemelerin görüntüleri incelendiğinde, $Mv_{38}15$ kodlu numunede, AA7075 ve AA5182 alaşımlarının EM yapısının ince tanelerden oluştuğu göz önünde bulundurulduğunda, IEB ve KM geçişindeki mikroyapının normal olduğu görülmüştür. Ayrıca $Mv_{38}15$ kodlu numunedeki kaynak olayının $Mv_{38}13$, $Mv_{45}15$ ve $Mv_{45}13$ kodlu numunelerle benzerlik gösterdiği görülmüştür. V kaynak ağzı açılarak TIG kaynağı ile birleştirilen numunelerle kıyaslandığında, MIG kaynağında AA7075 alaşımının geçiş bölgesinde görülen keskin ergime çizgisine sahip mikroyapılar görülmemiştir. Şekil 5.16-Şekil 5.19'da X kaynak ağzı açılarak MIG kaynağı ile birleştirilen malzemelerin görüntüleri incelendiğinde, $Mx_{38}13$, $Mx_{38}14$, $Mx_{45}15$ ve $Mx_{45}13$ kodlu numunelerin makro ve mikroyapılarına ait görüntülerde, kaynak kök yapısında gözenekliliğe rastlanılmamıştır. Birleşmelerin V kaynak ağzı açılarak birleştirilen numunelerin kaynağına göre daha uyumlu olduğu ve kaynak geçiş bölgelerinde TIG kaynak yapılarına nazaran daha ince taneli geçişlerin meydana geldiği bir kaynak yapısı elde edilmiştir. Ayrıca ileriki konularda SEM görüntüleri verilen kaynaklı bağlantıların yapıları incelendiğinde bu durum daha iyi anlaşılacaktır. $Mx_{38}13$, $Mx_{38}14$, $Mx_{45}15$ ve $Mx_{45}13$kodlu tüm numunelerin mikroyapıları, $Mx_{45}13$ kodlu numunenin pasolar arası birleşme hatası hariç normal alüminyum kaynak mikroyapısı göstermiştir. TIG kaynağında olduğu gibi MIG kaynağındaki IEB'den en çok etkilene alaşım AA5182 olmuştur.

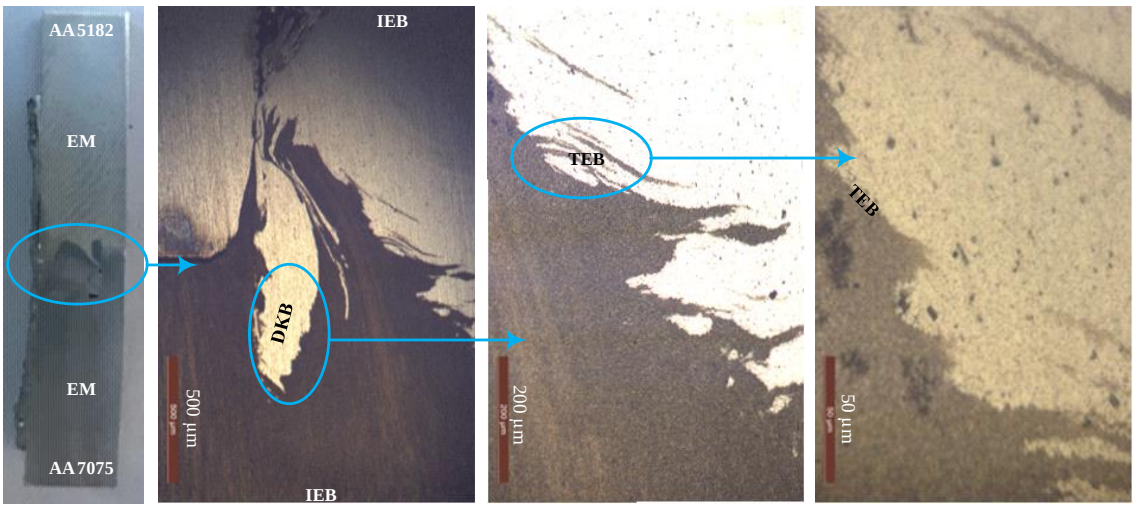
### 5.1.4. FSW kaynaklı bağlantıların yapıları

FSW yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda dört farklı bölge bulunmaktadır. FSW'de ilave dolgu malzemesi kullanılmadığından dolayı TIG ve MIG kaynak yöntemlerinde bulunan KM bölgesi FSW kaynağında bulunmamaktadır. TIG ve MIG kaynağında bulunan EM ve IEB bölgelerine ilaveten FSW'de TEB ve DKB bölgeleri de bulunmaktadır. Şekil 5.20'de FSW yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda oluşan bölgeler gösterilmiştir. Bu bölgeler tamamen mikroyapı karakteristiğine bağlı olarak adlandırılmıştır. FSW ile yapılan daha önceki çalışmalarda da (Rhodes, 1997; Su, 2003; Zhou, 2006; Sarsılmaz, 2008) bu bölgeler tespit edilerek makro ve mikroyapı değerlendirmeleri bu doğrultuda yapılmıştır. Ancak karıştırıcı uç ve kaynak parametrelerine (dönme devri, ilerleme hızı) bağlı olarak bu bölgelerin boyutları farklılıklar gösterir.

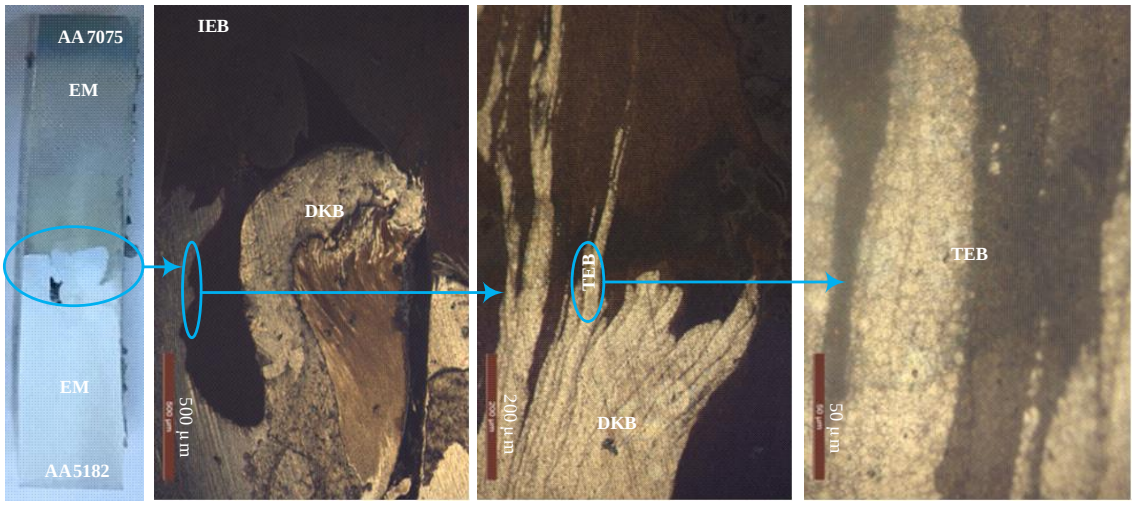



**Şekil 5.20.** FSW yönteminde kaynak kesitinde oluşan bölgeler

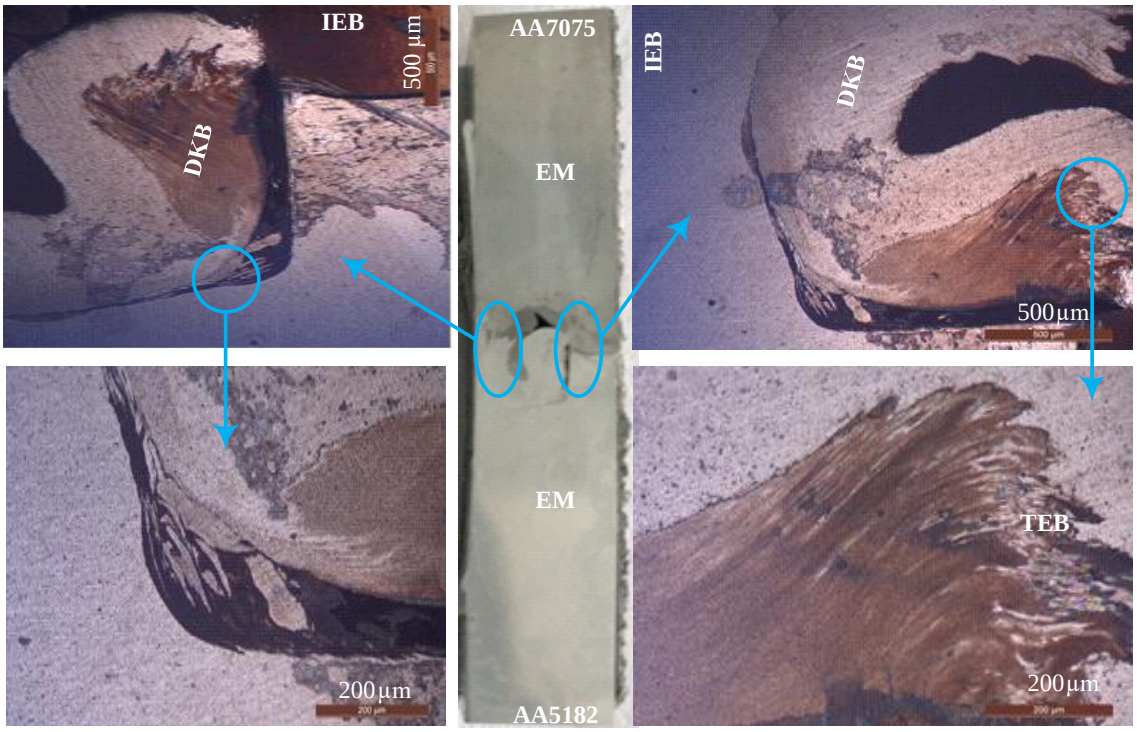
Konik uç kullanılarak FSW yöntemiyle birleştirilen AA7075 ve AA5182 alaşımlarının kaynaklı bağlantıların ara kesit yüzeylerinden alınan makro ve mikroyapı görüntüleri Şekil 5.21-Şekil 5.24'de verilmiştir.



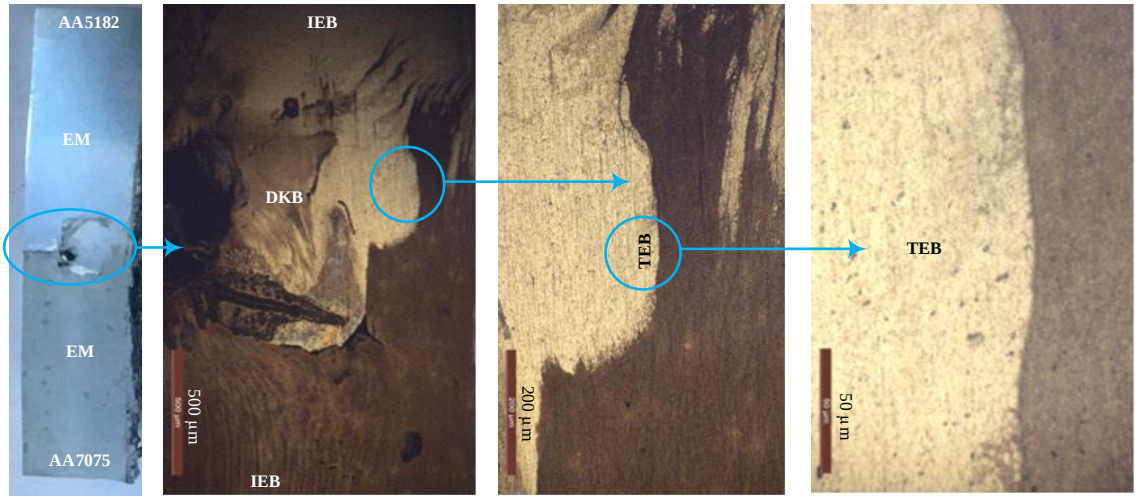

**Şekil 5.21.** $FSW_{k1}09$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.22.** $FSW_{k1}18$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.23.** $FSW_{k2}09$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar

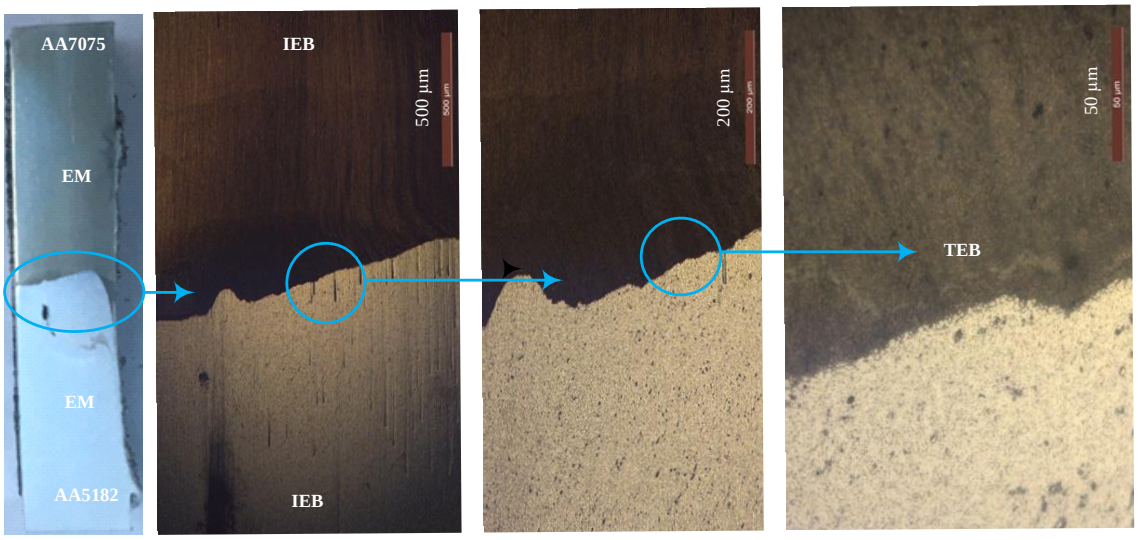



**Şekil 5.24.** $FSW_{k2}18$ numunesinin konik karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar

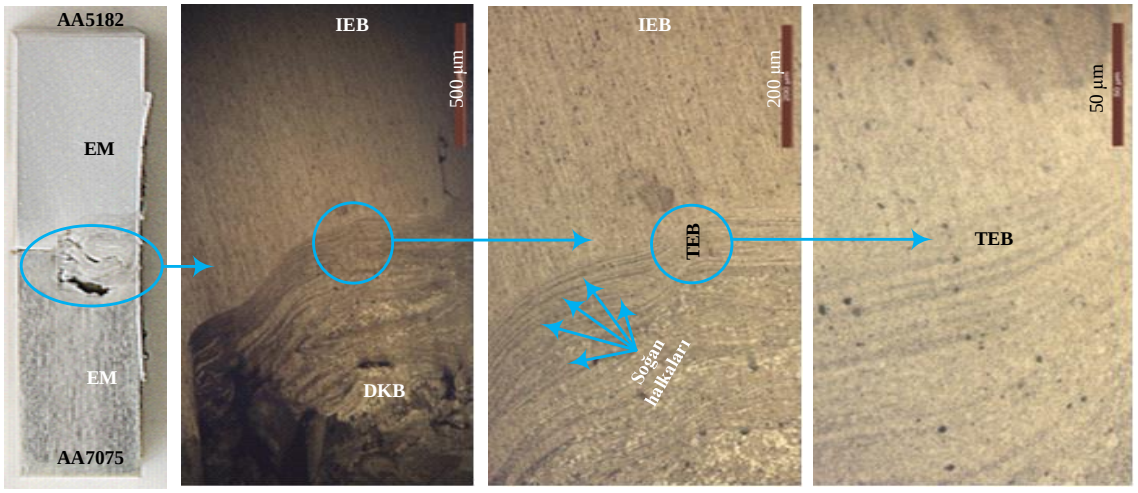
AA7075 ve AA5182 alaşımların konik uç kullanılarak FSW yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynaklı birleştirme bölgesindeki makro ve mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, birleşme bölgelerinde, kaynak ilerleme hızı ve dönme devrine bağlı olarak DKB'de boşluklar meydana geldiği görülmüştür. En yüksek kaynak ilerleme hızı ve dönme devri ile birleşimi yapılan ve Şekil 5.24'te verilen $FSW_{k2}18$ numaralı numunedeki fotoğrafına bakıldığında, birleşme bölgesinde geniş boşlukların olduğu görülmektedir. En düşük ilerleme hızı ve dönme devri ile birleşimi yapılan (Şekil 5.21) $FSW_{k1}09$ numunenin makro ve mikroyapısında, diğer numunelerin makro yapılarına

göre birleşme bölgesinde daha az boşlukların meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca mikroyapılarında ise optik mikroskop ile incelenen birleşme bölgelerinde, malzemenin daha iyi ekstrüze edilerek birleşiminin sağlandığı görülmüştür.

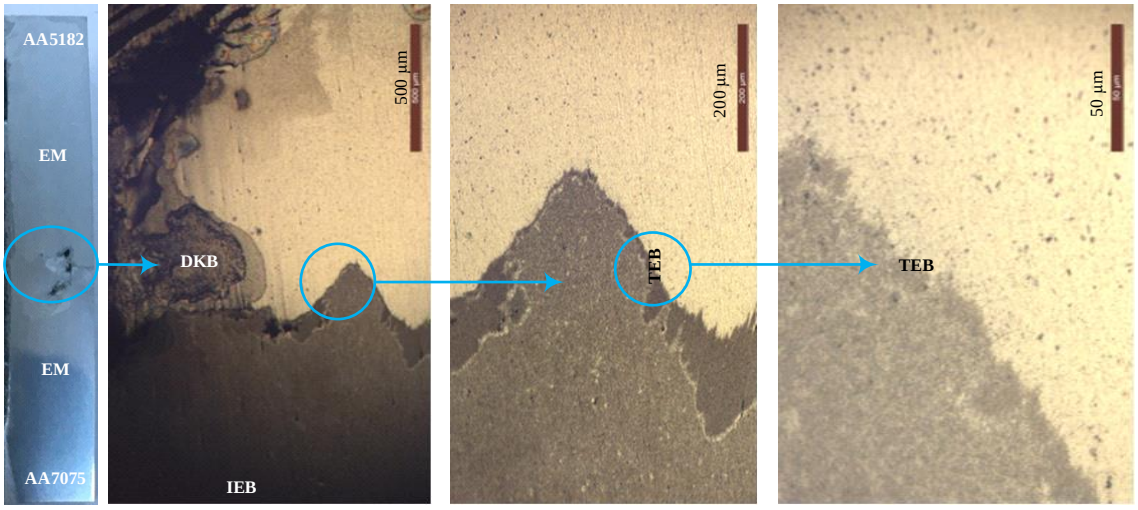
Üçgen uç kullanılarak FSW yöntemiyle birleştirilen AA7075 ve AA5182 alaşımlarının kaynaklı bağlantıların ara kesit yüzeylerinden alınan makro ve mikroyapı görüntüleri Şekil 5.25-Şekil 5.28'de verilmiştir.



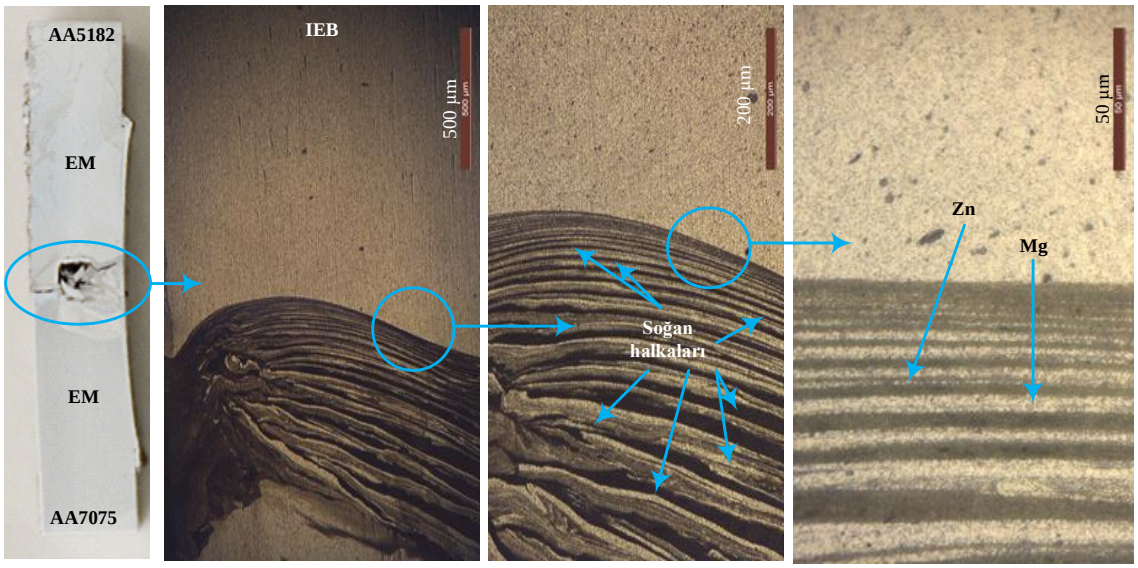

**Şekil 5.25.** FSW$u_1$09 numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.26.** FSW$_{u1}$18 numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.27.** $FSW_{u2}09$ numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar




**Şekil 5.28.** $FSW_{u2}18$ numunesinin üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilmesindeki makro ve mikroyapılar

Şekil 5.25-Şekil 5.28'de AA7075 ve AA5182 alaşımlarının üçgen uç kullanılarak FSW yöntemi ile birleştirilmesinde, $FSW_{u1}09$ kodlu numunede kısmen olsa da kaynak merkezinin DKB'si alt noktasında boşluk ve bağlantısız bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir. Kaynak bağlantılarında meydana gelen boşlukların boyut ve miktarı, artan dönme devri ve kaynak ilerleme hızına bağlı olarak artığı, en yüksek dönme devri ve kaynak ilerleme hızında birleşimi yapılan ve Şekil 5.28'de verilen $FSWu_2 18$ kodlu numunenin makroyapısında bu durum açıkça görülmektedir. Bu kusurların boyutundaki artış birleştirme esnasında birim alan ve birim zamanda ulaşılan sıcaklık derecesinin azalması, üçgen karıştırıcı uç vasıtasıyla yeterli plastisite sıcaklığına ulaşılmamasından ve ekstrüzyon kabiliyetinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca Cavaliere ve ark. (2005b) yaptıkları çalışmalarında, viskozite

sıcaklığa ulaşamadan taşınmak istenen yarı plastik malzemenin birleşme hattı boyunca gözeneklilik ve tünel oluşumunu artıracağını vurgulamışlardır. Üçgen karıştırıcı uçun karıştırma bölgesindeki işlem yeteneği de göz önüne alındığında, kaynak işleminde ekstrüzyon yeteneği açısından yeterli sıcaklığın sağlanması çok önemli olmaktadır.

Hem konik uçla hem de üçken karıştırıcı uçla AA7075 ve AA5182 alaşımının FSW yöntemi ile birleştirilmesinde, AA5182 alaşımının AA7075 alaşımdan daha yumuşak (sünek) olmasından dolayı karıştırma işleminde AA5182 alaşımı AA7075 alaşımı içerisinde daha fazla karıştığı görülmüştür.

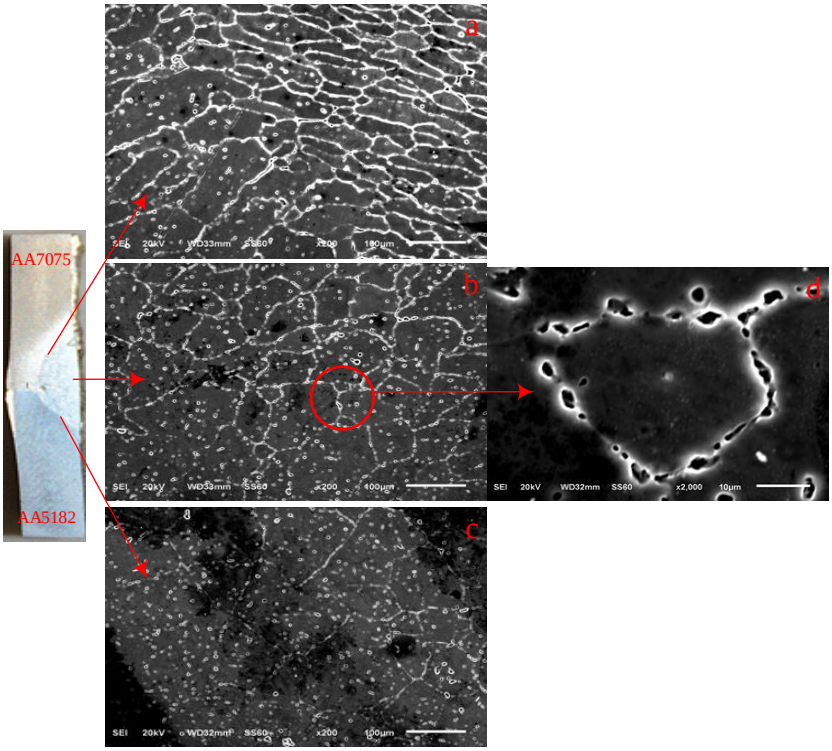
## 5.2. Kaynaklı Bağlantıların SEM Görüntüleri

TIG, MIG ve FSW yöntemleri kullanılarak birleştirilen AA7075/AA5182 alaşım çiftlerinin birleşme bölgelerini daha detaylı incelemek için SEM cihazıyla 200X, 500X ve 1000X büyütme oranlarında mikroyapı görüntüleri alınmıştır. TIG, MIG ve FSW yöntemlerinin kullanılarak birleştirilmesinde en iyi ve en kötü değerlerin elde edildiği numunelerin kaynak bölgesi, kaynak bağlantı yeri ve IEB bölgesi ayrı ayrı ele alınarak incelenmiştir.

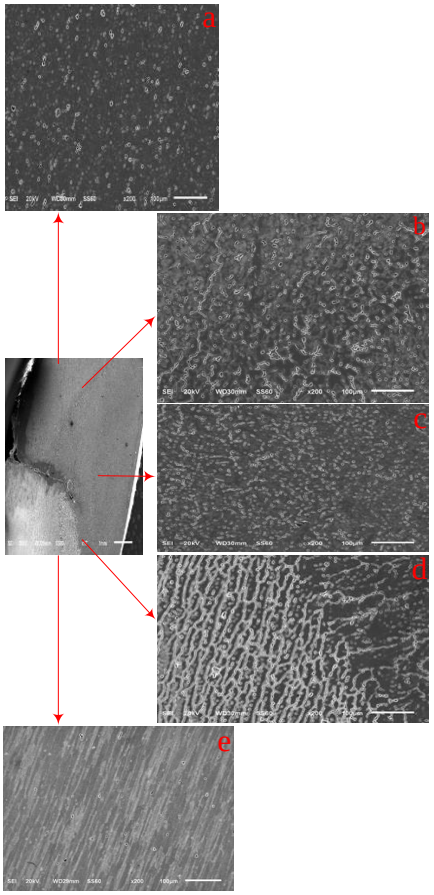
### 5.2.1. TIG kaynaklı bağlantılarının SEM görüntüleri

TIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen AA7075/AA5182 alaşım çiftlerinin V ve X kaynak ağızları açılarak bağlantıların yapıldığı numunelerin kaynağında, gaz debisinin ve kaynak akımının kaynaklı birleştirmenin mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemek için Şekil 5.29-Şekil 5.32'deki SEM görüntülerinin incelenmesi gerekmektedir.

Şekil 5.29'da $Tv_{17}15$ kodlu numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir. Burada AA5182 alaşım EM (c) ile KM geçiş bölgesi düzgün bir görüntü sergilemekteyken, AA7075 alaşım EM (a) ile KM geçiş bölgesinde düzgün olmayan iri tanelerin meydana geldiği geçiş bölgeleri net bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca b ve d KM'de oluşan tanelerinin ise ısının akışı yönüne ters olarak belirgin bir şekilde yönlendiği görülmektedir. Yapılan bir araştırmada KM'de oluşan tanelerin ısı akışına ters olarak yönleneceği ve en son KM merkez çizgisinde katılaşmanın tamamlanacağı belirtilmektedir (Durgutlu, 1999). KM'nin ince taneli homojen bir tane yapısı sergilendiği ve herhangi bir gaz boşluğu veya hata içermediği de SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.



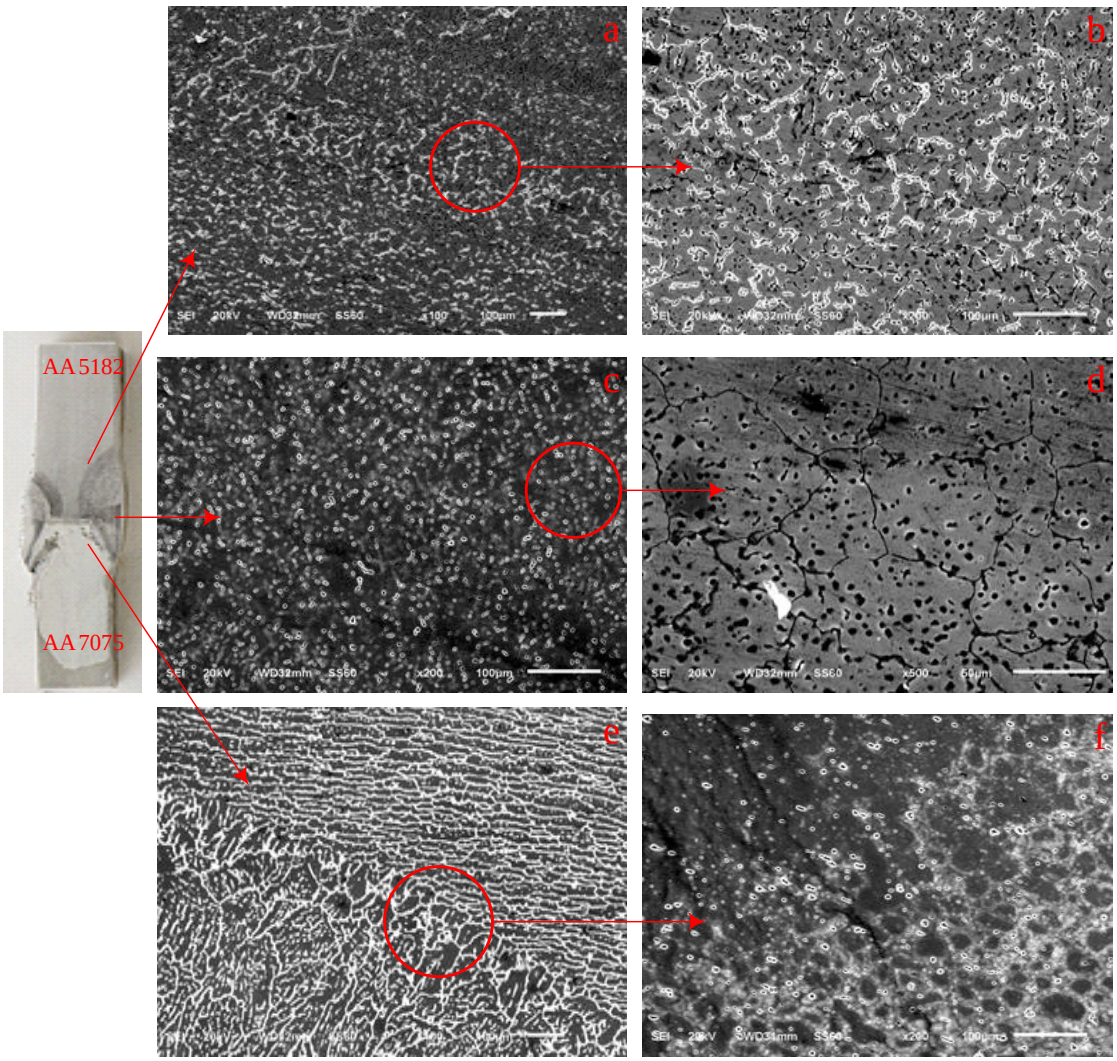

**Şekil 5.29.** $Tv_{17}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA7075'in geçiş bölgesi (200X), b-d) Kaynak bölgeleri (200X-2000X), c) AA5182'in geçiş bölgesi (200X)



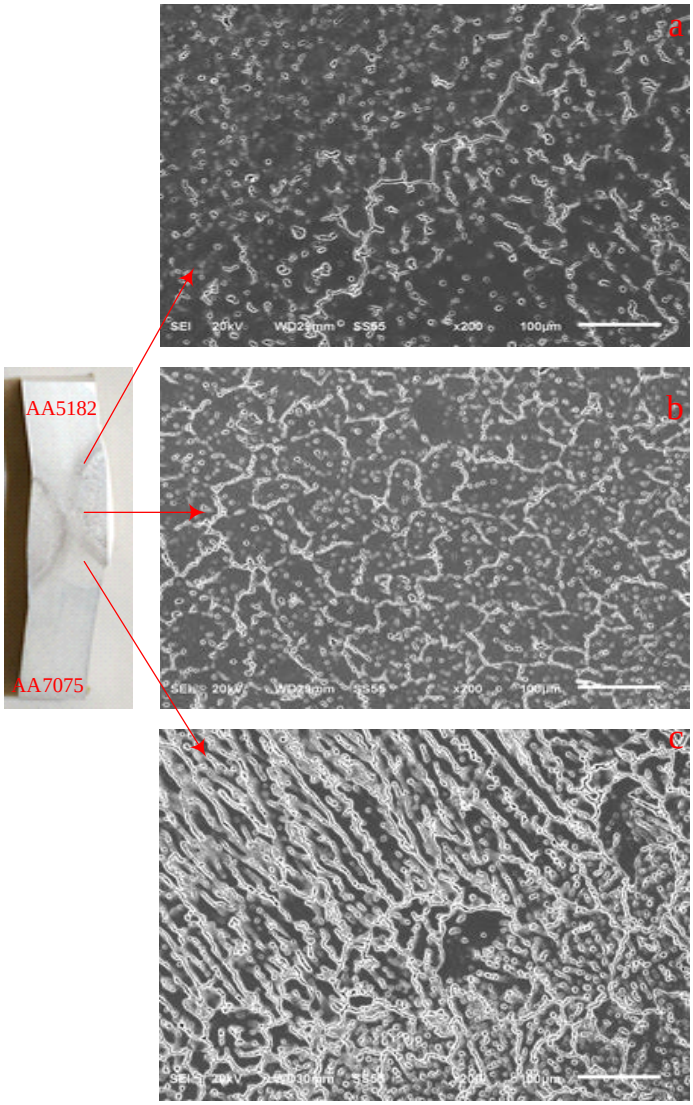

**Şekil 5.30.** $Tv_{12}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA5182 alaşımı (200X), b) AA5182'in geçiş bölgesi (200X), c-Kaynak bölgesi (200X), d) AA7075'in geçiş bölgesi (200X), e) AA7075 alaşımı (200X)

Şekil 5.30'da $Tv_{12}15$ numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. TIG kaynağı ile V kaynak ağzı açılarak birleştirilen alaşımların en iyi şekilde kaynak edildiği kaynaklı bağlantı $Tv_{12}15$ kodlu numunesidir. KM (c) ile geçiş bölgeleri arasında (a, d) tipik olarak bir ilişkinin olduğu görülmekte olup herhangi bir birleşme hatası içermemektedir.

Şekil 5.31'de $Tx_{12}13$ numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Burada AA5182 alaşım EM'si (a, b) ile KM (c, d) geçiş bölgesi arasında düzgün bir görüntü sergilemekteyken, AA7075 alaşım EM'si (e, f) ile KM (c, d) geçiş bölgesi arasında düzgün olmayan iri tanelerin meydana geldiği geçiş bölgeleri net bir şekilde görülebilmektedir. TIG-X kaynakları içerisinde en kötü birleşmenin bu numuneden elde edilmesi, geçiş bölgesindeki kaynak süreksizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.




**Şekil 5.31.** $Tx_{12}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA5182'nin geçiş bölgesi (100X-200X), c-d) Kaynak bölgesi (200X-500X), e-f) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X)



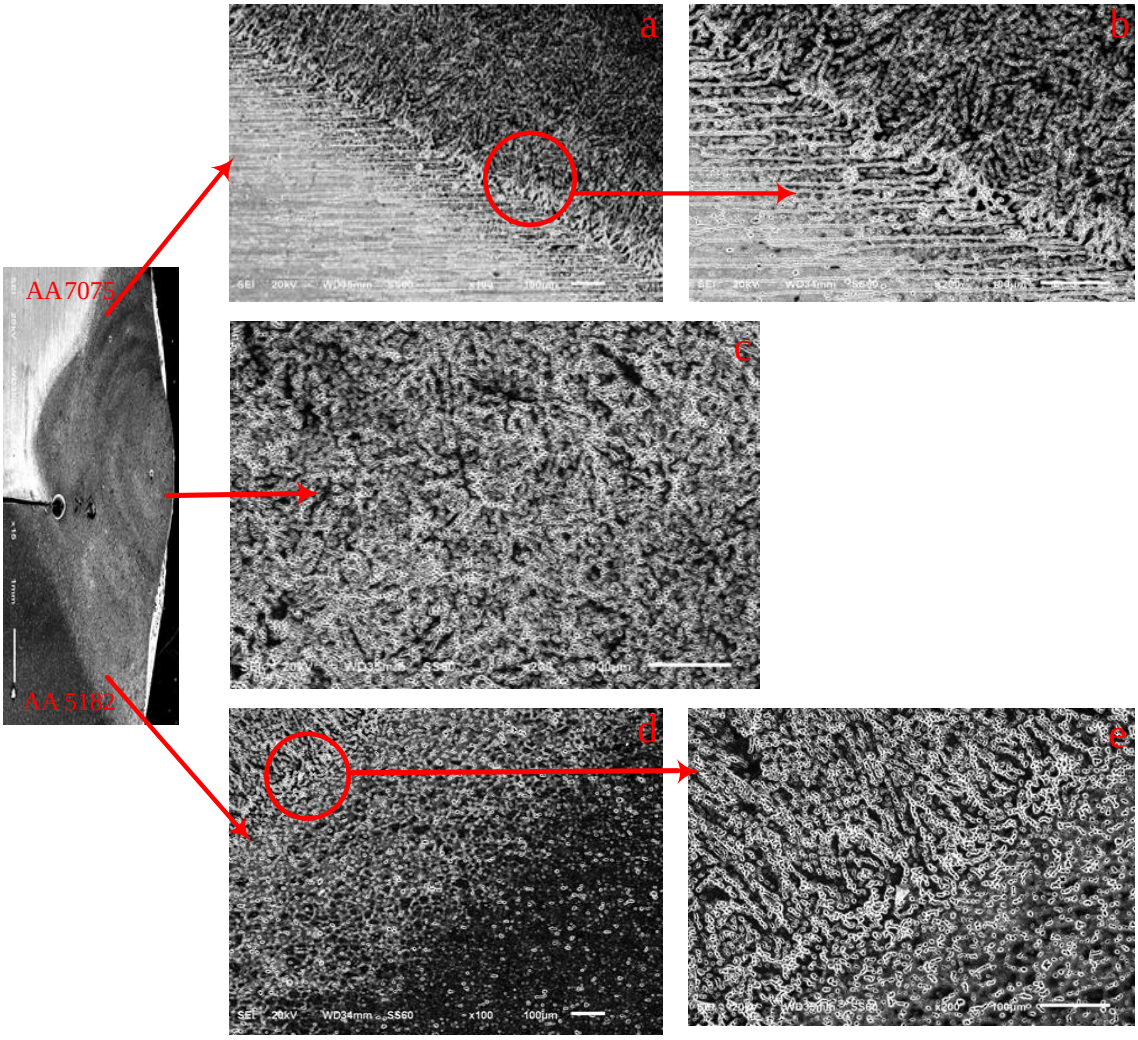

**Şekil 5.32.** $Tx_{17}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA5182'nin geçiş bölgesi (200X), b) Kaynak bölgesi (200X), c) AA7075'in geçiş bölgesi (200X)

Şekil 5.32'de EM'ler (a, c) ile kaynak metalli (b) arasındaki geçiş bölgelerinde ince taneli homojen düzgün bir mikroyapının elde edildiği görülmektedir. Özelikle KM (b) ile AA7075 (c) alaşım EM arasındaki geçiş bölgesinde düzgün bir geçişinin oluşması bu numunenin TIG-X kaynakları içerisinde en iyi olmasını sağladığı düşünülmektedir.

### 5.2.2. MIG kaynaklı bağlantılarının SEM görüntüleri

AA7075 ve AA5182 alaşımlarının MIG kaynağında tel ilerleme hızının ve kaynak akımının dolasıyla ısı girdisinin kaynaklı birleştirmenin mikroyapısı üzerine etkilerini belirlemek için mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. MIG kaynak yöntemi

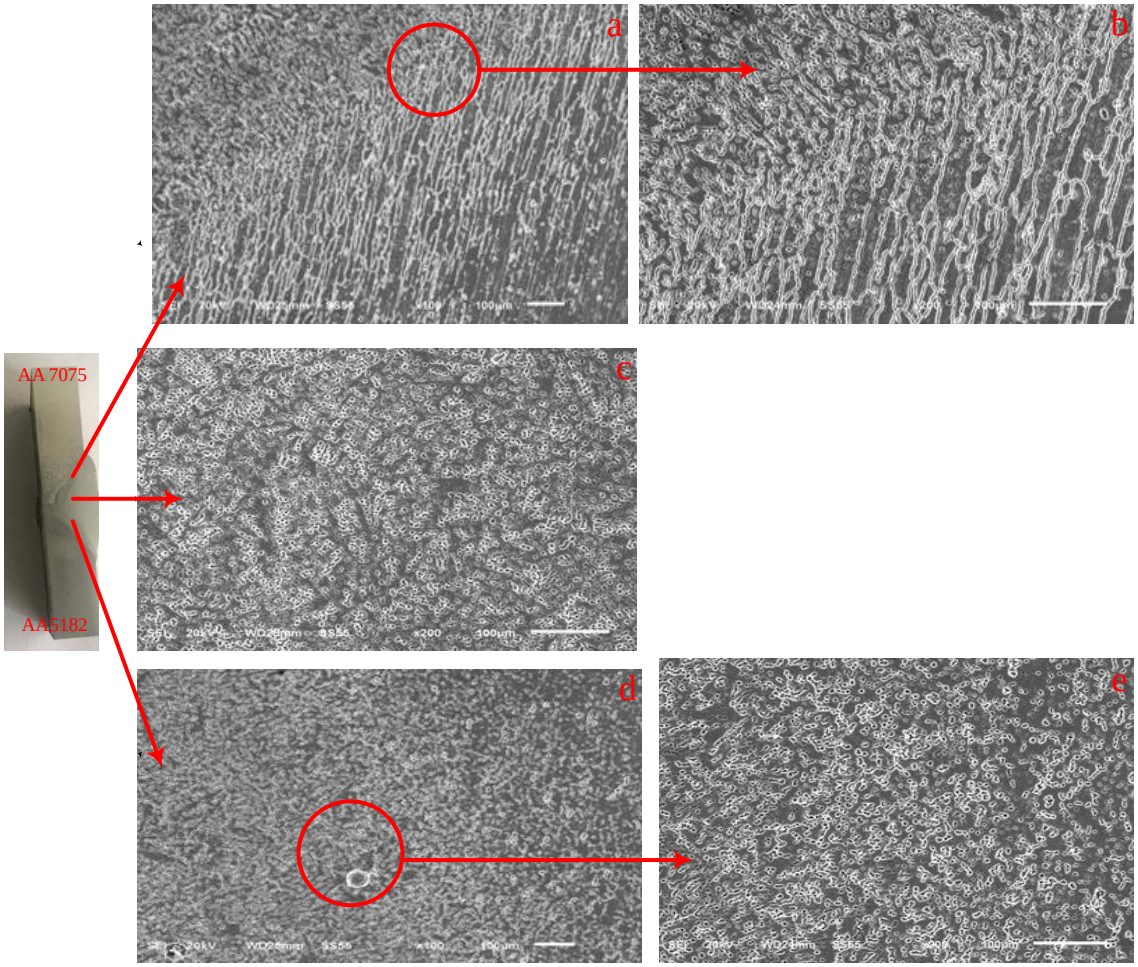
kullanılarak birleştirilen AA7075/AA5182 alaşım çiftlerinin, V ve X kaynak ağızları açılarak bağlantıların yapıldığı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 5.33-Şekil 5.36'da verilmiştir.




**Şekil 5.33.** $Mv_{45}15$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA5182'in geçiş bölgesi (100X-200X), c) Kaynak bölgesi (200X), d-e) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X)

Şekil 5.33'de $Mv_{45}15$ numunesine ait SEM görüntülerine bakıldığında; AA5182 alaşım EM'si (d, e) ile KM (c) geçiş bölgesi arasında ince tanelerin oluştuğu düzgün bir yapı görülmektedir. Ancak AA7075 alaşım EM'si (a, b) ile KM (c) geçiş bölgesi arasında düzgün olmayan bir birleşmenin meydana geldiği yerde yarık şeklinde bir geçiş bölgesi oluşmuştur. Bu durum KM ile AA7075 alaşımı arasında, V kaynaklı bağlantılarda 45 cm/dk tel ilerleme hızı ve 150 amper akımın için iyi bir birleşmenin meydana gelmediğini göstermektedir.

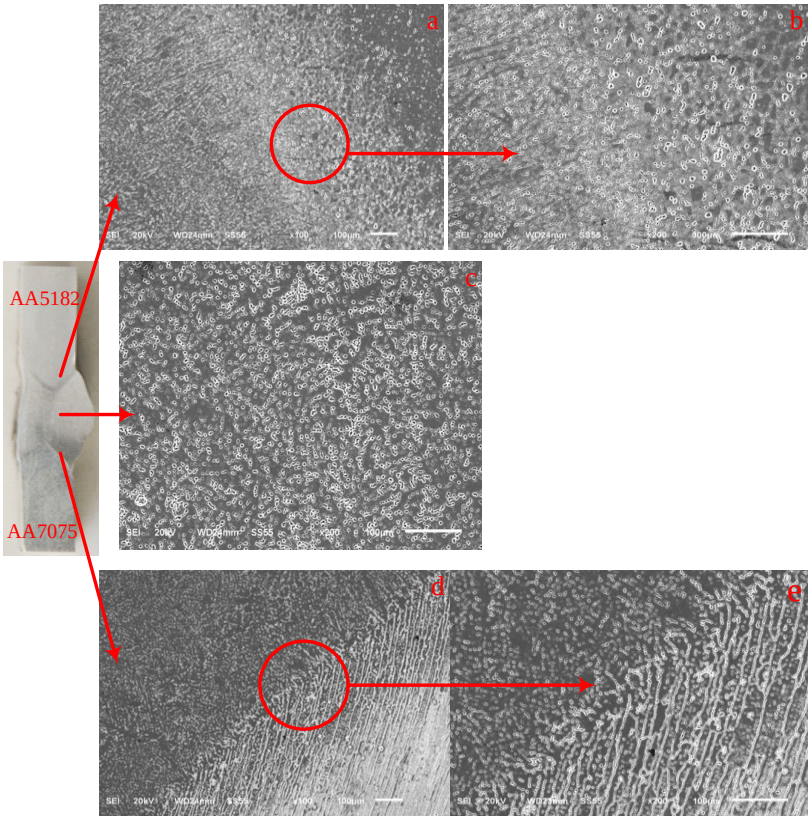
Şekil 5.34'te $Mv_{38}13$ kodlu numuneye ait SEM görüntüleri verilmiştir.



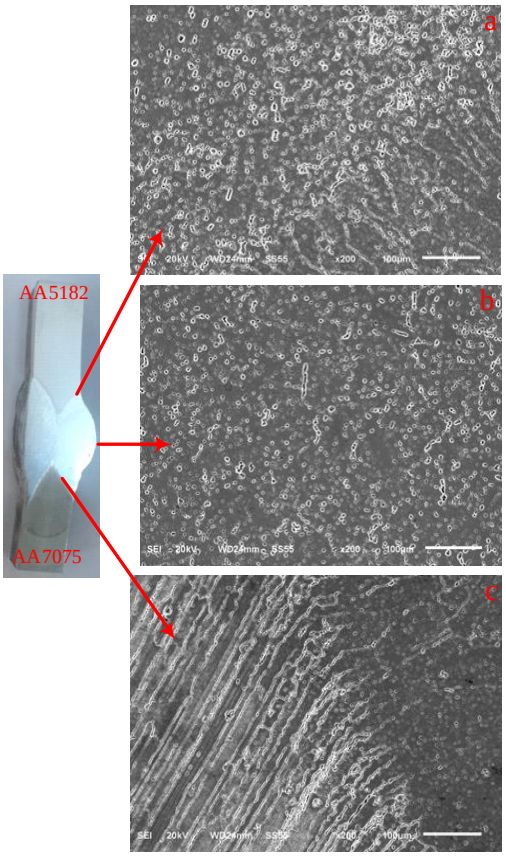

**Şekil 5.34.** $Mv_{38}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X), c) Kaynak bölgesi (200X), d-e) AA5182'nin geçiş bölgesi (100X-200X)

$Mv_{38}13$ kodlu numunenin KM'de (c) IEB'e göre ince taneli homojen bir yapı olduğu görülmektedir. Ayrıca KM'den IEB'e doğru ilerlerken tanelerin irileştiği görülmektedir. Fakat EM'ler (a, b, d, e) ile KM geçiş bölgesi arasında tanelerin bir biri ile iç içe geçmiş olduğu açıktır. Bu durumun, MIG kaynağı ile V kaynak ağzı açılarak birleştirilen numunenin 38 cm/dk tel ilerleme hızı ve 130 amper kaynak akımı parametrelerinde en iyi şekilde birleşmenin meydana geldiğini göstermektedir.

Şekil 5.35'te $Mx_{38}13$ numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.35'te görüldüğü gibi AA7075 alaşım EM geçiş bölgesi (d, e) ile KM (c) arasında düzgün olmayan bir birleşmenin varlığından söz edilebilir. V kaynak ağzı açılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların aksine X kaynak ağzı açılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda 38 cm/dk tel ilerleme hızı ve 130 amper kaynak akımı parametrelerinde en kötü kaynak birleşmesi elde edilmiştir. Bu durum kaynak ağzının birleşim kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.




**Şekil 5.35.** $Mx_{38}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a-b) AA5182'in geçiş bölgesi (100X-200X), c) Kaynak bölgesi (200X), d-e) AA7075'in geçiş bölgesi (100X-200X)



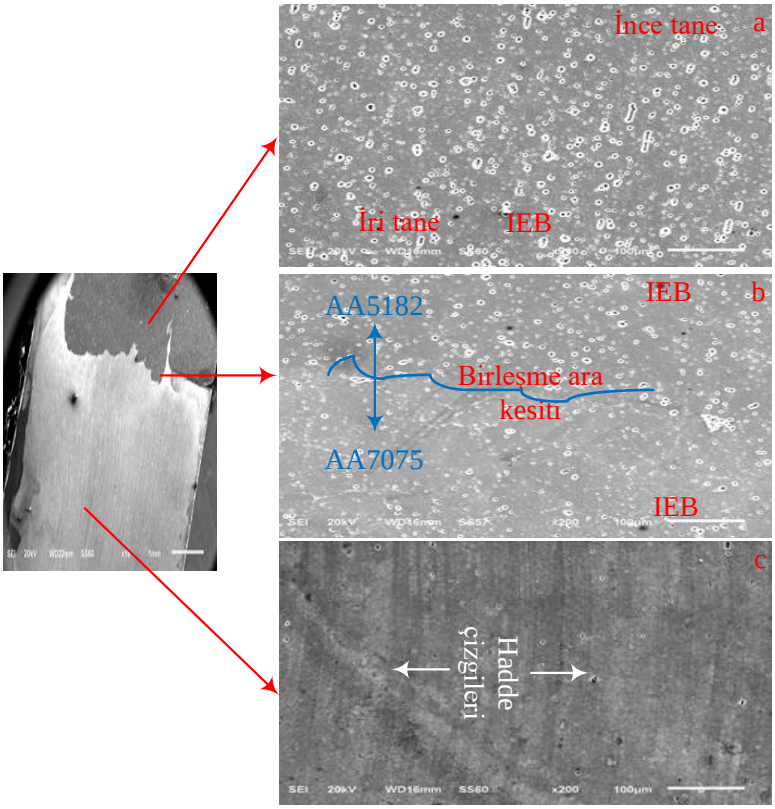

**Şekil 5.36.** $Mx_{45}13$ numunesine ait SEM görüntüleri; a) AA5182'nin geçiş bölgesi, b) Kaynak bölgesi (200X), c) AA7075'in geçiş bölgesi (200X)

Şekil 5.36'da $Mx_{45}13$ numunesine ait SEM görüntülerine bakıldığında, KM'nin (b), IEB (a, c) ve EM'ye oranla inci taneli bir yapıya sahip olduğu ve kaynak geçiş bölgelerinde tanelerin heterojen olup iç içe geçtiği görülmektedir. Literatür çalışmalarında kaynak metalinin ince, eş eksenli ve düzgün dağılmış taneler içerdiği ve diğer bölgelere nazaran IEB'in kaba taneli bir mikroyapıya sahip olduğu belirtilmiştir (Ding, 2014). Gou ve ark. (2015) alüminyum ve alaşımları üzerine yaptıkları çalışmada, IEB'de iri tanelerin olduğunu ve homojen olmayan mikroyapılar gözlendiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Liu ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, IEB'in kaynak ısıl çevrimi nedeni ile farklı bir mikroyapı ve özellikler sergilediğini ve IEB'in tane yapısının daha büyük olduğundan bahsetmişlerdir. Başka bir çalışmada ise IEB'in iri tanelerden oluştuğu, bu tanelerin eş-eksenli bir yapıya sahip olduğu ve kaynak geçiş bölgesinden, KM'nin merkezine doğru gidildikçe mikroyapıda tane incelmelerinin meydana geldiği belirtilmiştir (Mutombo, 2011). Şekil 5.36'da $Mx_{45}13$ numunesinin yapısı, literatür ışığında belirtilen yorumlara uygun olarak elde edilmiştir. X kaynak ağzı açılarak 45 cm/dk tel ilerleme hızı ve 130 amper kaynak akımı parametrelerinde en iyi birleşme sağlanmıştır.

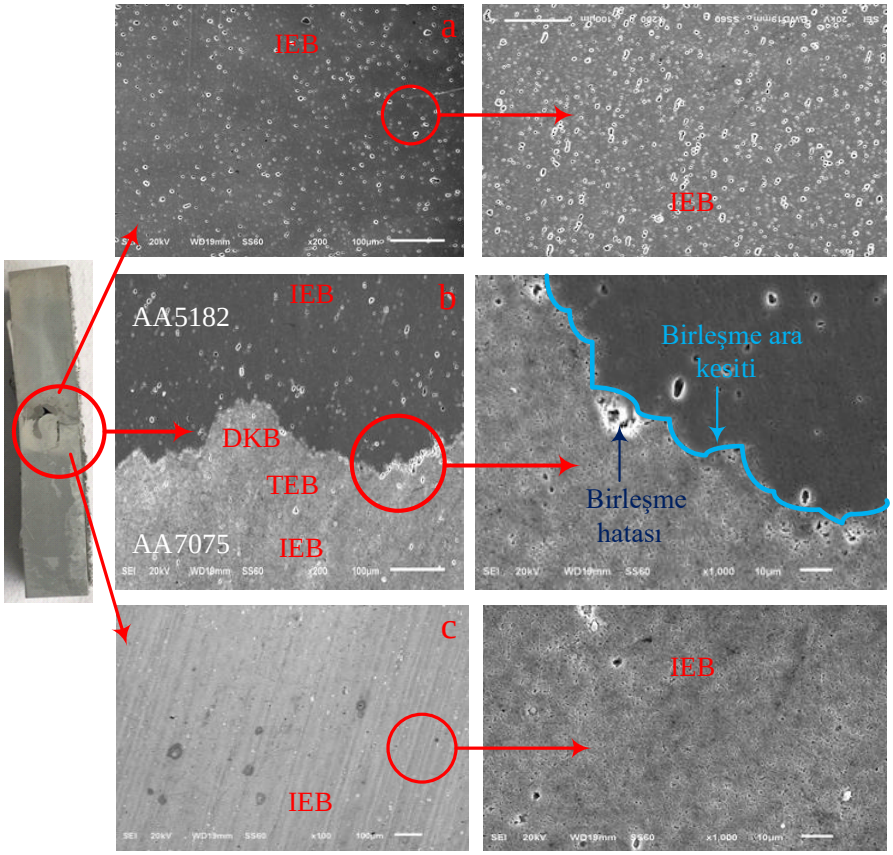
### 5.2.3. FSW kaynaklı bağlantılarının SEM görüntüleri

FSW yönteminde konik ve üçgen karıştırıcı uç kullanılarak birleştirilen AA7075/AA5182 alaşım çiftlerinin SEM görüntüleri Şekil 5.37-Şekil 5.42'de verilmiştir. FSW yöntemi ile birleştirilen bağlantılarda, birleşme esnasında sürtünmeden dolayı oluşan ısı birleştirilen malzemelerin erime sıcaklıkları altında gerçekleştiği için FSW yöntemi ile birleşen malzemelerdeki mikroyapı TIG ve MIG kaynaklı bağlantıların mikroyapılarından çok farklı elde edilmiştir. SEM görüntülerine bakıldığında da birleşmelerin diğer kaynak yöntemlerine göre daha iyi olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de konik uç kullanılarak FSW yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş ve en iyi kaynak kalitesinin elde edildiği AA7075 ve AA5182 alaşımlarının SEM görüntüleri verilmiştir.



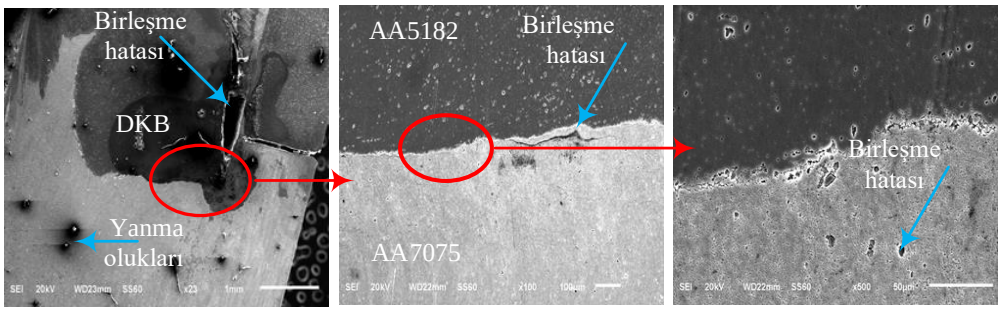

**Şekil 5.37.** $FSW_{k1}09$ numunesine ait SEM görüntüleri a) AA5182 alaşımı (200X), b) Kaynak ara yüzey geçiş bölgesi (200X), c) AA7075 alaşımı (200X)



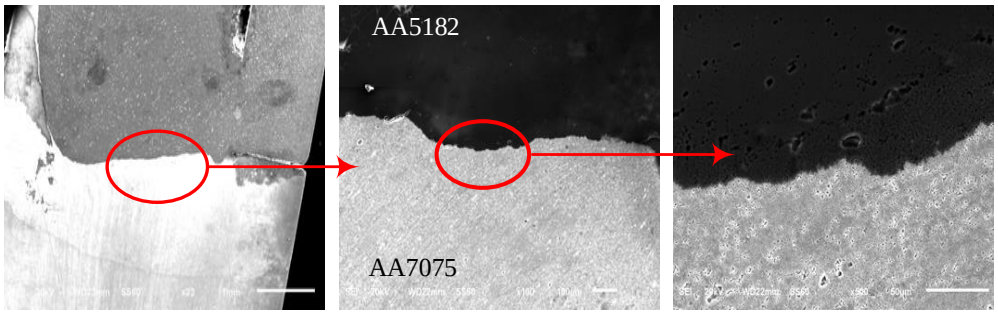

**Şekil 5.38.** $FSW_{k2}09$ numunesine ait SEM görüntüleri a) AA5182 alaşımı (200X-1000X), b) Kaynak ara yüzey geçiş bölgesi (200X-1000X), c) AA7075 alaşımı (200X-1000X)

Şekil 5.37'de $FSW_{k1}09$ numunesine ve Şekil 5.38'de $FSW_{k2}11$ numunesine ait SEM görüntülerinden, $FSW_{k1}09$ numunesinin oldukça iyi birleştiği, $FSW_{k2}09$ numunesinin ise birleşiminde çok küçük bir hatanın oluştuğu görülmektedir. Konik karıştırıcı uç kullanılarak birleştirilen alaşımlarda en iyi kaynak kalitesi 980 dev/dk dönme devrinden elde edilmiştir. Kaynak hızı arttıkça azda olsa küçük hataların oluştuğu görülmüştür.

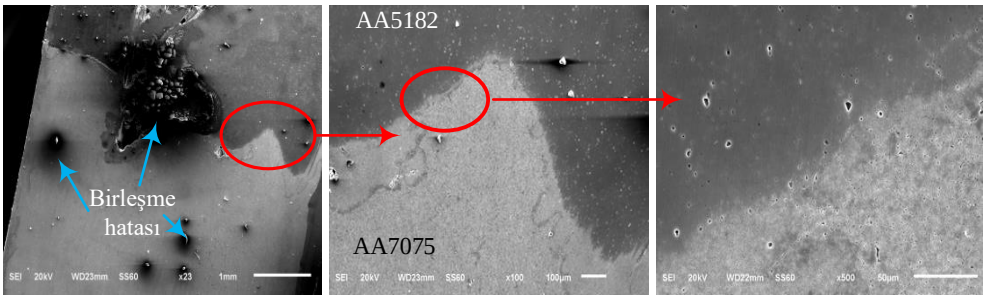
Şekil 5.39 ve Şekil 5.42'de üçken uç kullanılarak FSW yöntemi ile birleştirilmiş AA7075 ve AA5182 alaşımlarının SEM görüntüleri verilmiştir.



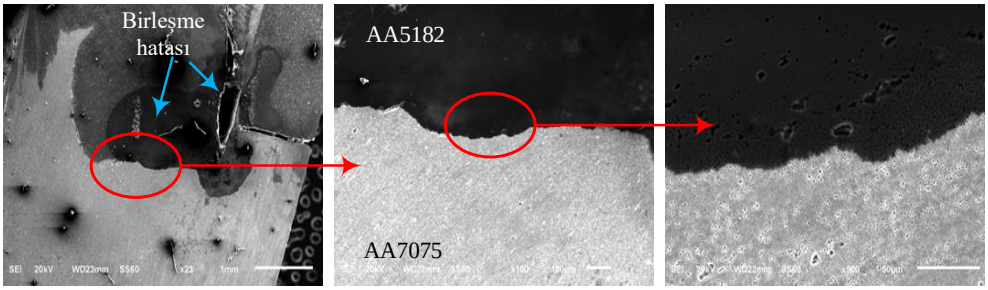

**Şekil 5.39.** $FSW_{u1}09$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X)




**Şekil 5.40.** $FSW_{u1}18$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X)




**Şekil 5.41.** $FSW_{u2}09$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X)




**Şekil 5.42.** $FSW_{u2}13$ numunesinin kaynak ara yüzey bölgesine ait SEM görüntüleri (23X-100X-500X)

Şekil 5.38-Şekil 5.42'de farklı kaynak parametrelerinde üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelere ait SEM görüntülerinden, dönme devri ve kaynak hızının kaynaklı bağlantıların mikroyapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Konik karıştırıcı ucun kullanılarak birleştirilme yapıldığı kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi üçgen karıştırıcı uçta da kaynak hızının artması kaynak kalitesini düşürmüştür. Ancak dönme devirlerinin artması ile üçgen karıştırıcı uçta bağlantının daha iyi yapıldığı görülmüştür. Üçgen karıştırıcı uç ile yapılan birleştirmelerde konik karıştırıcı uç ile yapılan kaynak kalitesi elde edilememiştir. Bu da bize dönme devri ve kaynak hızına ilaveten karıştırıcı uç geometrisinin de kaynaklı bağlantıların kalitesinde önemli bir parametre olduğunu göstermiştir.

### 5.3. Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik Sonuçları

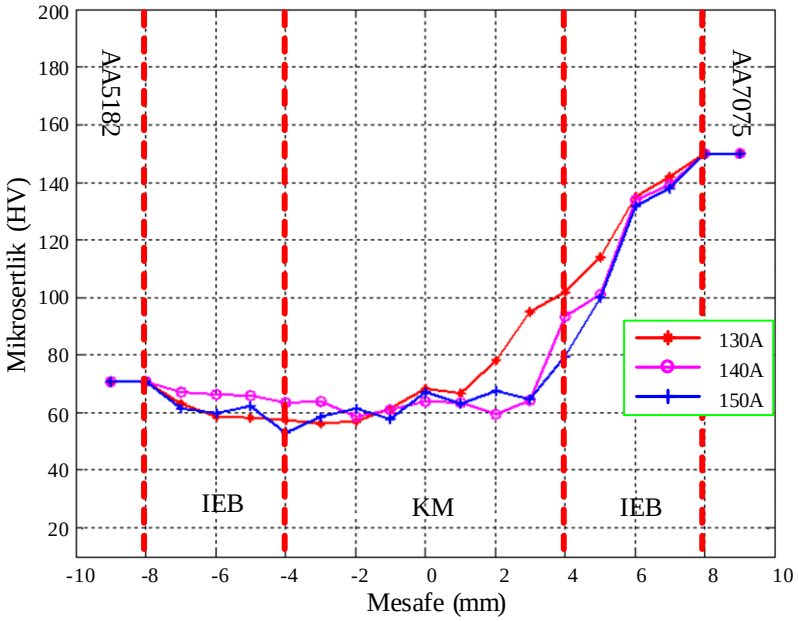
TIG, MIG ve FSW yöntemleri uygulanmış plakalardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde, EM'den KM'ye ve KM'den EM'ye doğru çizgisel bir hat boyunca sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 1 mm aralıklarla kaynak ekseni sağında ve solunda 100 gr deney yükü ile ($HV_{0.1}$) yapılan Vickers sertlik tarama sonuçları TIG, MIG ve FSW için Şekil 5.43-Şekil 5.54'te verilmiştir. Bütün numunelerin sertlik eğrileri incelendiğinde, literatüre uygun olarak TIG ve MIG kaynaklı birleştirmelerde üç bölgede, FSW kaynaklı birleştirmelerinde ise dört farklı bölgede sertlik dağılımının değiştiği görülmektedir. Kaynak bölgesinde değişim gösteren ölçüm sonuçlarının esas malzemeye ulaşıldığında, farklı tiplerdeki alüminyum alaşımlarının ana sertlik değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

#### 5.3.1. TIG kaynaklı bağlantılarının mikrosertlik sonuçları

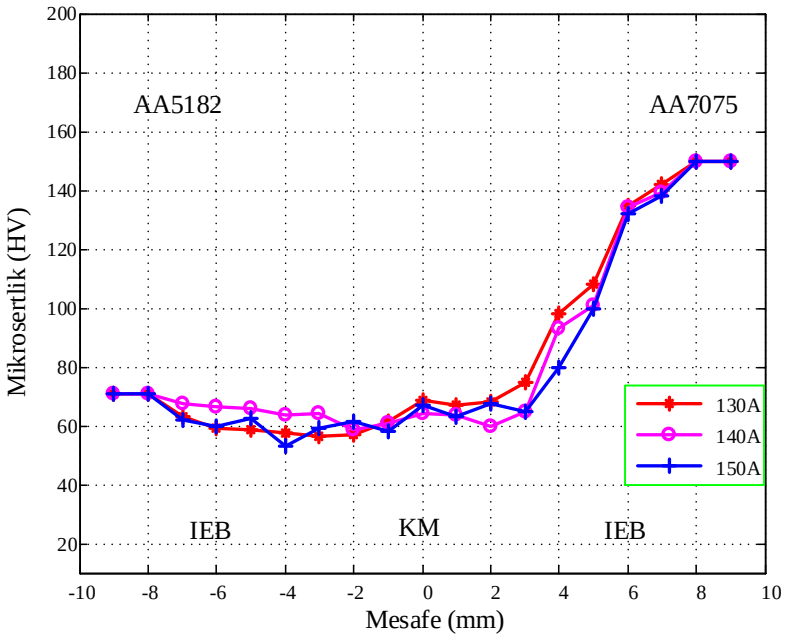
Farklı akım, gaz debisi ve kaynak ağzı kullanılarak birleşimi yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının ana metalden birleşme merkezine ve birleşme merkezinden ana

metale doğru çizgisel bir hat boyunca yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları, Şekil 5.43-5.46'da verilmiştir.

Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te V kaynak ağzı açılarak farklı akım ve gaz debilerinde kaynakları yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının sertlik tarama eğrilerinin sonuçları verilmiştir.



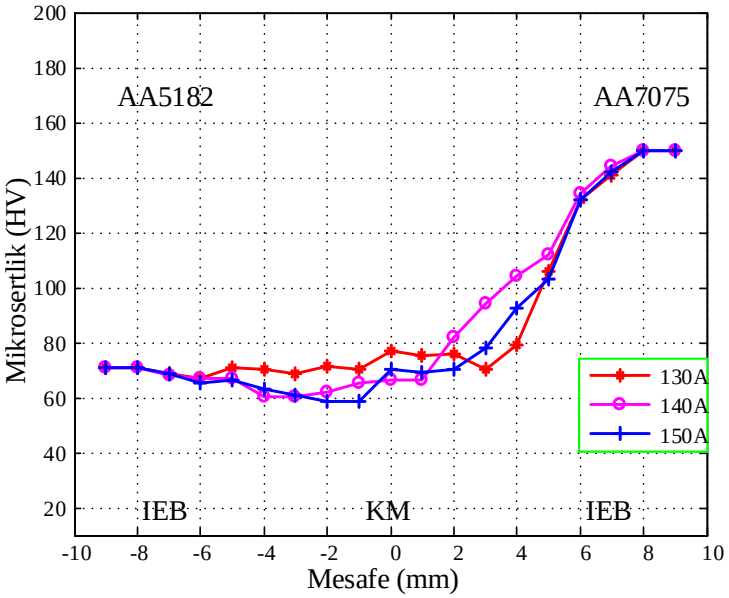

**Şekil 5.43.** TIG-V-12 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri



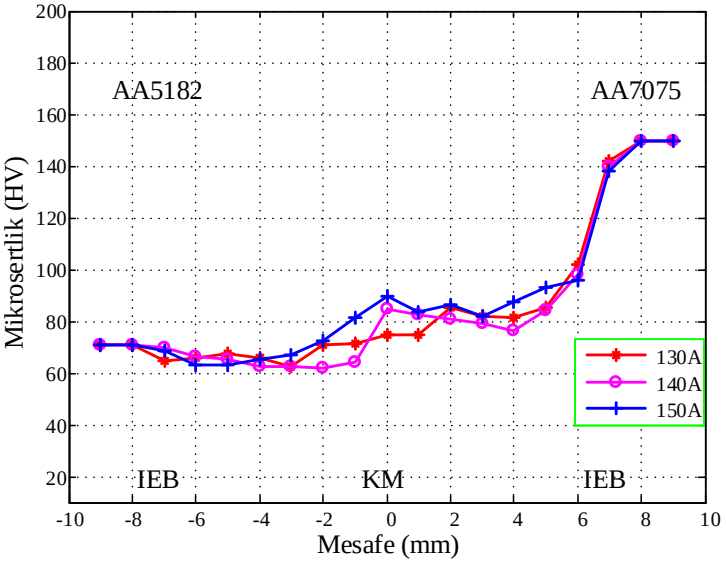

**Şekil 5.44.** TIG-V-17 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri

Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te EM'den KM'ye doğru ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında IEB bölgelerinde ani düşmelerin olduğu, KM bölgesine doğru sertliklerin artığı görülmüştür. Bu artış KM bölgesinde ince taneli yapının oluşmasından kaynaklanmaktadır. EM'lerin sertliği KM'den daha yüksek olarak elde edilmiştir. Ancak AA5182 alaşım EM'sinin sertliği KM'ye daha yakındır. Ayrıca gaz debisinin sertlik üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Amper değerinin ise çok az derecede bir etkisi olmuştur.

Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da X kaynak ağzı açılarak farklı akım ve gaz debilerinde kaynakları yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının sertlik tarama eğrilerinin sonuçları verilmiştir.




**Şekil 5.45.** TIG-X-12 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri

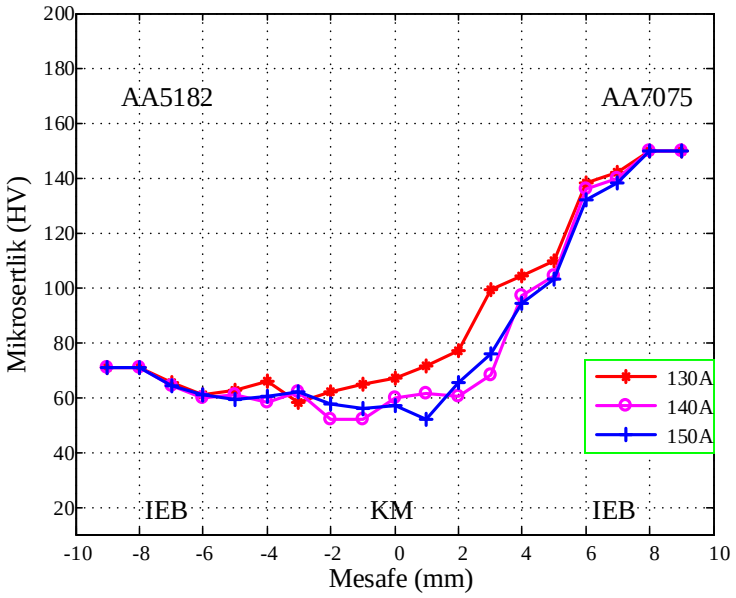



**Şekil 5.46.** TIG-X-17 lt/dk gaz debisi ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri

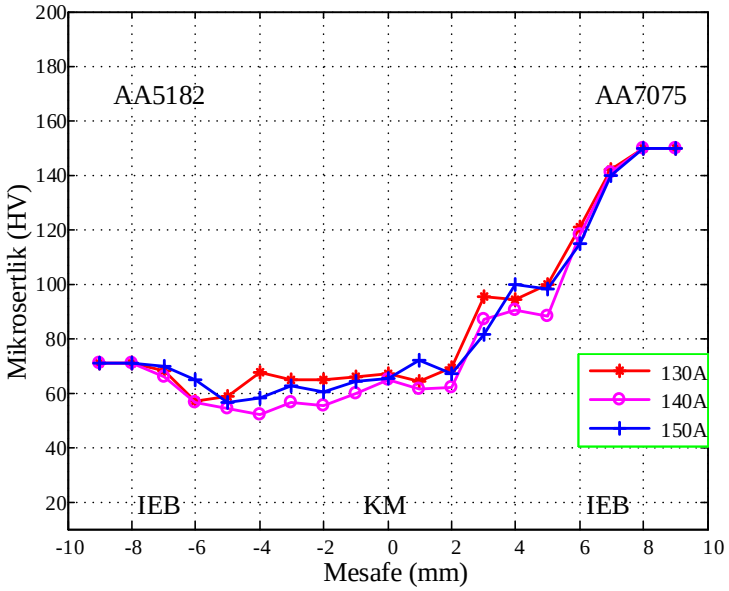
Şekil 5.45. ve Şekil 5.46'da EM'den KM'ye doğru ölçülen sertlik değerlerinde, IEB bölgelerinde ani düşmelerin olduğu, KM bölgelerinde ise artış olduğu görülmüştür. Ayrıca AA5182 alaşım malzemesinin sertliği KM'den daha düşük ölçülürken AA7075 alaşım malzemesinin sertliği KM'den daha yüksek ölçülmüştür. KM'deki en yüksek sertlik $Tx_{17}15$ kodlu numuneden elde edilse de V kaynağının aksine X kaynak ağzı açılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda gaz debisinin de çok az derecede bir etkisi olmuştur. Amper değeri arttıkça çok az da olsa sertliğin arttığı görülmüştür. Ayrıca farklı akım ve gaz debilerinde kaynakları yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının sertlik tarama eğrilerinde, X kaynak ağzı açılarak birleştirilen alaşımların V kaynak ağızı açılarak birleştirilen alaşımlardan farklı davranışlar sergilendiği görülmektedir. Bu durum X kaynak ağzı açılarak birleştirilen alaşımların her iki ağız tarafından akım ve gaz debisine maruz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.3.2. MIG kaynaklı bağlantılarının mikrosertlik sonuçları

Farklı akım, tel ilerleme hızı ve kaynak ağzı kullanılarak birleşimi yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının ana metalden birleşme merkezinden doğru çizgisel bir hat boyunca yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları, Şekil 5.47-Şekil 5.50'de verilmiştir.

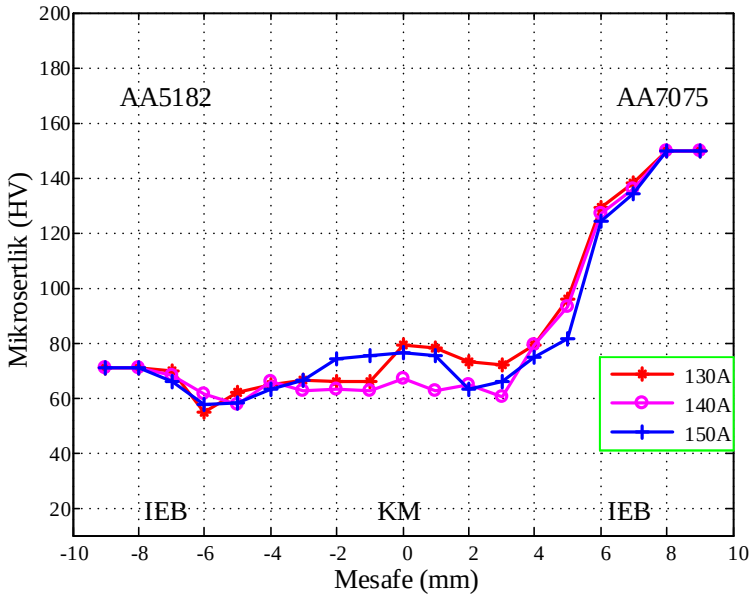



**Şekil 5.47.** MIG-V-38 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri

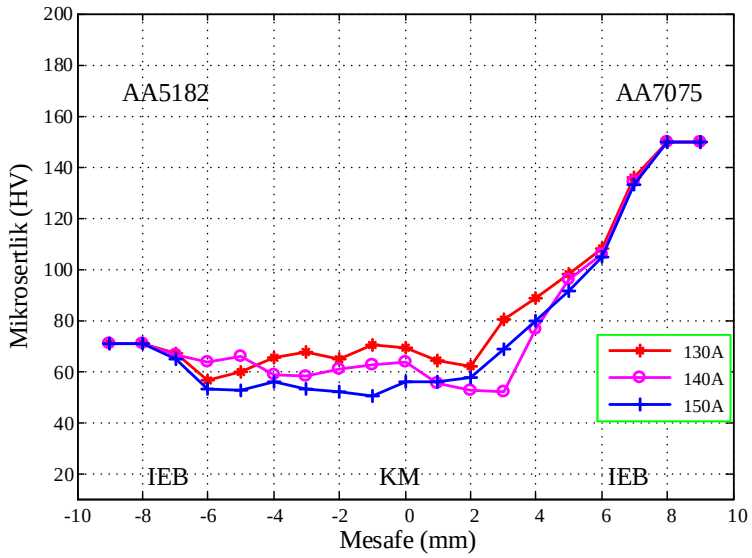



**Şekil 5.48.** MIG-V-45 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri

Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de görüldüğü gibi V kaynak ağızlı birleştirilmelerde EM'den KM'ye doğru giderken sertlik değerlerinin IEB bölgesinde düştüğü, IEB'den KM'ye doğru gidildikçe tekrardan sertlik değerlerin artığı görülmektedir. V kaynaklı birleşmelerde tel ilerleme hızının artması sertliği çok az miktarda arttırmıştır. Amperin artması ise kısmen sertliğin düşmesine neden olmuştur.




**Şekil 5.49.** MIG-X-38 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri



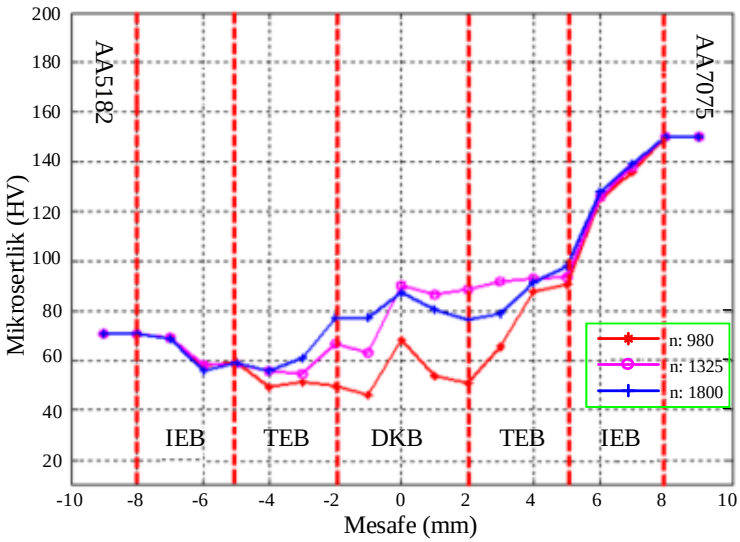

**Şekil 5.50.** MIG-X-45 cm/dk tel ilerleme hızı ve farklı amper parametresine ait mikrosertlik değerleri

X kaynak ağzı açılarak kaynakları yapılan numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında ise V kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi EM'den KM'ye doğru gidildikçe IEB'de ani düşmelerin olduğu, IEB'den KM'ye doğru gidildikçe tekrardan artığı görülmektedir. $M_{X45}13$ kodlu numunede en yüksek sertlik değeri 80,6 HV olarak elde edilmiştir.

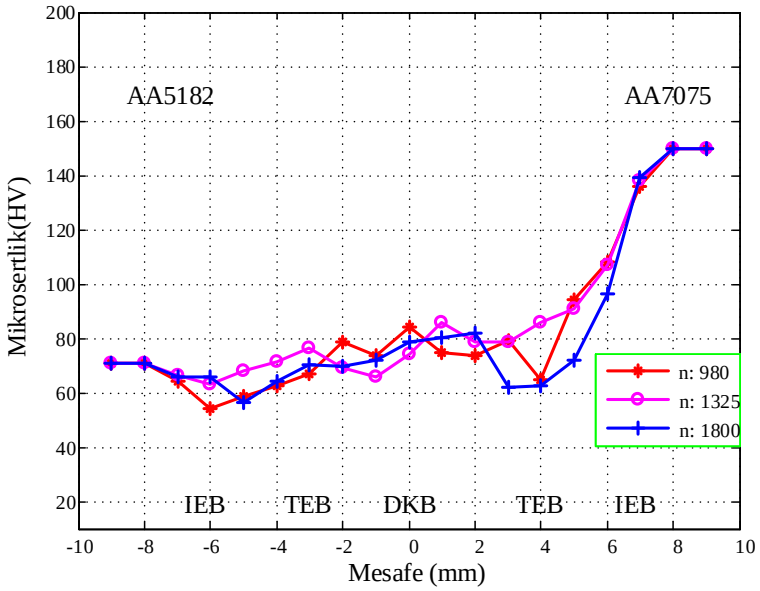
MIG kaynağında V ve X kaynak ağızlarının sertlik üzerinde çok az bir etkisinin olduğu görülmüştür. Ayrıca MIG kaynağı ile birleştirilen alaşımlarda sertlik değeri TIG kaynağı ile birleştirilen alaşımlardan daha düşük olarak elde edilmiştir.

### 5.3.3. FSW kaynaklı bağlantılarının mikrosertlik sonuçları

Farklı dönme devri, ilerleme hızı ve karıştırıcı uç profili kullanılarak birleşimi yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının EM'den birleşme çizgisine ve birleşme çizgisinden EM'ye doğru çizgisel bir hat boyunca yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 5.51-Şekil 5.54'te verilmiştir. Konik ve Üçgen profilli karıştırıcı uç ile birleşimi yapılan bütün numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, literatüre uygun bir şekilde sertlik dağılımının dört farklı bölgede değiştiği görülmüştür. Kaynak bölgelerinde (IEB, TEB ve DKB) farklı ölçüm sonuçlarının elde edildiği ancak EM'ye ulaşıldığında, farklı tiplerdeki alüminyum alaşımlarının ana sertlik değerlerine yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Şekil 5.51 ve Şekil 5.52 konik karıştırıcı ucun kullanıldığı birleştirmelerin farklı bölgelerinde oluşan sertlik değişim grafiği verilmiştir.



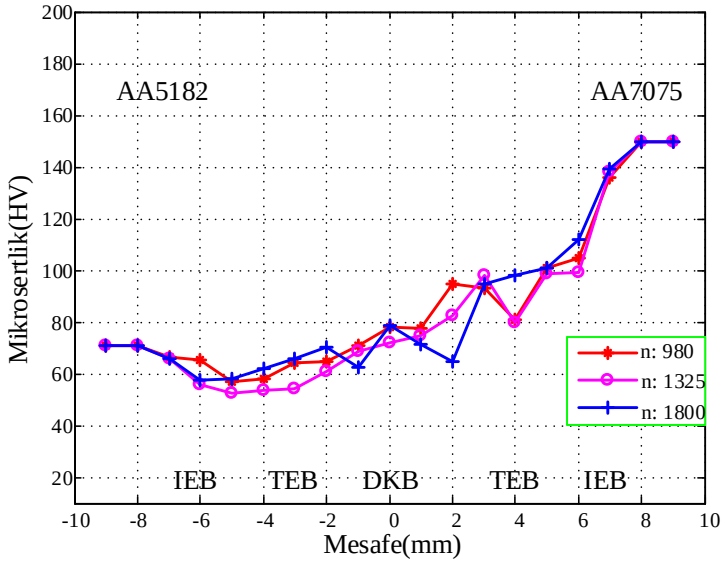

**Şekil 5.51.** FSW-$f_i$:108 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Konik uç)



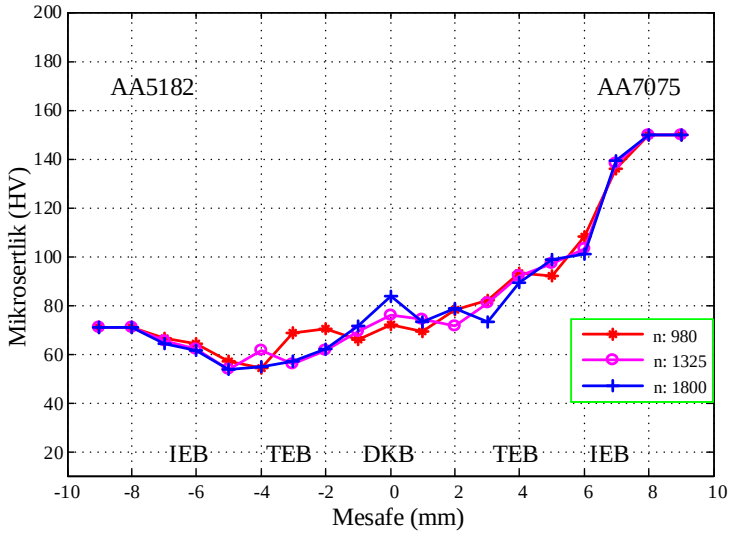

**Şekil 5.52.** FSW-$f_i$:233 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Konik uç)

Şekil 5.51'de artan dönme devri az da olsa sertliğin artmasına neden olmuştur. Ancak kaynak ilerleme hızının artmasıyla kısmi olarak sertlik düşmüştür. Kaynak ilerleme hızı ve dönme devir sayısı değişkenlerin etkileri beraber değerlendirildiğinde, yapılan birleştirmelerin sertlik değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca DKB bölgesindeki sertliği TEB bölgelerinden daha yüksek elde edilmiştir.

Şekil 5.53 ve Şekil 5.54 üçgen karıştırıcı ucun kullanıldığı birleştirmelerin farklı bölgelerinde oluşan sertlik değişim grafiği verilmiştir.




**Şekil 5.53.** FSW-$f_i$:108 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Üçgen uç)




**Şekil 5.54.** FSW-$f_i$:233 mm/dk ilerleme ve farklı dönme devirlerine ait mikrosertlik değerleri (Üçgen uç)

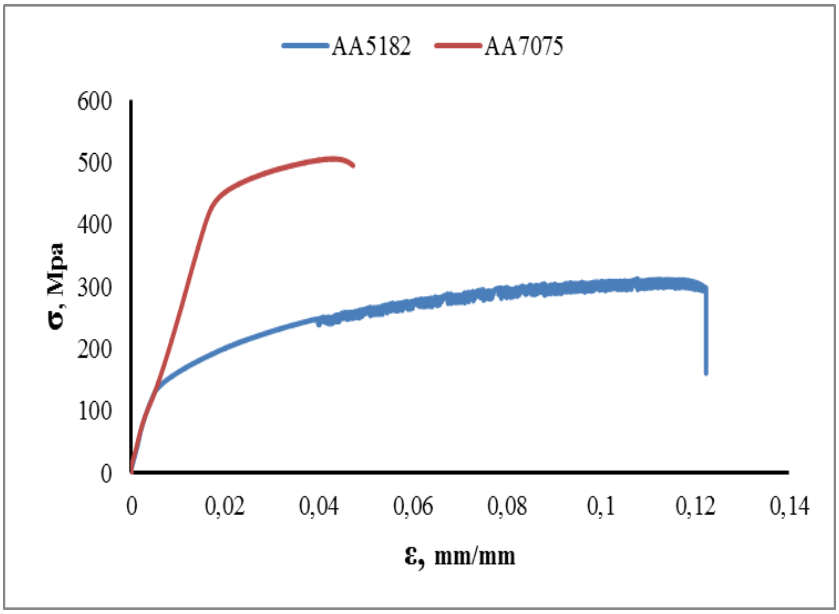
Şekil 5.53 ve Şekil 5.54'deki üçgen karıştırıcı uç kullanılarak farklı dönme devri ve kaynak ilerleme hızları ile birleştirilen numunelerin sertlik grafikleri incelendiğinde ise sertliğin, kaynak birleştirme bölgesinden AA7075 alaşım EM'sine doğru artığı görülmektedir. Artan kaynak ilerleme hızı ve dönme devri az da olsa sertliği arttırmıştır. Ayrıca AA5182 alaşım EM bölgesine yakın TEB bölgesinde minimum sertlik değeri elde edilmiştir. Bu TEB'den DKB'ye gidildikçe sertlik değerinde keskin bir yükseliş gözlemlenmiştir. DKB'deki bu yükselme AA5182 EM'nin sertlik değerinden yüksek, AA7075 EM'nin sertlik değerinden daha düşük bir değerdir. DKB bölgesinden AA7075 EM'ni TEB'ine doğru gidildikçe sertlik bir miktar düşmüş daha sonra tekrar artmaya başlamıştır. Üçgen karıştırıcı uç kullanılarak birleştirilen tüm kaynaklı yapılarda benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Karıştırıcı uçların karıştırma yaptığı kaynak merkezindeki sertlik değerlerinde yükselişlerin olması ve hatta bütün numunelerde dönme yönünün bir etkisi sonucu olarak kaynak merkezindeki sertliğin maksimum değerlere ulaşması bu bölgelerde plastik deformasyon ve şiddetli ekstrüzyon sonucu ortaya çıkan tane küçülmesinin ve pekleşmenin sertlik değerlerini artırdığı düşünülmektedir. Ancak konik karıştırıcı uç kullanılarak birleştirilen numunelerin kaynak merkezindeki sertlik değerlerinin, üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilenlere göre biraz daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu farkın, iki karıştırıcı ucun karıştırma şekli arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Konik karıştırıcı uç kullanarak yapılan birleştirmelerde uç önündeki malzemeyi helisel konik olukları yardımıyla birbirine karıştırarak geriye doğru iterken üçgen karıştırıcı uç önündeki malzemeyi, ilerleme hızına bağlı olarak kaynak yönünde geriye doğru iterek ilerler. Karıştırıcı uçlardaki bu mekanizmalar, kaynaklı bağlantıların DKB'deki sertlik değerlerini etkilemektedir.

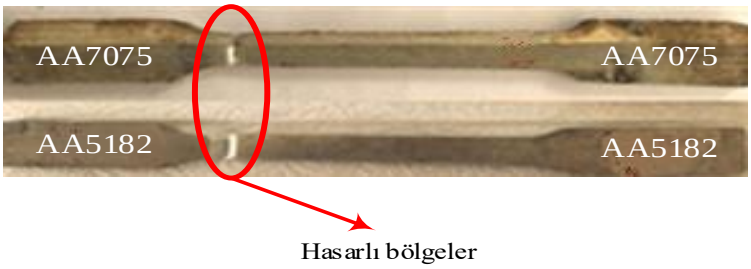
### 5.4. Kaynaklı Bağlantıların Çekme sonuçları

TIG, MIG ve FSW yöntemleri kullanılarak farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen AA7075 ve AA5182 alaşımlarının makro ve mikroyapıları ile sertlik değerleri tespit edildikten malzemeler çekme testine tabi tutulmuştur. Kaynak parametrelerinin çekme dayanımı üzerine etkilerini analiz edebilmek için öncelikle kaynak işlemi yapılmamış AA5182 ve AA7075 alaşımlarının çekme testi yapılmıştır. Daha sonra kaynaklı birleştirmelerin çekme testleri yapılarak çekme dayanımları ve çekme sonrası oluşan hasar bölgeleri bir birleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak çekme testi sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 5.55'te kaynak yapılmamış AA5182 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının çekme testi sonucu oluşan gerilme-birim uzama grafiği, Şekil 5.56'da ise bu alaşımlarının çekme sonucu hasara uğramış görüntüleri verilmiştir.

Şekil 5.55'te kaynak işlemi yapılmamış AA5182 ve AA7075 alaşımlarının çekme eğrilerinden görüldüğü gibi AA7075 alaşımı AA5182 alaşımından daha fazla yükte hasara uğradığı ve daha az uzama gösterdiği görülmektedir. Bu durum Tablo 4.2'de verilen mekanik özelliklerle karşılaştırıldığında AA7075 alaşımının AA5182 alaşımından daha yüksek çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve daha az uzama gösterdiğini sergilemektedir.




**Şekil 5.55.** Alaşım malzemelerinin çekme-uzama eğrileri



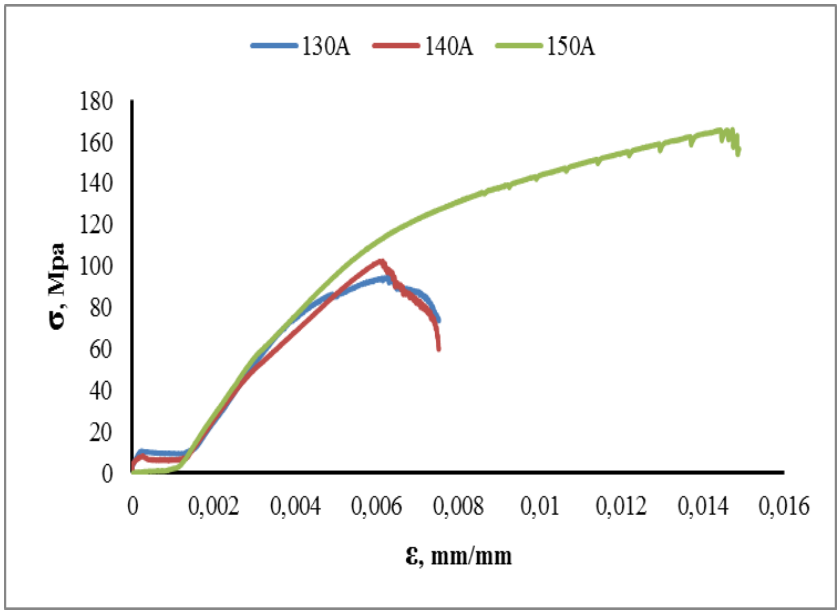

**Şekil 5.56.** AA5182-AA7075 numunelerde çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler

Çekme deneylerinde, hasarlı bölgenin çekme numunesinin ortasına yakın yerlerde oluşması gerekmektedir. Şekil 5.56'da AA5182 ve AA7075 alaşımlarının çekme numunelerindeki hasarın çekme çenelerine yakın bölgelerde oluştuğu görülmüştür. Bu durum, çekme numunesinin hazırlanması veya çekme deneyi ortam şartlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu gibi olumsuzluklar çekme deneyi esnasında elde edilen mukavemet değerlerinin Tablo 4.2'de malzemenin temin edildiği firma tarafından verilen mekanik özelliklerden kısmen düşük olmasına neden olmuştur.

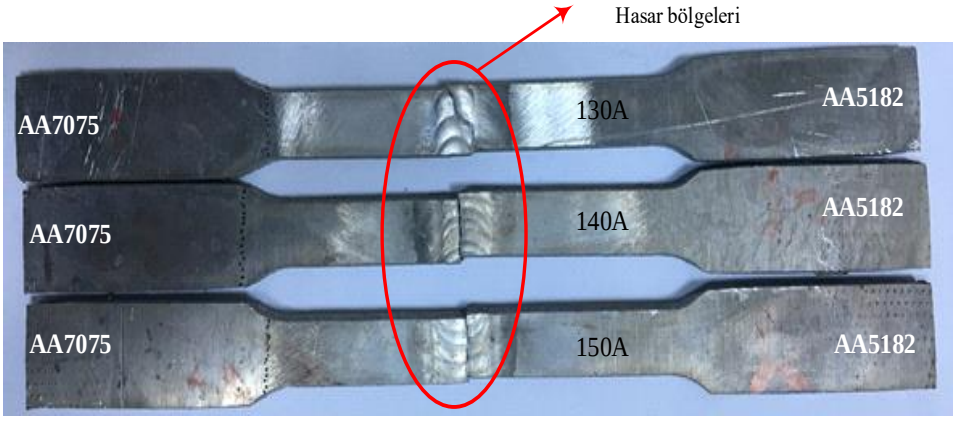
### 5.4.1. TIG kaynaklı bağlantılarının çekme sonuçları

Farklı kaynak parametreleri ve kaynak ağzı ile TIG kaynağı ile birleşimi yapılan AA5182/AA7075 alaşımlarının çekme testi sonucu oluşan gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 5.57, Şekil 5.59, Şekil 5.61 ve Şekil 5.63'de verilmiştir. Şekil 5.58,

Şekil 5.60, Şekil 5.62 ve Şekil 5.64'te ise bu kaynaklı alaşımlarının çekme sonucu hasara uğramış görüntüleri verilmiştir.



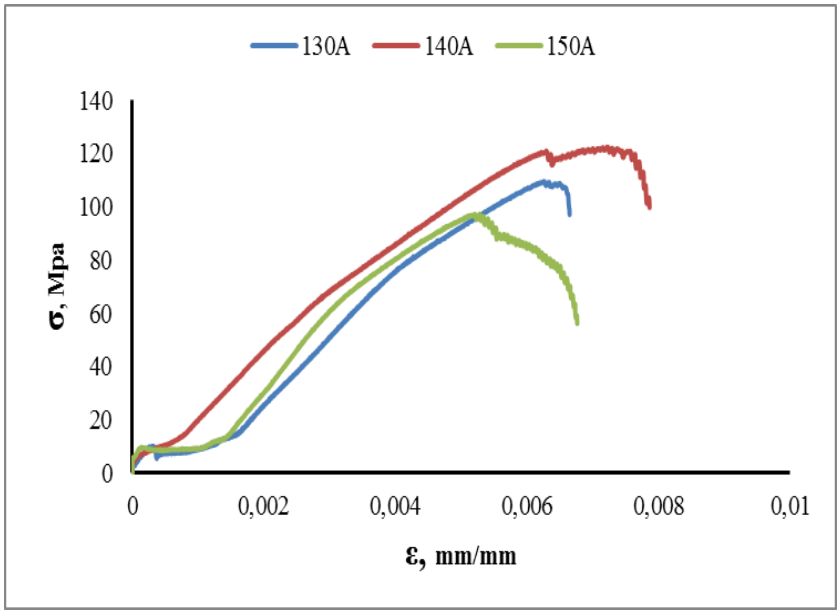

**Şekil 5.57.** TIG-V-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri



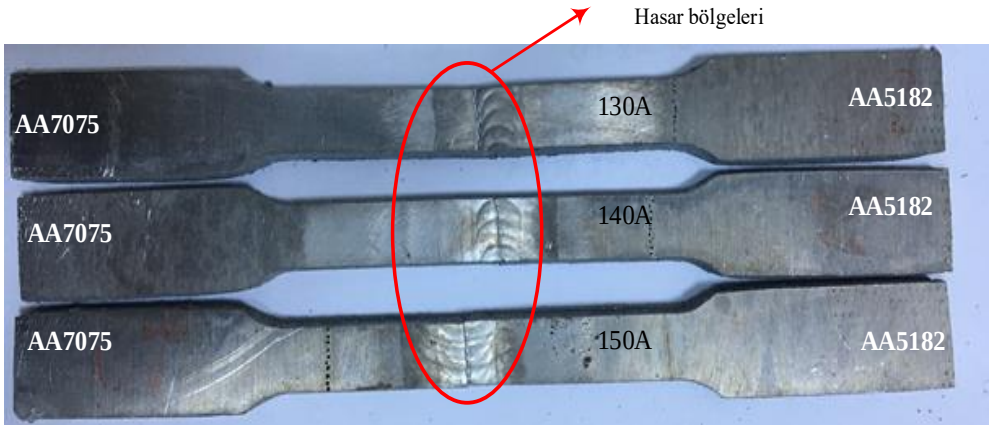

**Şekil 5.58.** TIG-V-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler

Şekil 5.57'de 12 lt/dk gaz debisi için 130 ve 140A kaynak akımı değerlerinde, AA7075/AA5182 kaynaklı bağlantıların çekme test sonucu elde edilen mukavemet değerlerinin ve birim uzamalarının bir birine yakın olduğu görülmüştür. Ancak 150A kaynak akımında ise AA7075/AA5182 kaynaklı bağlantıların mukavemet değeri ve birim uzamasında belirgin bir artış olmuştur. 150A kaynak akımı ile birleştirilmiş AA5182 ve AA7075 alaşımlarının hasara uğrama gerilmesi 165,77 Mpa ve birim uzaması 0,015 mm'dir. Şekil 5.5'deki makro ve mikroyapı ile Şekil 5.30'daki SEM görüntülerinde KM ve KM ile EM arasındaki geçiş bölgesinde ince taneli homojen bir

yapının elde edilmesi kaynak nüfuziyetini arttırdığından dolayı 150A kaynak akımında çekme dayanımının yüksek olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.58'e çekme sonucu oluşan hasarlı yapıların makro görüntülerine bakıldığında kaynak akımı arttıkça kaynak dikişinin inceldiği ve hasarların sünek formda gerçekleştiği görülmüştür.



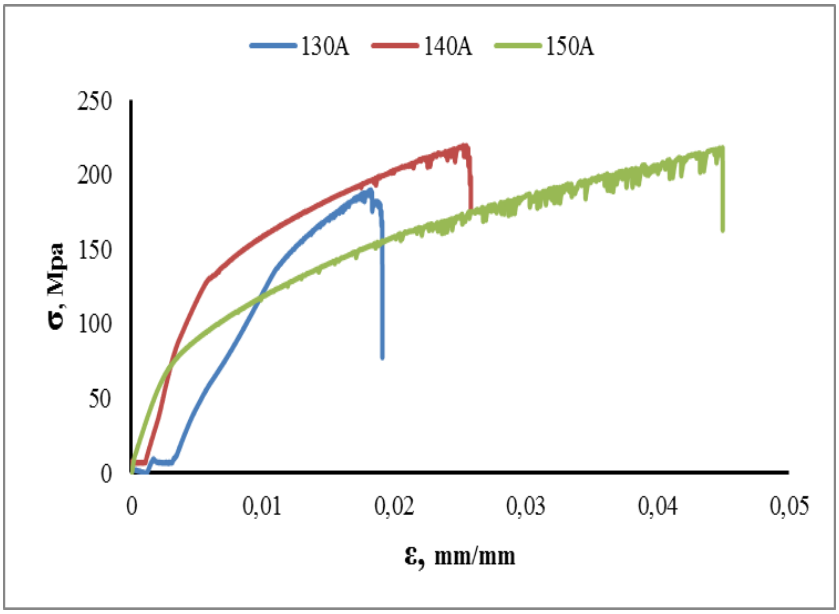

**Şekil 5.59.** TIG-V-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri



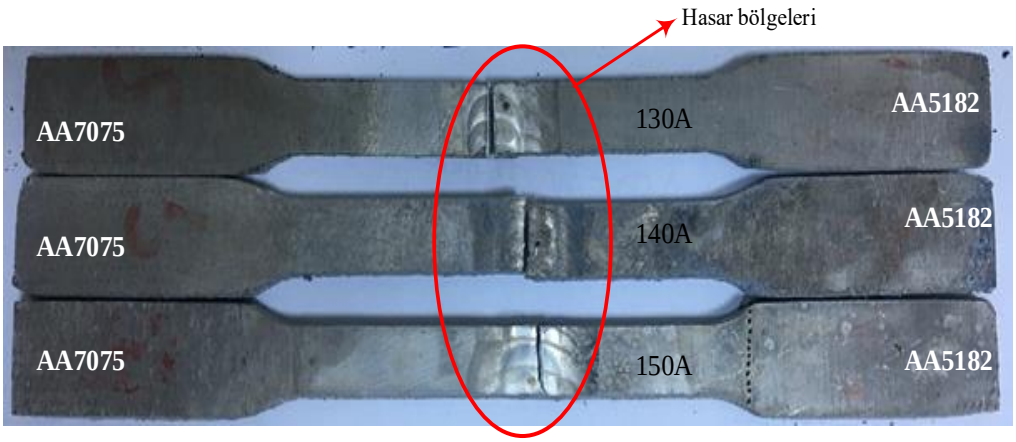

**Şekil 5.60.** TIG-V-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler

Şekil 5.59'da 17 lt/dk gaz debisi için farklı kaynak akımı değerlerinde, AA7075/AA5182 kaynaklı bağlantıların çekme test sonucu elde edilen mukavemet değerlerinin ve birim uzamalarının Şekil 5.58'de verilen 12 lt/dk gaz debisinden farklı davranış sergilediği görülmüştür. Başlangıçta kaynak akımının 130A'da 140A'ya çıkmasıyla çekme dayanımının arttığı, 150A'ya çıkmasıyla oldukça düştüğü görülmektedir. Maksimum çekme dayanımı 140A'dan elde edilirken minimum

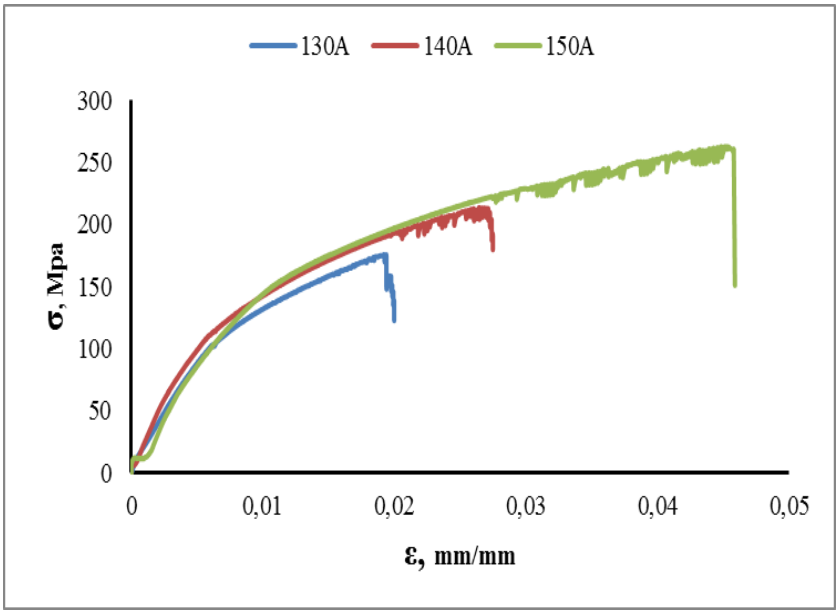
150A'dan elde edilmiştir. Şekil 5.60'da çekme sonucu oluşan hasarlı yapıların makro görüntülerine bakıldığında kopmaların gevrek forma yakın olduğu ve bu durumun KM'deki sertlik değerleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. 17 lt/dk gaz debisi ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların mikroyapısındaki taneler, 12lt/dk gaz debisi ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarınkinden daha iri ve heterojen bir yapıya sahip olduğu için 17 lt/dk gaz debisi ile birleştirilen kaynaklı bağlantının çekme dayanımı daha düşük elde edilmiştir.



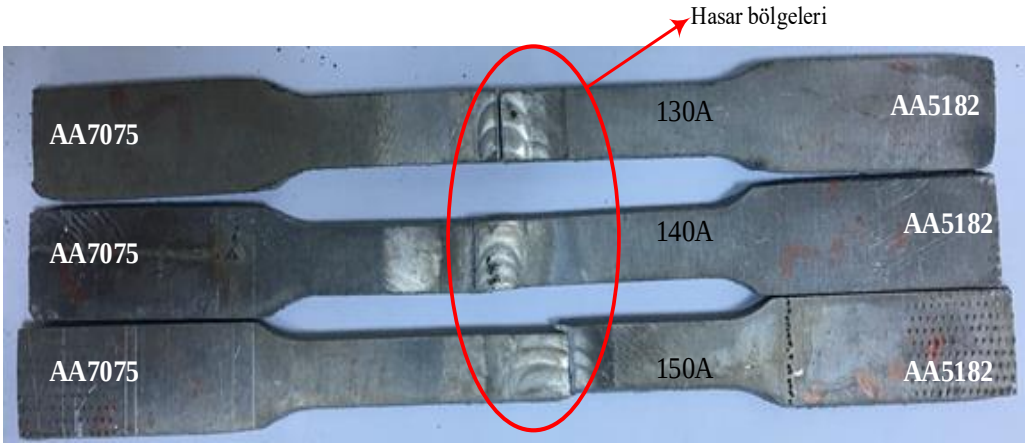

**Şekil 5.61.** TIG-X-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri




**Şekil 5.62.** TIG-X-12 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler




**Şekil 5.63.** TIG-X-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri




**Şekil 5.64.** TIG-X-17 lt/dk gaz debisi için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler

Şekil 5.61 ve Şekil 5.63'de X kaynak ağızları açılarak 12 lt/dk ve 17 lt/dk gaz debilerinde, 130, 140 ve 150A kaynak akımlarında kaynakları yapılmış AA5182 ve AA7075 alaşımların kaynaklı bağlantılarının çekme test sonuçlarından elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri, V kaynaklı bağlantılarınkinden (Şekil 5.57 ve Şekil 5.59) farklı olarak elde edilmiştir. X kaynak ağızları açılarak birleştirilen kaynaklı alaşımların çekme dayanımları yaklaşık V kaynaklı alaşımlarınkine göre %50 daha yüksek elde edilmiştir. V kaynaklı birleştirmelerin aksine 12 lt/dk ve 17 lt/dk gaz debileri için kaynak akımı arttıkça çekme dayanımı artmış olup maksimum çekme dayanımları 150A kaynak akımından elde edilmiştir. Şekil 5.61 ve Şekil 5.63'de birim uzama miktarına göre çekme sonucu Şekil 5.62 ve 5.64'de verilen hasara uğramış bölgelerde kopmanın boyun vererek gerçekleştiği görülmüştür.

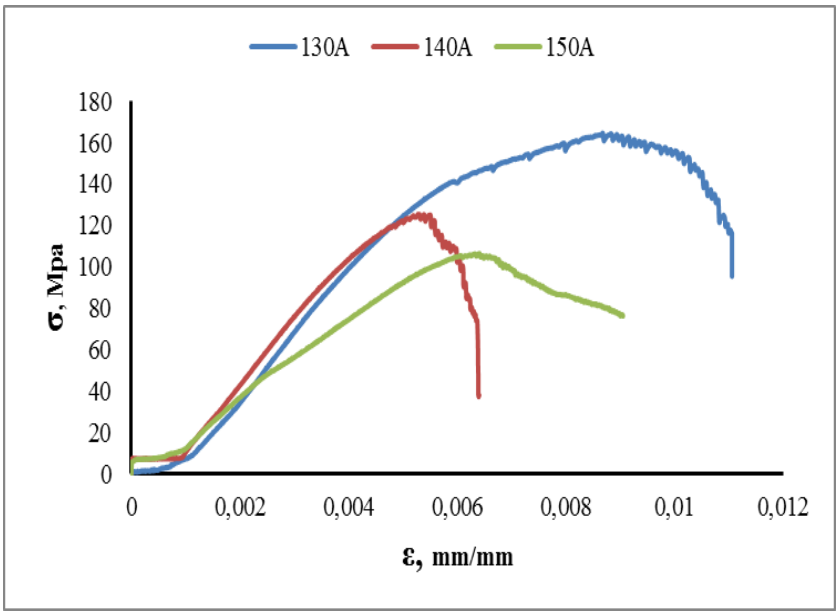
TIG kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde kaynakları yapılan alaşımların çekme dayanım değerleri Tablo 5.1'de toplu olarak verilmiştir.

**Tablo 5.1.** TIG kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları

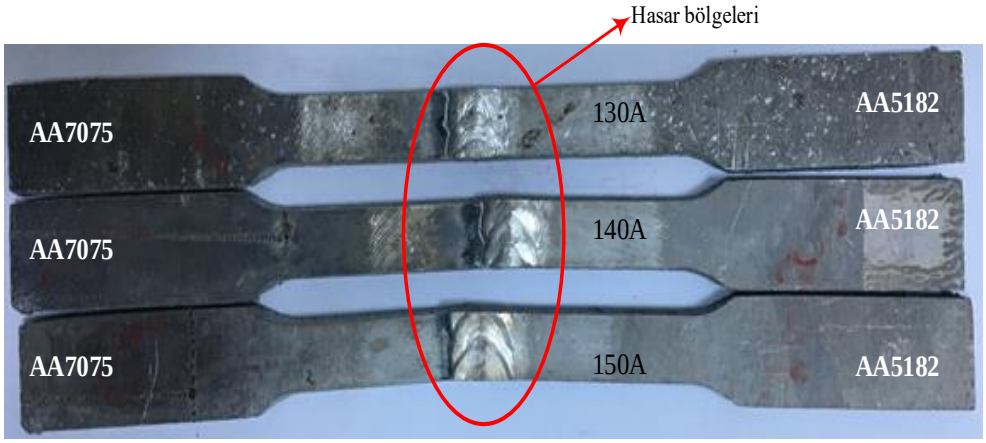
| Malzeme | Kaynak | Akım (A) | Gaz Debisi (lt/dk) | Çekme Dayanımı (MPa) | Kodlama |
|---|---|---|---|---|---|
| AA7075/AA5182 | TIG-V | 130 | 12 | 94,48 | $Tv_{12}13$ |
| | | | 17 | 109,14 | $Tv_{17}13$ |
| | | 140 | 12 | 116,5 | $Tv_{12}14$ |
| | | | 17 | 122,44 | $Tv_{17}14$ |
| | | 150 | 12 | 165,77 | $Tv_{12}15$ |
| | | | 17 | 97,31 | $Tv_{17}15$ |
| | TIG-X | 130 | 12 | 181,63 | $Tx_{12}13$ |
| | | | 17 | 187,85 | $Tx_{17}13$ |
| | | 140 | 12 | 219,81 | $Tx_{12}14$ |
| | | | 17 | 209,72 | $Tx_{17}14$ |
| | | 150 | 12 | 218,31 | $Tx_{12}15$ |
| | | | 17 | 262,87 | $Tx_{17}15$ |

### 5.4.2. MIG kaynaklı bağlantılarının çekme sonuçları

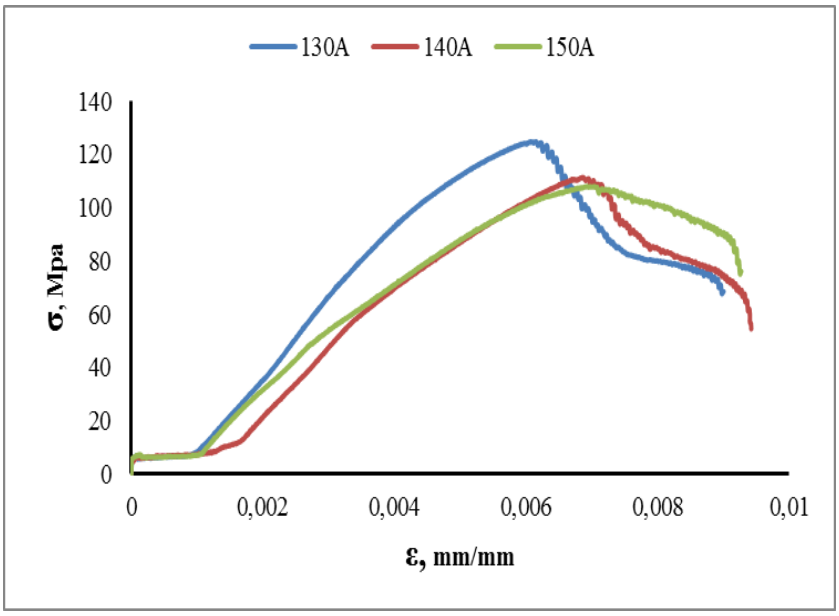
AA7075 ve AA5182 alaşımları iki farklı tel ilerleme hızı, iki farklı kaynak ağzı ve üç farklı kaynak akım parametrelerinde MIG yöntemi ile kaynakları yapılmıştır. Şekil 5.65, 5.67, 5.69 ve 5.71'de seçilen bu parametrelerde kaynakları yapılmış AA7075/AA5182 alaşımlarının çekme testi sonucu oluşan gerilme-birim uzama grafikler, Şekil 5.66, 5.68, 5.70 ve 5.72'de ise bu kaynaklı alaşımlarının çekme sonucu hasara uğramış görüntüleri verilmiştir.



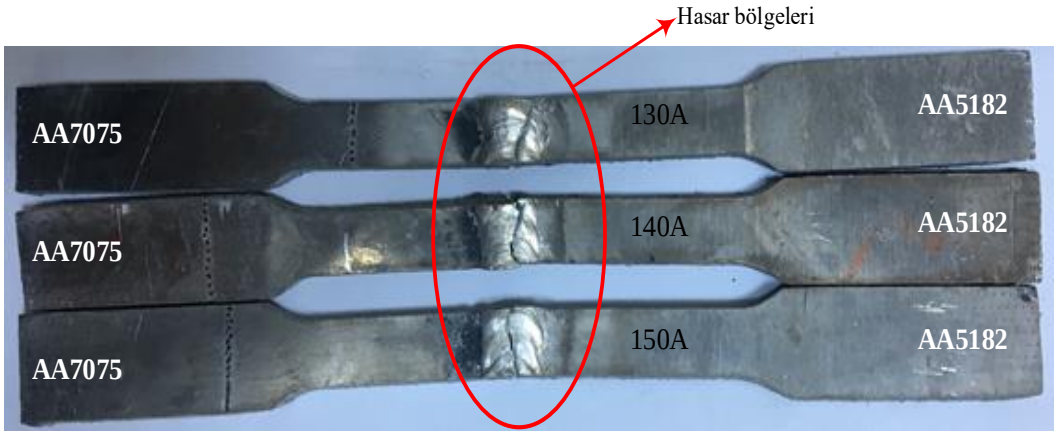

**Şekil 5.65.** MIG-V-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri




**Şekil 5.66.** MIG-V-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler



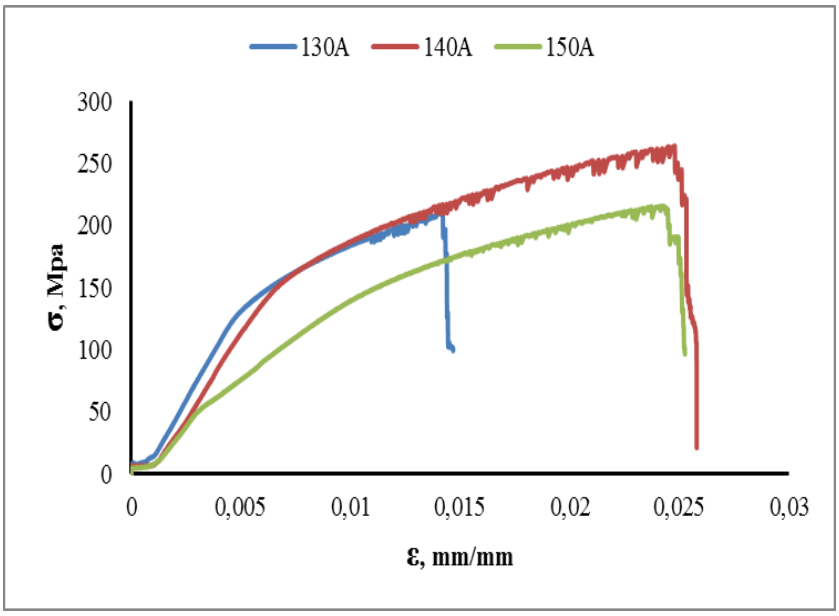

**Şekil 5.67.** MIG-V-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri



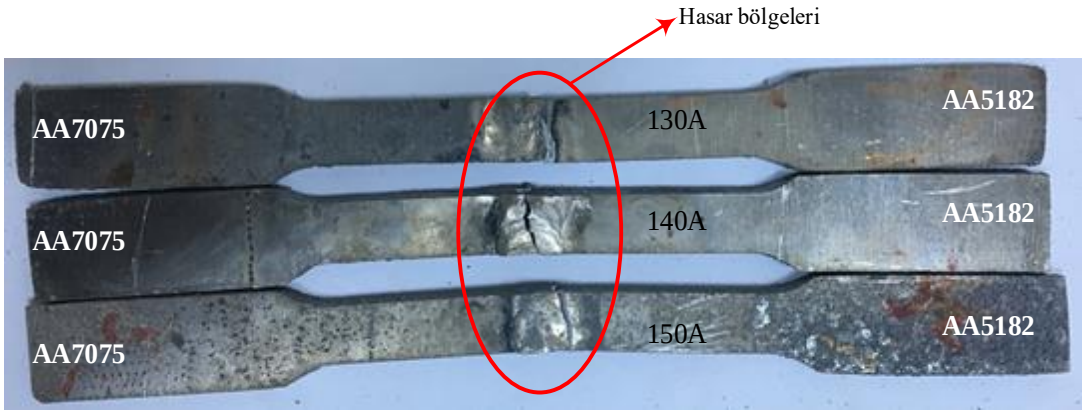

**Şekil 5.68.** MIG-V-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler

AA7075 ve AA5182 alaşımlarının farklı akım ve tel ilerleme hızlarında MIG-V birleştirme yönteminde çekme-birim uzama grafikleri ve çekme kopma sonrası oluşan kopma yüzeylerinin fotoğraflarında bakıldığında; kaynak akımının ve tel ilerleme hızının artması, birleşme bölgeleri üzerinde olumsuz bir durum oluşturduğu Şekil 5.66. ve Şekil 5.68'de görülmüştür. 130A ve 38 cm/dk tel ilerleme hızında AA5182 ve AA7075 alaşımlarının hasara uğrama gerilmesinin 164,62 Mpa ve birim uzamasının 0.011 mm olarak en yüksek değerlerde elde edildiği görülmüştür. 140A ve 150A ile birleştirilmiş alaşımlarının hasara uğrama gerilmeleri daha düşük olarak elde edilmiştir. Ayrıca birleşme bölgelerinin mikroyapı ve SEM fotoğraflarında düşük amper ve tel ilerleme hızında en iyi birleşmenin sağlanması bu durumun doğruluğunu kanıtlamaktadır.

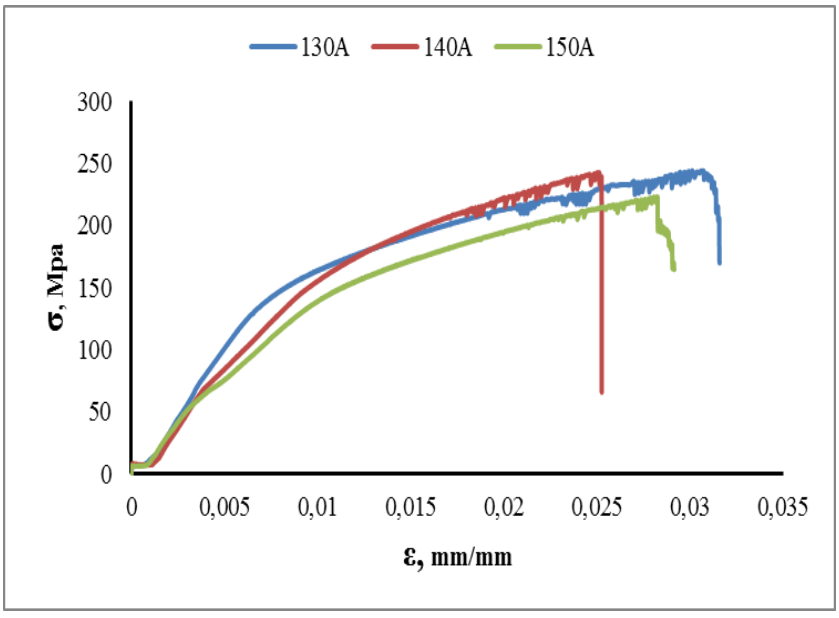
Çekme numunelerinin kopma bölgelerine bakıldığında 38 cm/dk tel ilerleme hızında (Şekil 5.66) yapılan birleştirmelerde kopmanın IEB bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. 45 cm/dk tel ilerleme hızında ise kopma KM'de oluşmuştur.



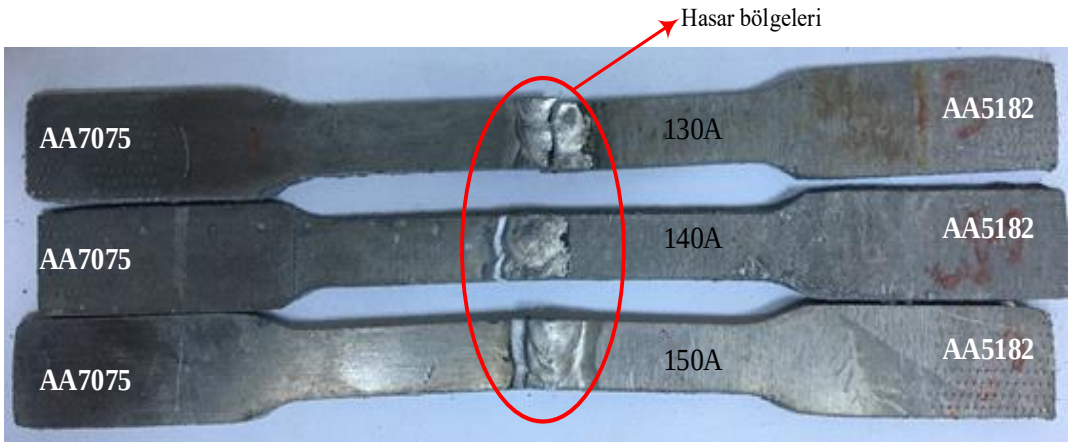

**Şekil 5.69.** MIG-X-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri




**Şekil 5.70.** MIG-X-38 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler




**Şekil 5.71.** MIG-X-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme-uzama eğrileri




**Şekil 5.72.** MIG-X-45 cm/dk tel ilerleme hızı için ampere bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler

AA7075 ve AA5182 alaşımlarının farklı akım ve tel ilerleme hızlarında yapılan MIG-X birleşmelerin çekme birim uzama grafiklerine bakıldığında MIG-V birleşme yönteminden elde edilen çekme birim uzama grafiklerinden farklı bir davranış gösterdiği görülmüştür. MIG-X birleşme yönteminde ortaya çıkan sonuçlar incelendiğinde artan kaynak akımı ile parçaların çekme dayanımının kısmen arttığı görülmüştür. Bunun dışında tel ilerleme hızının artması ile de çekme dayanımında artışlar olduğu görülmüştür. Literatürde artan tel ilerleme hızının mukavemette artışa neden olduğu bunun nedeninin ise tel hızı artışından dolayı kaynak dikişinde biriken ilave metalin çekme dayanımını olumlu etkilediği belirtilmiştir (Liu, 2013). Bir başka çalışmada da ilave telin kimyasal bileşiminin dayanımı artırdığı belirtilmiştir (Taban, 2005).

Numunelerinin kopma bölgelerine bakıldığında, 38 cm/dk tel ilerleme hızıyla yapılan birleştirmelerde kopmanın daha düşük mekanik özelliklere sahip KM'de (Şekil 5.70), 45 cm/dk tel ilerleme hızında yapılan birleşmelerde ise kopmanın IEB'de (Şekil 5.72) olduğu görülmüştür.

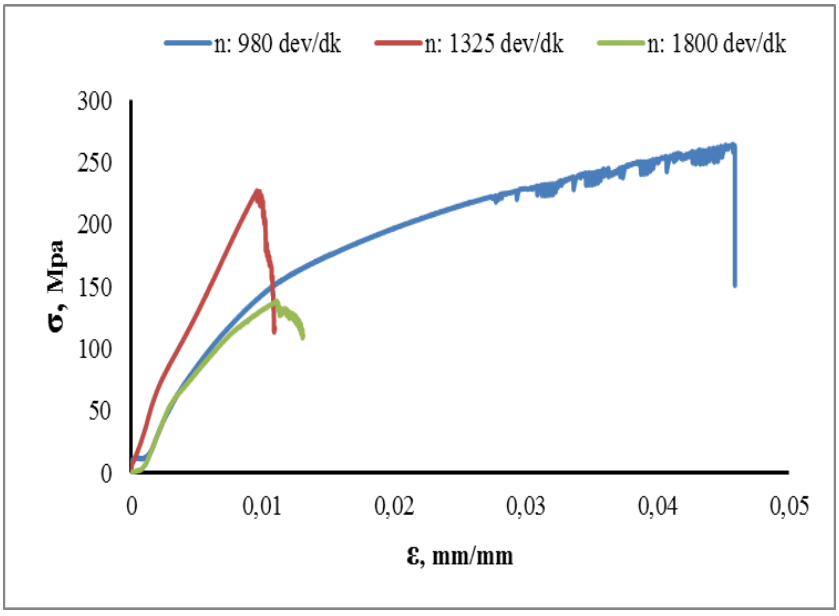
MIG kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde kaynakları yapılan alaşımların çekme dayanım değerleri Tablo 5.2'de toplu olarak verilmiştir.

**Tablo 5.2.** MIG kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları

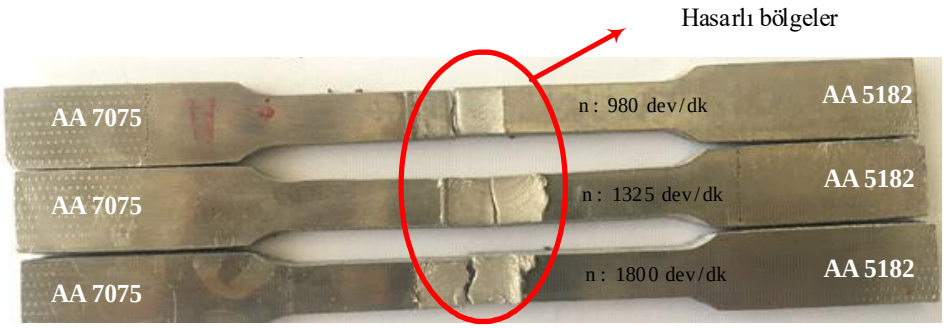
| Malzeme | Kaynak | Akım(amper) | Tel İlerleme Hızı (cm/dk) | Çekme Dayanımı (MPa) | Kodlama |
|---|---|---|---|---|---|
| AA7075/AA5182 | MIG-V | 130 | 38 | 164,62 | $Mv_{38}13$ |
| | | | 45 | 124,88 | $Mv_{45}13$ |
| | | 140 | 38 | 125,5 | $Mv_{38}14$ |
| | | | 45 | 111,5 | $Mv_{45}14$ |
| | | 150 | 38 | 113,5 | $Mv_{38}15$ |
| | | | 45 | 108,13 | $Mv_{45}15$ |
| | MIG-X | 130 | 38 | 189,75 | $Mx_{38}13$ |
| | | | 45 | 260,69 | $Mx_{45}13$ |
| | | 140 | 38 | 256,22 | $Mx_{38}14$ |
| | | | 45 | 225,84 | $Mx_{45}14$ |
| | | 150 | 38 | 190,65 | $Mx_{38}15$ |
| | | | 45 | 222 | $Mx_{45}15$ |

### 5.4.3. FSW kaynaklı bağlantılarının çekme sonuçları

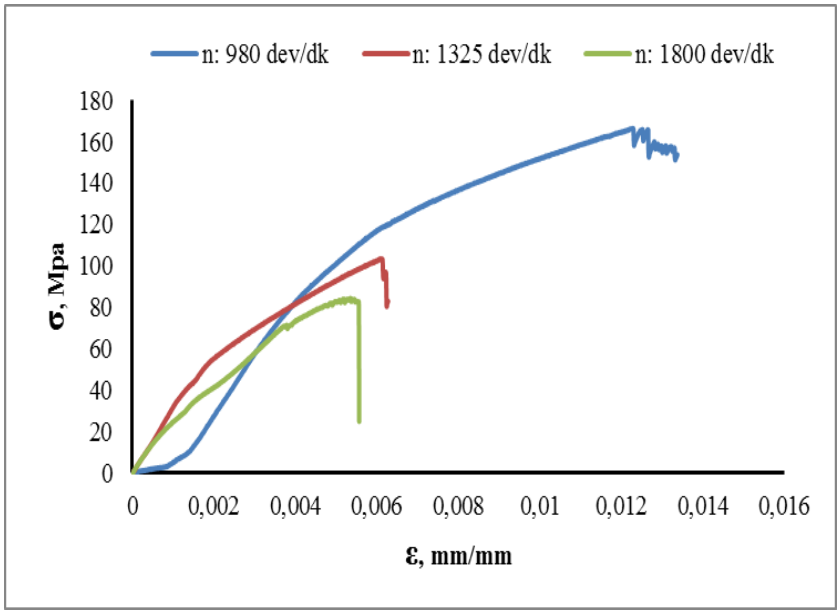
AA7075 ve AA5182 alaşımlarının konik ve üçgen karıştırıcı uç kullanılarak FSW yöntemi ile birleştirilmesinde; farklı kaynak parametrelerinin kaynaklı alaşımların çekme özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Şekil 5.73 ve Şekil 5.75'de konik uç kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda kaynak parametrelerinin çekme testi sonucu oluşan gerilme-birim uzama grafikleri, Şekil 5.74 ve 5.76'da ise çekme sonucu hasara uğramış görüntüleri verilmiştir.



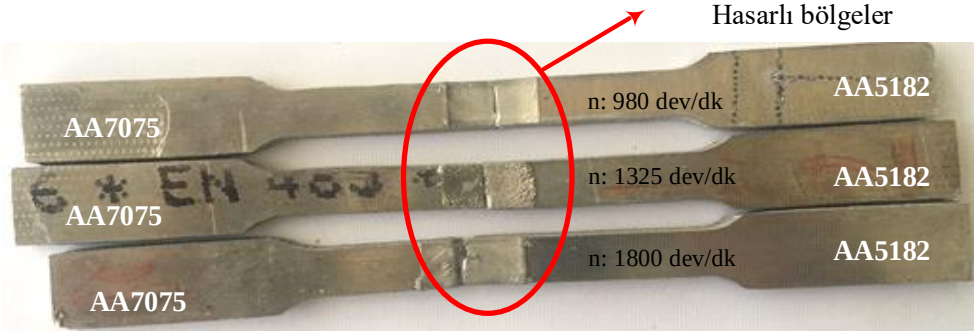

**Şekil 5.73.** FSW-$f_i$:108 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Konik uç)




**Şekil 5.74.** FSW'de $f_i$: 108 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Konik uç)




**Şekil 5.75.** FSW-$f_i$:233 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Konik uç)

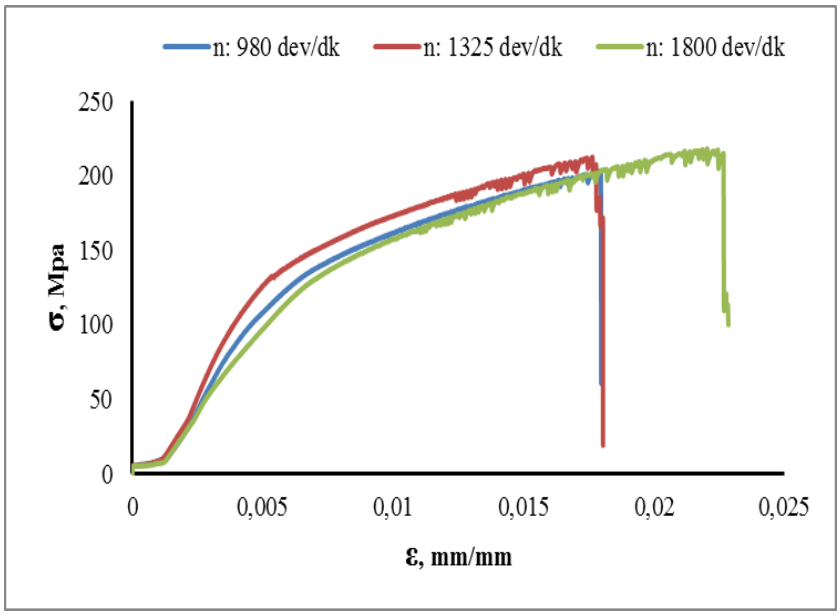



**Şekil 5.76.** FSW'de $f_i$: 233 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Konik uç)

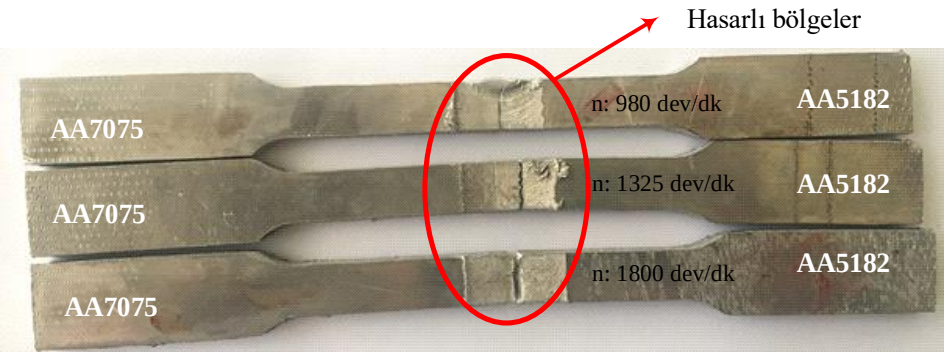
Konik karıştırıcı ucun kullanıldığı FSW bağlantılarında, kaynak ilerleme hızı ve dönme devrine bağlı gerilme-birim uzama grafiklerine bakıldığında, dönme devrinin ve kaynak ilerleme hızının artışına bağlı olarak numunelerin daha düşük dayanım gösterdiği görülmektedir. En iyi çekme değeri Şekil 5.73'te görüldüğü gibi 980 dev/dk dönme devri ve 108 mm/dk kaynak ilerleme hızı parametrelerinde 264.75 Mpa olarak elde

edilmiştir. Konik karıştırıcı uçlu takımda 980 dev/dk dönme devri ve 108 mm/dk kaynak ilerleme hızında birleştirilen numunede en iyi çekme değerinin diğer bir değişle hasar kuvvet değerinin elde edilmesinin nedeni karıştırma görevini yapan konik kanalların malzemeyi daha iyi karıştırmasıdır. Daha iyi karışımın devir başına taşınan ve geriye doğru ekstrüze edilen malzeme miktarındaki artışın olmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Ayrıca konik karıştırıcı uçtaki helisel oluklar sayesinde ekstrüze edilen bu malzeme miktarındaki artış, plastik deformasyonun şiddetlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum kaynaklı alüminyum alaşım bağlantılarında pekleşmeye, mekanik özelliklerde iyileşmeye ve alüminyum alaşım tane yapısının küçülmesine yardımcı olur. Alaşım yapısındaki tanelerin küçülmesi ve pekleşme işlemi düşük alüminyum alaşımlarında mekanik özellikleri kısmen olumsuz etkilese de çekme deneylerinden elde edilen sonuçlardan helisel oluklarının malzemenin karışımında önemli bir rol oynadığı düşünülebilir. Özarpa (2005) ve Fujii (2006)'da yaptıkları çalışmada helisel kanalların malzemenin karışmasında önemli bir rol oynadığını belirtmiştir. Şekil 5.74 ve Şekil 5.76'da çekme sonrası oluşan hasar bölgelerine bakıldığında ise numunelerin boyun vererek kaynak bölgesinde sünek formda koptuğu görülmüştür.

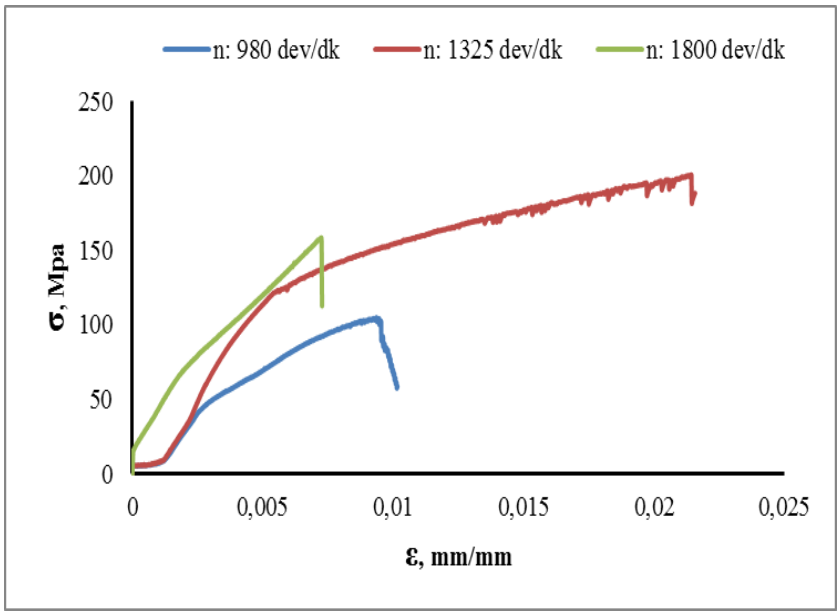
Şekil 5.77 ve Şekil 5.79'de üçgen uç kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda kaynak parametrelerinin çekme testi sonucu oluşan gerilme-birim uzama grafikleri, Şekil 5.78 ve 5.80'de ise çekme sonucu hasara uğramış görüntüleri verilmiştir.



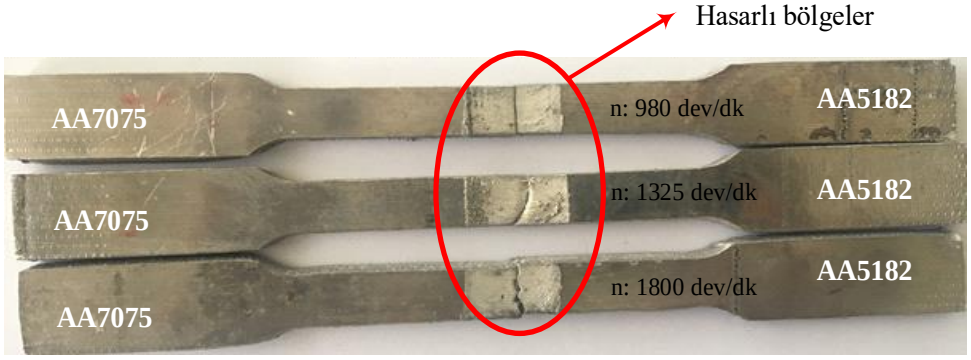

**Şekil 5.77.** FSW-$f_i$:108 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Üçgen uç)




**Şekil 5.78.** FSW'de $f_i$: 108 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Üçgen uç)




**Şekil 5.79.** FSW-$f_i$:233 mm/dk kaynak hızı ve dönme devirlerine bağlı çekme-uzama egrileri (Üçgen uç)




**Şekil 5.80.** FSW'de $f_i$: 233 mm/dk kaynak hızı için dönme devrine bağlı çekme sonrası oluşan hasarlı bölgeler (Üçgen uç)

Üçgen karıştırıcı ucun kullanıldığı FSW bağlantılarında, kaynak ilerleme hızı ve dönme devrine bağlı gerilme-birim uzama grafiklerine bakıldığında, konik karıştırıcı uç ile yapılan birleşmelerden daha farklı davranışlar gösterdiği görülmektedir.

Üçgen karıştırıcı uçların konik karıştırıcı uçlara göre yeterli karışımı sağlamaması, üçgen karıştırıcı uçların çekme dayanımı üzerindeki verimini düşürmüştür.

FSW kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde kaynakları yapılan alaşımların çekme dayanım değerleri Tablo 5.3'te toplu olarak verilmiştir.

**Tablo 5.3.** FSW kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları

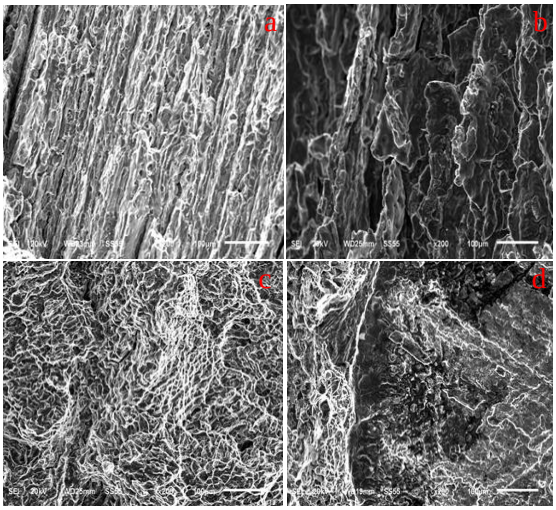
| Malzeme | Karıştırıcı Uç Profili | Dönme Devri (dev/dk) | İlerleme Hızı (mm/dk) | Çekme Dayanımı (MPa) | Kodlama |
|---|---|---|---|---|---|
| AA7075/AA5182 | Konik | 980 | 108 | 264,7 | $FSW_{k1}09$ |
| | | | 233 | 166 | $FSW_{k2}09$ |
| | | 1325 | 108 | 227 | $FSW_{k1}13$ |
| | | | 233 | 144 | $FSW_{k2}13$ |
| | | 1800 | 108 | 187,9 | $FSW_{k1}18$ |
| | | | 233 | 130,4 | $FSW_{k2}18$ |
| | Üçgen | 980 | 108 | 203 | $FSW_{u1}09$ |
| | | | 233 | 162,6 | $FSW_{u2}09$ |
| | | 1325 | 108 | 211 | $FSW_{u1}13$ |
| | | | 233 | 199 | $FSW_{u2}13$ |
| | | 1800 | 108 | 218,2 | $FSW_{u1}18$ |
| | | | 233 | 158,1 | $FSW_{u2}18$ |

## 5.5. Kaynaklı Bağlantıların Çekme Sonrası Oluşan Kırılma Yüzeyleri

TIG, MIG ve FSW yöntemleri ile birleşimi yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlı plakalardan ASTM-E8 standarda göre çıkarılan çekme numunelerin, çekme deneyleri sonucunda en iyi mukavemet değerinin elde edildiği numunelerin kopan yüzeyleri, SEM ile incelenerek, kırılma tipi ve kırık yüzey karakteristikleri belirlenmiştir.

### 5.5.1. TIG kaynaklı numunelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri

Şekil 5.81'de TIG kaynaklı numunelerden $Tv_{12}15$, $Tv_{12}13$, $Tx_{17}15$ ve $Tx_{12}13$ kodlu numelerin çekme sonrası oluşan kırık yüzeyleri verilmektedir.

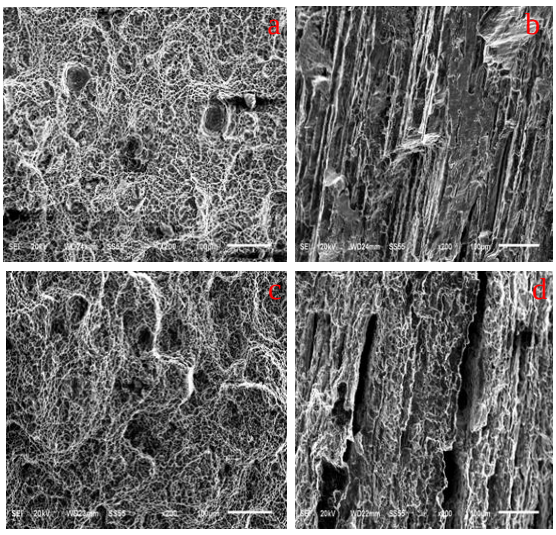



**Şekil 5.81.** TIG kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X)
(a:$Tv_{12}$ 15, b:$Tv_{12}$13, c:$Tx_{17}$15 ve d:$Tx_{12}$13)

Şekil 5.81'deki görüntülerden a: $Tv_{12}$15 ve c: $Tx_{17}$15 kodlu numunelerin kırılma yüzeylerinde kopan tanelerin homojen dağılımlı olduğu, bu yüzeylerde lokal farklı boyut ve biçimde mikro boşlukların meydana geldiği görülmektedir. a: $Tv_{12}$15 kodlu numunede sünek-gevrek kırılma mekanizmaları birlikte meydana gelmiştir. Ancak c: $Tx_{17}$15 kodlu numunenin kırılma mekanizması, kaynak akımının ve gaz debisinin olumlu etkisiyle tam sünek formda oluşmuştur. b: $Tv_{12}$13 ve d: $Tx_{12}$13 kodlu numunelerin kırılma yüzeylerinde ise daha geniş boşluklu ve heterojen dağılımlı taneler gözlemlenmektedir. Bu yüzeylerde kırılma mekanizmaları gevrek formdadır.

### 5.5.2. MIG kaynaklı numunelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri

Şekil 5.82'de MIG kaynaklı numunelerden $Mv_{38}$13, $Mv_{45}$15, $Mx_{38}$13 ve $Mx_{45}$13 kodlu numelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri verilmiştir.

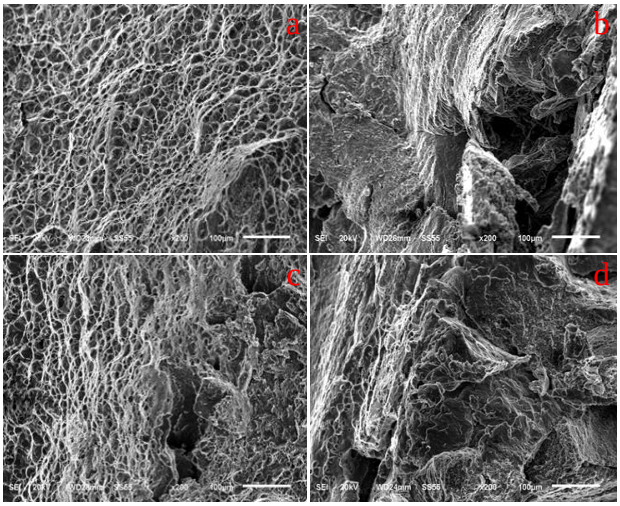



**Şekil 5.82.** MIG kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X)
(a:$Mv_{38}$13, b:$Mv_{45}$15, c:$Mx_{38}$13 ve d:$Mx_{45}$13)

Şekil 5.82'deki MIG kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırılma yüzeylerindeki SEM görüntülerine bakıldığında, a: $Mv_{38}13$ ve c: $Mx_{38}13$ kodlu numunelerin kırılma yüzeylerinde kopan tanelerin homojen dağılımlı olduğu, bu yüzeylerde lokal farklı boyut ve biçimde mikro boşlukların meydana geldiği ve kırılma mekanizmalarının sünek formda olduğu görülmektedir. b: $Mv_{45}15$ ve d: $Mx_{45}13$ kodlu numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise TIG kaynaklı numunelerin kopma yüzeylerine göre daha az boşluklu heterojen dağılımlı tanelerin oluştuğu ve kopan yüzeylerde sünek-gevrek kırılma mekanizmalarının birlikte sergilendiği görülmektedir.

### 5.5.3. FSW kaynaklı numunelerin çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri

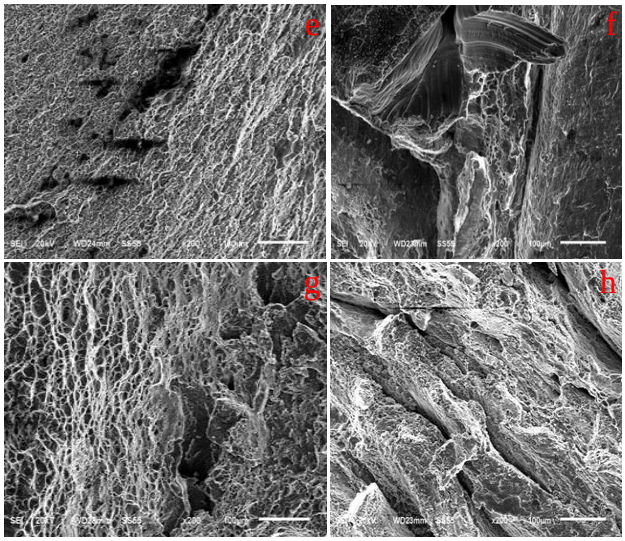
Şekil 5.83'te konik uç kullanılarak FSW bağlantısı yapılmış ve en iyi ve en kötü çekme davranışı gösteren numunelerin kırılma yüzey görüntüleri verilmiştir.




**Şekil 5.83.** Konik uç için FSW kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X)

Şekil 5.83. a'da n: 980 dev/dk ve $f_i$: 108 mm/dk, b'de n: 1800 dev/dk ve $f_i$: 108 mm/dk, c'de n: 980 dev/dk ve $f_i$: 233 mm/dk ve d'de n: 1800 dev/dk ve $f_i$: 233 mm/dk'dır. Şekil 5.83'teki görüntülerden a ve c kırılma yüzeylerinde kopan tanelerin homojen dağılımlı olduğu, bu yüzeylerde farklı boyut ve biçimde mikro boşlukların meydana geldiği ve lokal sünek kırılma mekanizmaların oluştuğu görülmektedir. Konik karıştırıcı uç profilinin yeterli karıştırmayı yapamadığı b ve d kırılma yüzeylerinde ise daha geniş boşluklu heterojen dağılımlı tanelerin oluştuğu ve kırılmanın gevrek olarak meydana geldiği mekanizma oluşmuştur. Benzer sonuçlar Thomas (1997) tarafından elde edilmiştir.

Şekil 5.84'te ise üçgen karıştırıcı uç ile FSW yapılmış en iyi ve en kötü çekme davranışı gösteren numunelerin kırılma yüzey görüntüleri verilmektedir.




**Şekil 5.84.** Üçgen uç için FSW kaynaklı bağlantılarda çekme sonrası oluşan kırılma yüzeyleri (200X)

Şekil 5.84. e'de n: 1800 dev/dk ve $f_i$: 108 mm/dk, f'de n: 980 dev/dk ve $f_i$: 108 mm/dk, g'de n: 1325 dev/dk ve $f_i$: 108 mm/dk ve h'de n: 980 dev/dk ve $f_i$: 108 mm/dk'dır. Üçgen karıştırıcı uçların kaynak edilen alüminyum alaşımlarını kısmen uç kenar köşelerden karıştırması, bu uçların dezavantajıdır. Üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerde yeterli malzeme ekstrüzyonunun sağlanamaması ve karıştırma işleminin yeterli olmaması, kaynak hattı boyunca kaynak bölgelerinde tünel ve boşlukların oluşmasına ve dolayısıyla kaynaklı birleştirmelerin kötü mekanik özellikler sergilemesine neden olmuştur. Üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise daha geniş boşluklu heterojen dağılımlı tanelerin oluştuğu ve kopan yüzeylerde gevrek kırılma mekanizmalarının sergilendiği görülmektedir.

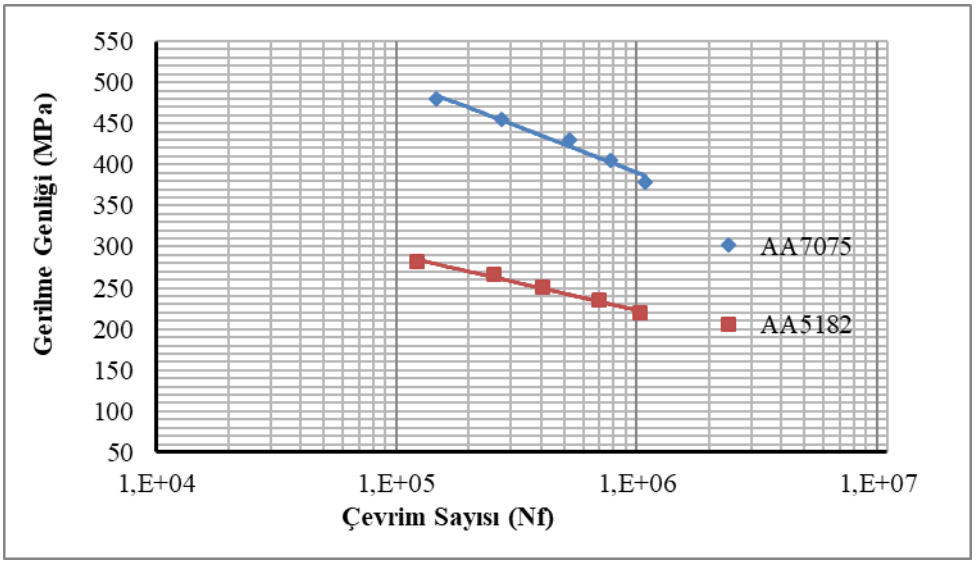
## 5.6. Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Sonuçları

AA7075 ve AA5182 alaşımlarının TIG, MIG ve FSW kaynaklı bağlantılarının yorulma ömürlerini belirlemek için Wöhler eğrileri kullanılmıştır. Yorulma deneyleri başlangıçta kaynak işlemi yapılmamış AA7075 ve AA5182 alaşımlarına, daha sonra kaynaklı bağlantılara uygulanmıştır. Yorulma deneylerinin başlangıç gerilmelerini belirlemek için numunelere, önce düşük çevrim oranlarında çatlama ve kopma meydana gelecek şekilde yüksek gerilmeler uygulanarak yorulma deneylerinin kalibrasyonu

yapılmıştır. Daha sonra ASTM E-466 standardına uygun olarak hazırlanan numunelere yüksek gerilme oranlarından başlanarak yorulma deneyleri uygulanmıştır. Yorulma deneylerinde TIG, MIG ve FSW numuneler için belirlenen parametreler literatüre uygun seçilmiştir. Parametreler, Gerilme oranı R= 0.1 ve işlem frekansı 10 Hz olarak belirlenmiş olup, bütün deneyler eksenel sinüzodial yüklemeli, değişken yük genlikli yorulma testi, çekme-çekme tipte uygulanmıştır. Deneylerde Shimadzu EHF-EV 100kN yorulma test makinesi kullanılmıştır. Yorulma sınır değerleri ve çevrim sayılarında, gerilme genliğine karşılık logaritmik çevrimler esas alınmıştır.

Yorulma kırılmaları; plastik şekil değiştirmesinin, çekme gerilmesinin ve yorulma çevrim gerilmesinin aynı zamanda etkimesiyle oluşmaktadır. Yani bu üç etmenin olmaması halinde, yorulma çatlakları oluşmayacaktır. Belirli bir gerilme genliği altında uygulanan yük, numunede çatlakların oluşmasına sebep olmakta ve belirli aralıklarla uygulanan çekme gerilmeleri ise oluşan bu çatlakların ilerlemesinde etkili olmaktadır. Bu doğrultuda yorulma mekanizmasına tesir eden temel faktörlerin biri plastik deformasyondur (Hasçalık, 1998).

Esas malzeme numuneleri, TIG, MIG ve FSW'ye göre sıralanan yorulma grafikleri Şekil 5.85 – Şekil 5.101 arasında verilmiştir. Yorulma deneyleri en iyi ve en kötü çekme mukavemet değerlerinin elde edildiği numunelere uygulanmıştır.

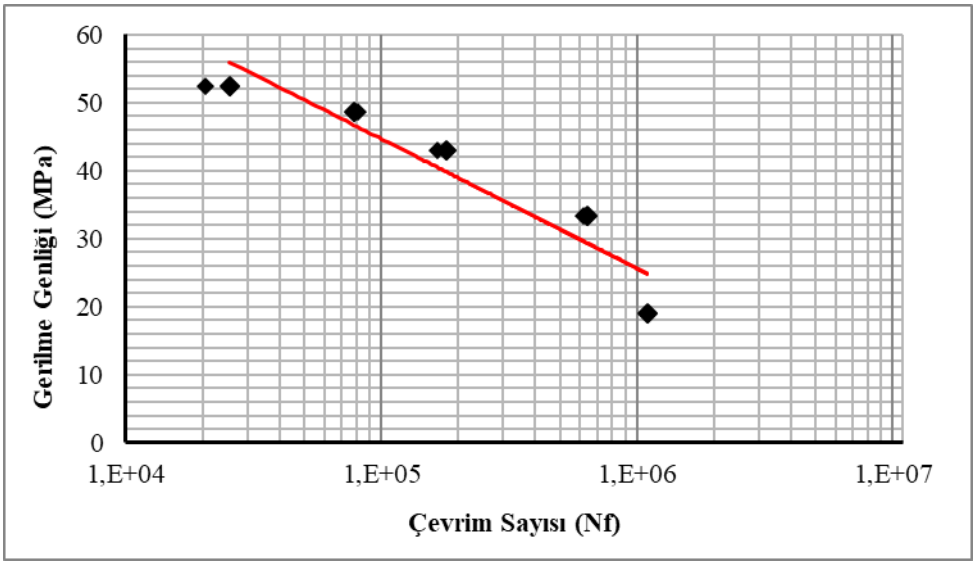



**Şekil 5.85.** AA7075 ve AA5182 alaşım EM'lerin S/N diyagramı

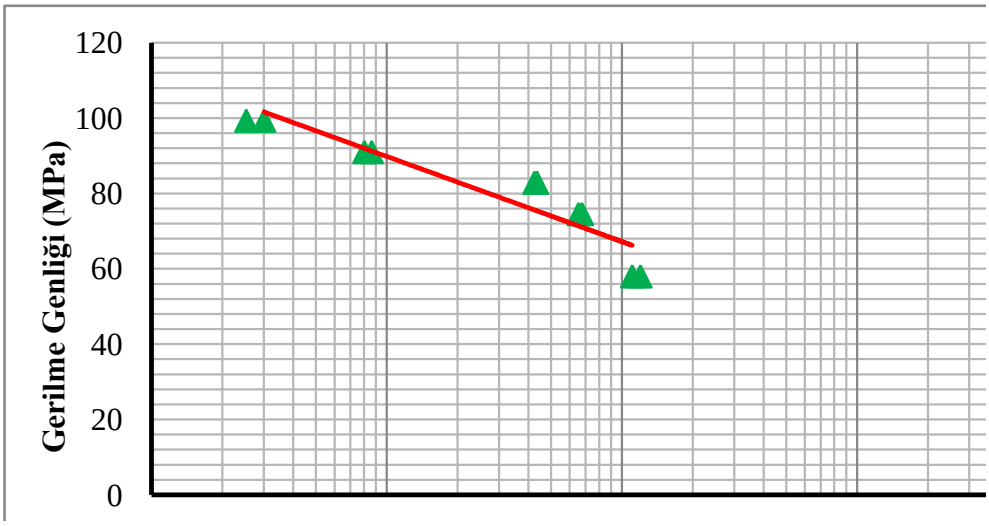
Şekil 5.85'te AA7075 ve AA5182 ana malzemelerinin Wöhler grafikleri incelendiğinde AA7075 alaşımının daha yüksek gerilme genliği oranlarında yorulma

mukavemet sınırına erişmektedir. Bu durumun Tablo 4.2'de verilen mekanik özeliklere göre mukayese edildiğinde beklenen sonuç olduğu görmüştür.

Şekil 5.86 ve Şekil 5.87'de V kaynak ağzı açılarak farklı akım ve gaz debilerinde TIG kaynakları yapılmış $Tv_{12}13$ ve $Tv_{12}15$ numunelerine ait S/N sonuçları verilmektedir.




**Şekil 5.86.** $Tv_{12}13$ numunesinin S/N diyagramı

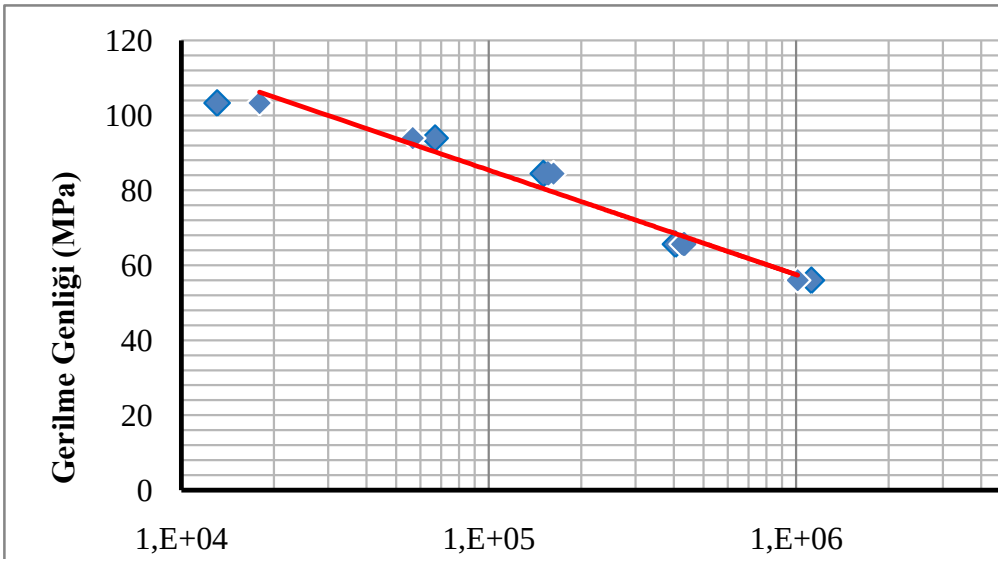



**Şekil 5.87.** $Tv_{12}15$ numunesinin S/N diyagramı

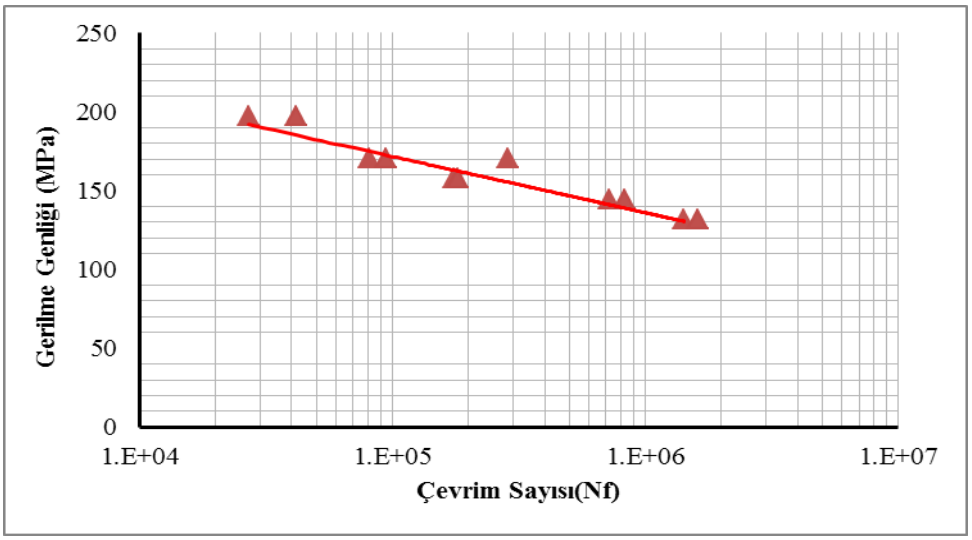
Şekil 5.86 ve Şekil 5.87'deki $Tv_{12}13$ ve $Tv_{12}15$ numunelerinin S/N diyagramları incelendiğinde, $Tv_{12}15$ numunesinin $Tv_{12}13$ numunesinden daha yüksek yük seviyelerinde sürekli mukavemet sınırına eriştiği görülmektedir. Bu durum $Tv_{12}13$ ve $Tv_{12}15$ numunelerine ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinden elde edilen sonuçlara uygunluk göstermektedir. Aynı gaz debilerinde farklı kaynak akım ile yapılan

birleşmede, kaynak akımının birleşme üzerindeki derin nüfuziyettinin çekme mukavemeti yanında yorulma ömrü üzerinde de olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Şekil 5.88 ve Şekil 5.89'da X kaynak ağızları açılarak farklı akım ve gaz debilerinde TIG kaynakları yapılmış numunelerin yorulma sonuçları verilmiştir. $Tx_{17}15$ kodlu numunenin $Tx_{12}13$ kodlu numuneden daha yüksek mukavemet değerlerinde yorulma sınırına ulaşmıştır. Yorulma değerlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'deki çekme mukavemetleri ile kıyasladığında bu durumun beklenen sonuç olduğu görülmüştür.

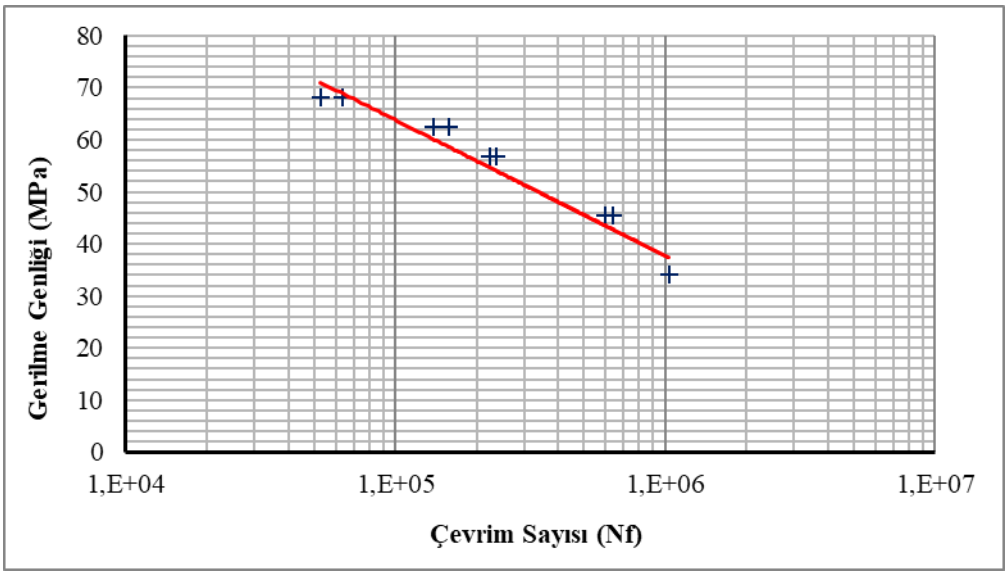



**Şekil 5.88.** $Tx_{12}13$ numunesinin S/N diyagramı

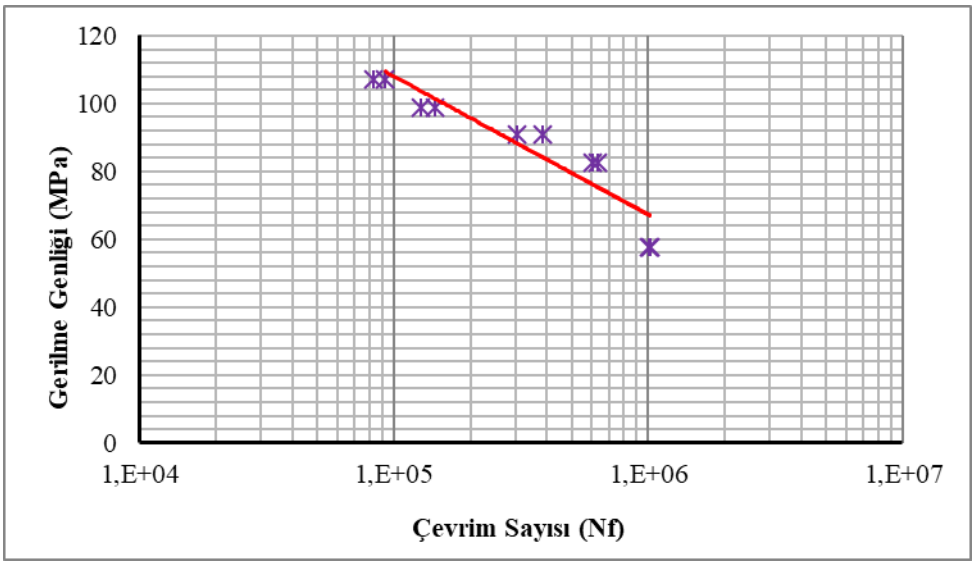



**Şekil 5.89.** $Tx_{17}15$ numunesinin S/N diyagramı

Şekil 5.90 ve Şekil 5.91'de V kaynak ağzı açılarak farklı tel ilerleme hızı ve farklı kaynak akımlarında MIG kaynakları yapılan numunelerin yorulma sonuçları verilmiştir.



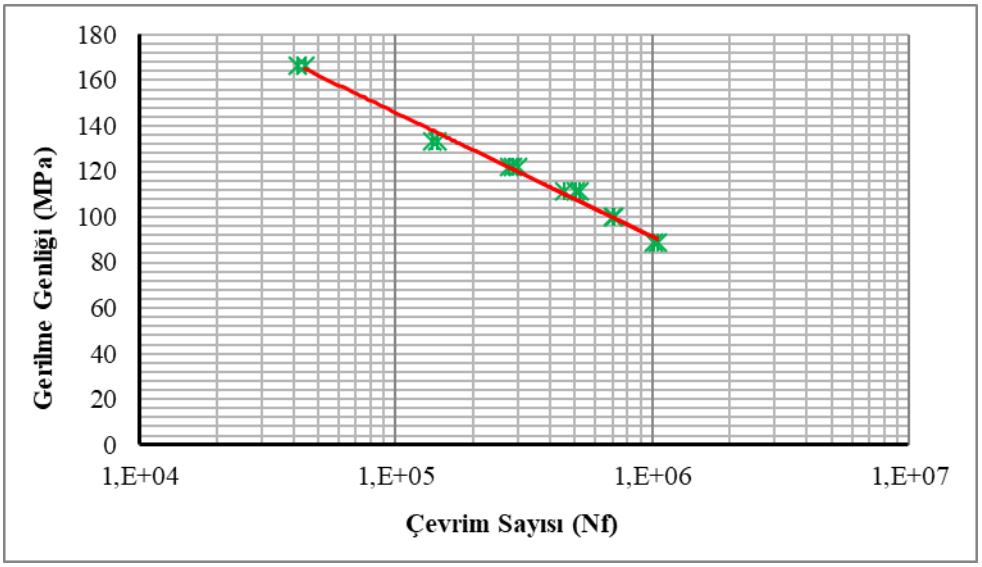

**Şekil 5.90.** $Mv_{45}15$ numunesinin S/N diyagramı



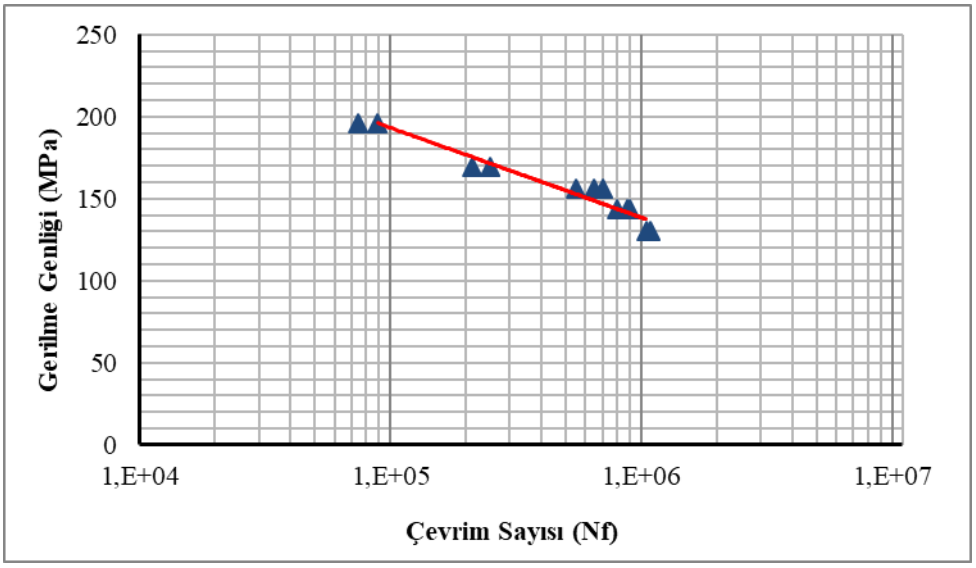

**Şekil 5.91.** $Mv_{38}13$ numunesinin S/N diyagramı

Şekil 5.90 ve Şekil 5.91'de $Mv_{38}13$ kodlu numunenin $Mv_{45}15$ kodlu numuneye göre daha iyi yorulma dayanımı gösterdiği görülmektedir. Sürekli mukavemet sınır değerlerine bakıldığında; $Mv_{38}13$ kodlu numunenin 57.8 MPa değerinde, $Mv_{45}15$ kodlu numunenin ise 34 MPa mukavemet değerinde yorulma sınırına ulaşmıştır. TIG kaynağının aksine MIG kaynağında, yüksek kaynak akımının yorulma ömrü

üzerinde olumsuz etki yapmıştır. Bu durum $Mv_{45}15$ ve $Mv_{38}13$ kodlu numunelerin yorulma sonucu oluşan hasarlı bölgeleri incelendiğinde, kırılmanın IEB'de meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.




**Şekil 5.92.** $Mx_{38}13$ numunenin S/N diyagramı

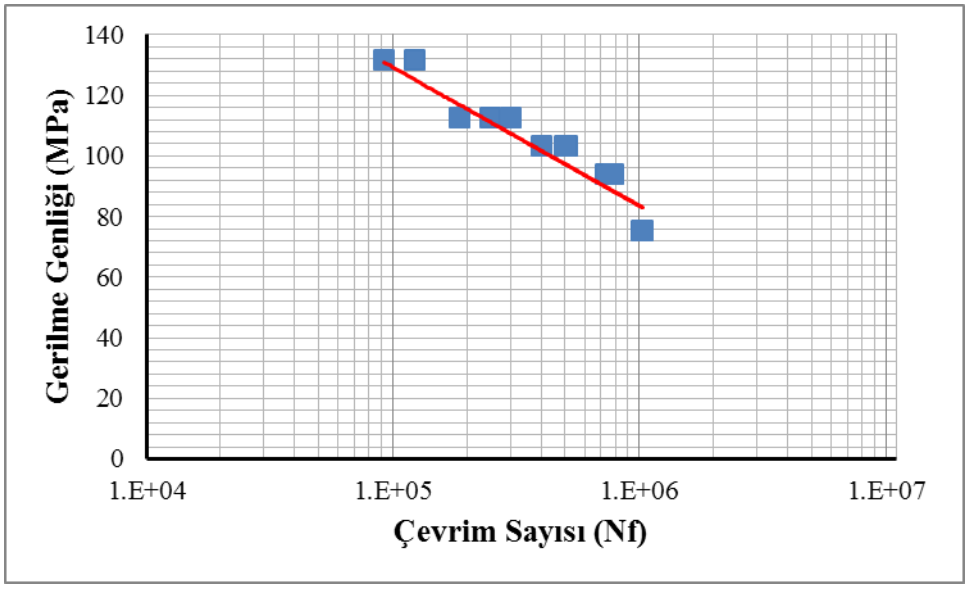



**Şekil 5.93.** $Mx_{45}13$ numunenin S/N diyagramı

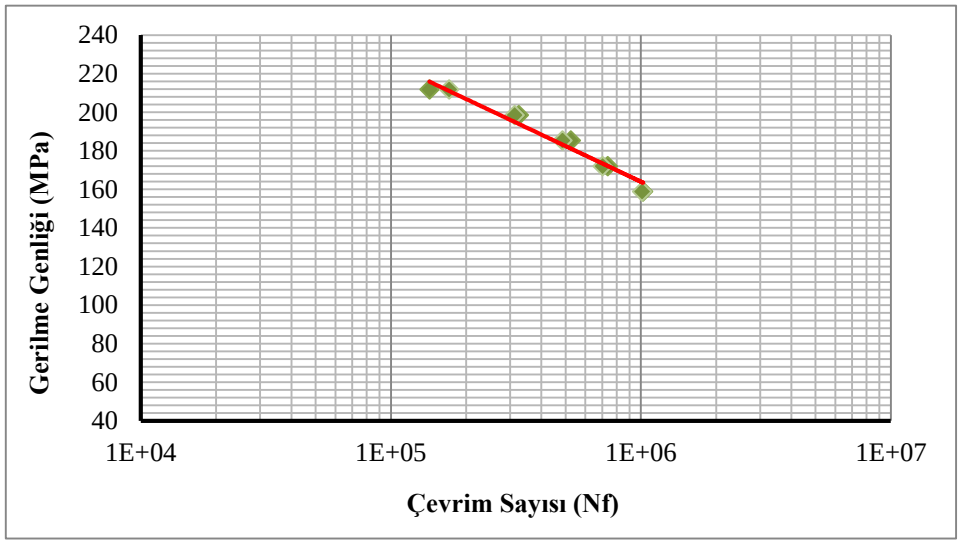
Şekil 5.92 ve Şekil 5.93'teki X kaynak ağzı açılarak farklı kaynak akımlarında MIG kaynakları yapılan $Mx_{38}13$ ve $Mx_{45}13$ numunelerin, V kaynak ağızları açılarak farklı kaynak akımlarında kaynakları yapılan $Mv_{45}15$ ve $Mv_{38}13$ numunelerinden daha yüksek yük seviyelerinde sürekli mukavemet sınırına ulaştığı görülmektedir. Bu durumun numunelere X kaynak ağzının açılıp kaynak yapılmasından ortaya çıktığı

öngörülmektedir. Benzer durumun TIG kaynakları içinde geçerli olduğu TIG yorulma grafiklerinden görülmektedir. Ayrıca tel ilerleme hızının IEB üzerindeki olumsuz etkisinden dolayı $Mx_{38}13$ yorulma numunesinin $Mx_{45}13$ yorulma numunesine göre daha düşük yük seviyelerinde sürekli mukavemet sınırına ulaştığı düşünülmektedir.

Şekil 5.94 ve Şekil 5.95'te aynı kaynak ilerle hızlarında farklı dönme devirlerinde helisel kanallara sahip konik karıştırıcı uç ile FSW kaynakları yapılan $FSW_{k1}18$ ve $FSW_{k1}09$ numunelerin S/N diyagramları verilmiştir.



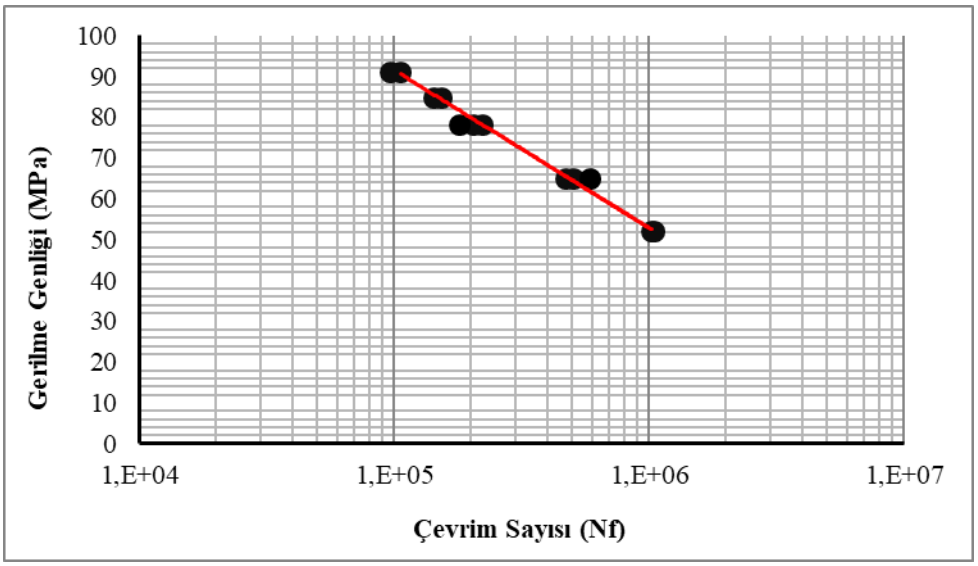

**Şekil 5.94.** $FSW_{k1}18$ numunesinin S/N diyagramı



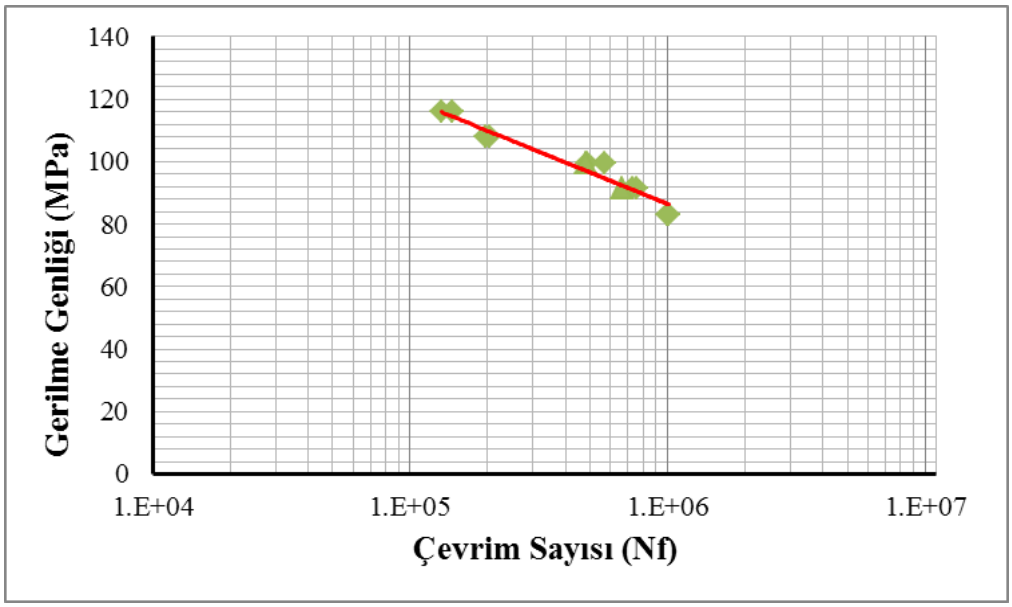

**Şekil 5.95.** $FSW_{k1}09$ numunesinin S/N diyagramı

FSW kaynağında konik karıştırıcı uç ve 1800 dev/dk dönme devri ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda ($FSW_{k1}18$ kodlu numune) yüksek çalışma sıcaklığına sebebiyet verdiğinden dolayı plastik deformasyonu arttırır ve buna bağlı olarak kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri düşer. Benzer durumundan dolayı $FSW_{k1}18$ kodlu numunenin $FSW_{k1}09$ kodlu numuneden daha düşük gerilme genliği değerinde sürekli mukavemet sınırına gelmiştir.

Şekil 5.96 ve Şekil 5.97'de 233 mm/dk kaynak ilerleme hızlarında FSW yöntemiyle birleşimi yapılan $FSW_{k2}18$ ve $FSW_{k2}09$ kodlu numunelerin S/N diyagramları verilmiştir.



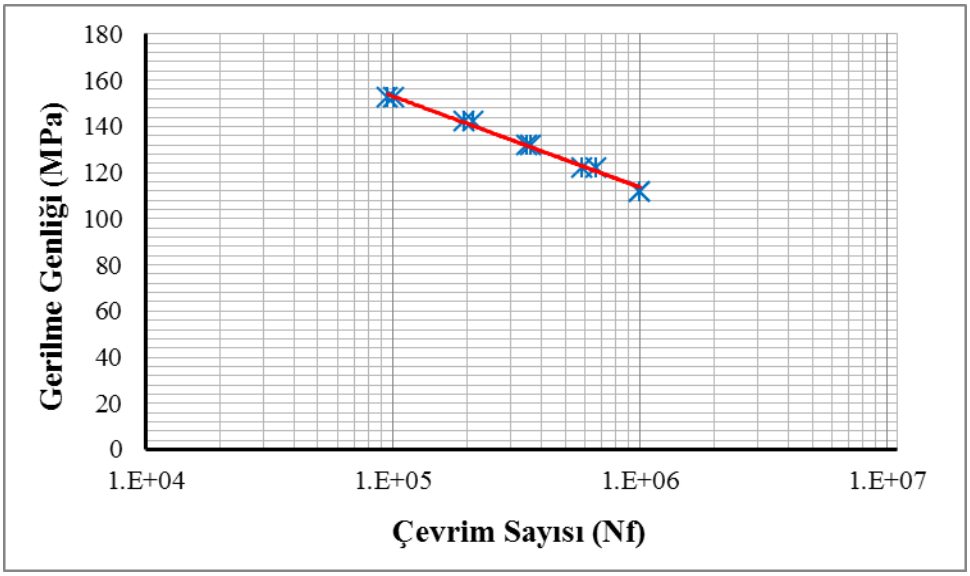

**Şekil 5.96.** $FSW_{k2}18$ numunesinin S/N diyagramı



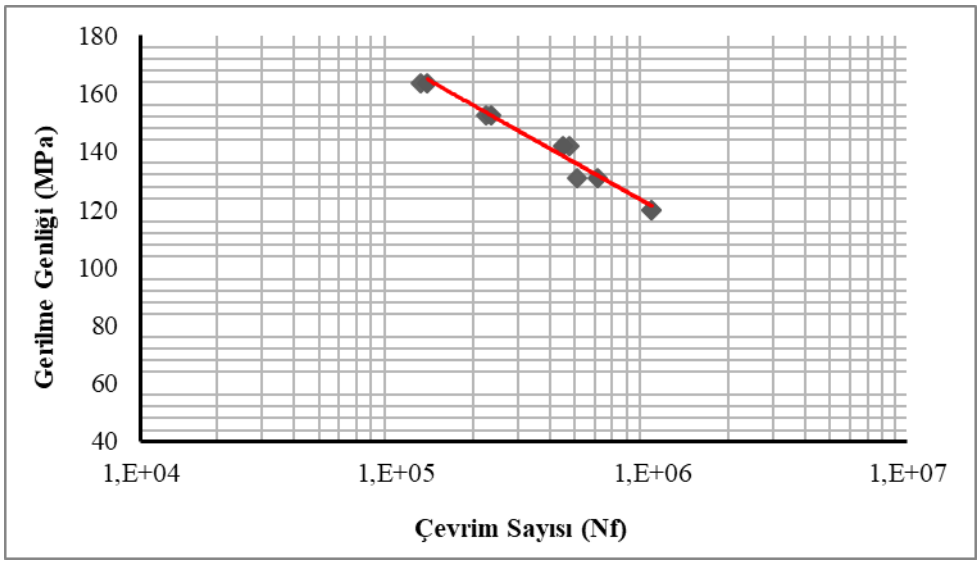

**Şekil 5.97.** $FSW_{k2}09$ numunesinin S/N diyagramı

1800 dev/dk dönme devrinde birleşimi yapılan kaynaklı bağlantıların yorulma dayanım değerlerinin, 980 dev/dk dönme devrinde birleşimi yapılan bağlantılardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun bağlantıların mekanik özellikler üzerinde önemli etkisi olan yüksek çalışma sıcaklığının, birleşme bölgesinde yapısal bozunuma uğrayan bölgenin alanının artması nedeniyle, malzemenin akma sınırının ve elastiklik modülünün düşmesine, dolayısı ile mukavemet kayıplarına neden olmaktadır. S/N diyagramlarında malzemenin yorulma dayanımı, akma sınırı, çekme mukavemeti ve sertlik değeri bir bütün olarak düşünüldüğünde; beklenildiği gibi, yorulma dayanımı artan akma sınırı, sertlik ve çekme dayanımı ile artmıştır. Bu sonuçlar literatür bilgileri ile paralellik göstermektedir (Hasçalık, 1998).

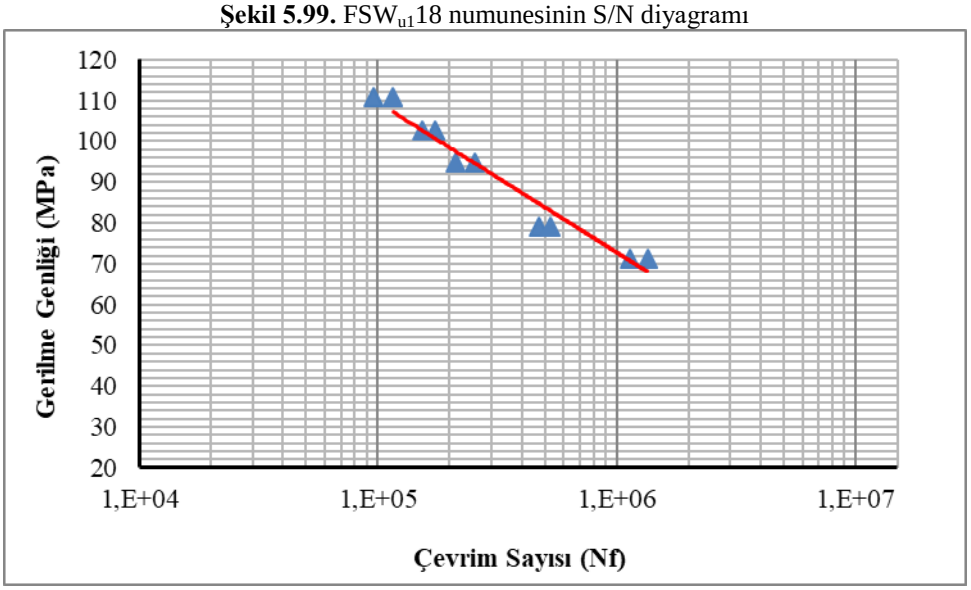
Şekil 5.98, 5.99, 5.100 ve 5.101'de Üçgen karıştırıcı uç ile FSW kaynakları yapılan $FSW_{u1}09$, $FSW_{u1}18$, $FSW_{u2}18$ ve $FSW_{u2}09$ kodlu numunelerin S/N grafikleri verilmiştir.



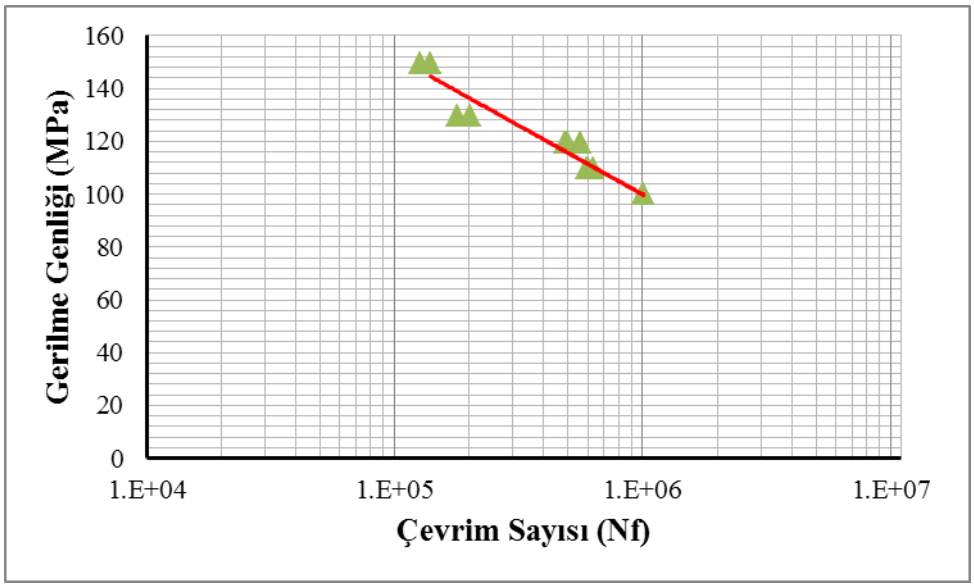

**Şekil 5.98.** $FSW_{u1}09$ numunesinin S/N diyagramı




**Şekil 5.99.** $FSW_{u1}18$ numunesinin S/N diyagramı




**Şekil 5.100.** $FSW_{u2}18$ numunesinin S/N diyagramı




**Şekil 5.101.** $FSW_{u2}13$ numunesinin S/N diyagramı

Şekil 5.99'da $FSW_{u1}18$ kodlu numune ile Şekil 5.100'de $FSW_{u2}18$ kodlu numunelerin Wöhler grafiklerine bakıldığında, artan ilerleme hızlarıyla birlikte sürekli mukavemet yorulma sınır değerlerinde düşüşlerin olduğu görülmektedir. Ancak en düşük kaynak ilerleme hızında dönme devrinin artması yorulma sürekli mukavemet sınırının artmasına katkı sağlarken yüksek kaynak hızlarında dönme devrinin artması yorulma sürekli mukavemet sınırının azalmasına neden olmuştur. Üçgen karıştırıcı uçlarla birleştirilen numunelerde en yüksek yorulma dayanım sınırı, düşük kaynak ilerleme ve yüksek dönme devrine sahip $FSW_{u1}18$ kodlu numunede 120 MPa olarak elde edilmiştir. Düşük kaynak hızı ve yüksek dönme devri ile kaynaklı bağlantıları yapılan numunelerin yorulma sınırındaki artış; karıştırma bölgesinde malzemede meydana gelen akma sınırı ve kısmen de elastisite modülü değerlerindeki artıştan ve karıştırma bölgelerinde plastisize olan malzemelerin daha iyi ekstrüze edilerek birleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

TIG, MIG ve FSW kaynaklarının genel yorulma sonuçlarına bakıldığında, en iyi yorulma sonuçlarının helisel kanallara sahip konik karıştırıcı uç kullanılarak FSW yöntemi ile birleşimi yapılan numunelerinde elde edildiği görülmüştür. Bu durum FSW numunelerinin mikroyapı ve SEM görüntülerinde de görülen boşluksuz bir kaynak yapısının elde edilmesinden ileri gelmektedir.

# 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 6.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada farklı özelliklere sahip AA7075 ve AA5182 alüminyum alaşım çiftleri farklı kaynak parametrelerinde TIG, MIG ve FSW yöntemleri ile birleştirilmiştir. Birleştililen malzemelerin metelografik yapıları, mikrosertlik değerleri, çekme dayanımları, kırılma yüzeyleri ve yorulma dayanımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

***Metalografik yapılar;***

- TIG ve MIG kaynaklı bağlantıların optik mikroskop ile yapılan makro ve mikro yapıları incelemelerinde; kaynak bölgeleri esas malzeme, ısının etkisindeki bölge ve kaynak metali olarak üç farklı bölgeye ayrılmıştır. Esas malzemelerin mikroyapılarının ince taneli homojen yapı dağılımlı olduğu görülmüştür. Ancak AA7075 alaşım esas malzemesinde haddeleme hatlarının varlığı da tespit edilmiştir. Isının etkisindeki bölgede tanelerin daha sık yapıda olduğu ve bu bölgenin kaynak metaline göre daha koyu renkte olduğu saptanmıştır. Isının etkisindeki bölgeden kaynak metaline geçişte, keskin ergime çizgisi görüntüleri elde edilmiştir. Özellikle AA7075 alaşımın TIG ve MIG kaynaklarının V geçiş bölgelerinde AA5182 alaşımına göre daha belirgin bir ergime çizgisinin oluştuğu Mikroyapı ve SEM görüntülerinde açık bir şekilde görülmüştür.
- Konik ve üçgen karıştırıcı uç kullanılarak FSW yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların optik mikroskop ile yapılan makro ve mikro yapıları incelemelerinde; uç geometrisine bağlı olarak farklı kaynak dikiş yapılarının oluştuğu sonucuna varılmıştır. Buna bağlı olarak konik ve üçgen karıştırıcı uç ile birleşimi yapılan numunelerin TIG ve MIG kaynakların aksine kaynak ara kesit bölgelerinde dört farklı bölgenin varlığı tespit edilmiştir. Bu bölgeler; esas malzeme, ısının etkisindeki bölge, termo-mekaniksel etkilenen bölge, dinamik yeniden kristalleşen bölge olarak tamamen mikroyapı karakteristiğine bağlı olarak adlandırılmıştır.
- TIG, MIG ve FSW yöntemleri ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların hem makroyapı hem de mikroyapıları incelendiğinde, FSW yönteminin daha düzgün makro ve mikroyapıda olduğu tespit edilmiştir.

***Mikrosertlik değerleri;***

- TIG kaynağı ile X ve V kaynak ağzı açılarak farklı akım ve gaz debilerinde kaynakları yapılan AA7075 ve AA5182 alaşımlarının sertlik sonuçlarında, esas malzemelerden kaynak malzemesine doğru ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında ısının etkisindeki bölgede sertlik değerlerinde ani düşüş, bu bölgeden kaynak metali bölgesine doğru gidildikçe sertlik değerlerinde artış olmuştur. En yüksek sertlik değeri X kaynak ağzının açıldığı, 17 lt/dk gaz debisinin ve 150A kaynak akımının kullanıldığı $Tx_{17}15$ kodlu numunede 89 HV olarak elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise V kaynak ağzının açıldığı, 17 lt/dk gaz debisinin ve 140A kaynak akımının kullanıldığı $Tv_{17}14$ kodlu numunede 61 HV olarak elde edilmiştir.
- MIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçlarında; esas malzemelerden kaynak metaline doğru gidildikçe sertlik değeri ısının etkisindeki bölgede düşmüştür. Bu bölgeden kaynak metaline doğru gidildikçe sertlik artmıştır. En yüksek sertlik değeri X kaynak ağzının açıldığı, 45 cm/dk tel ilerleme hızının ve 130A kaynak akımının kullanıldığı $M_{X45}13$ kodlu numunede 80,6 HV olarak elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise V kaynak ağzının açıldığı, 38 cm/dk tel ilerleme hızının ve 150A kaynak akımının kullanıldığı $M_{V38}15$ kodlu numunede 58 HV olarak elde edilmiştir.
- FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçlarında; Konik karıştırıcı uç kullanılarak birleşimi yapılan numunelere ait bağlantıların mikrosertlik grafiklerine bakıldığında, artan dönme devir sayısı ve azalan kaynak ilerleme hızlarıyla birleşimi yapılan numunelerin kaynak merkezindeki sertlik değerlerinde azalma olmuştur. Ayrıca her iki uç profilleriyle yapılan birleştirmelerin sertlik değerleri bir birine yakın çıksa da aralarındaki tek fark ısının etkisinde sertlik değerlerinin farklı eğilimde olmasıdır. En yüksek ve en düşük sertlik değeri konik karıştırıcı ucun kullanıldığı ve kaynak ilerleme hızının 108 mm/dk olduğu kaynak parametrelerinde elde edilmiştir. Dönme devrinin minimum (980 dev/dak) olduğu durumda minimum sertlik değeri elde edilmiştir. Dönme devri 1325 dev/dk olduğunda maksimum sertlik değeri elde edilmiştir. Minimum ve maksimum sertlik değerleri sırasıyla 67,1 ve 87 HV'dir.

***Çekme dayanımları;***

- TIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, kaynaklı bağlantıların ortalama mukavemet değerleri, esas malzemenin ortalama mukavemet değerinden düşük elde edilmiştir. Tüm kopmalar kaynak metalinde olmuştur. V kaynak ağzı açılarak kaynakları yapılan plakalardan çıkarılan numunelerin çekme deney sonuçlarında bakıldığında; $Tv_{12}15$ kodlu numunede 165,77 MPa değeri ile en yüksek çekme değeri elde edilirken $Tv_{12}13$ kodlu numunede ise 94,48 MPa değeri ile en düşük çekme değeri elde edilmiştir. X kaynak ağızları açılarak kaynakları yapılan plakalardan çıkarılan numunelerin çekme deney sonuçlarına bakıldığında ise en yüksek ve en düşük çekme mukavemet değerleri, $Tx_{17}15$ kodlu numunede 262,87 MPa, $Tx_{12}13$ kodlu numunede 181,63 MPa olmuştur. X kaynak ağzı açılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların V kaynak ağzı açılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılardan daha iyi mukavemet dayanımı sağlamıştır.
- MIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, (kaynaklı bağlantıların ortalama mukavemet değerlerinin esas malzemenin mukavemet değerlerinden düşük olduğu ve tüm kopmaların kaynak metalinde gerçekleştiği görülmüştür. V kaynak ağzı açılarak kaynakları yapılan plakalardan çıkarılan numunelerin çekme deney sonuçlarında bakıldığında; $Mv_{38}13$ kodlu numunede 164,62 MPa değeri ile en yüksek çekme değeri ve $Mv_{45}15$ kodlu numunede ise 108,13 MPa değeri ile en düşük çekme değeri elde edilmiştir. X kaynak ağızları açılarak kaynakları yapılan plakalardan çıkarılan numunelerin çekme deney sonuçlarına bakıldığında ise $Mx_{45}13$ kodlu numunede 260,69 MPa, $Mx_{38}13$ kodlu numunede 189,75 MPa olarak en yüksek ve en düşük çekme dayanımları tespit edilmiştir.
- FSW yöntemi ile konik karıştırıcı ucun kullanıldığı kaynaklı bağlantılarda düşük ilerleme hızının, kaynaklı bağlantıların mekanik özellikler üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Konik uç kullanılarak n: 980 dev/dk dönme devri ve $f_i$: 108 mm/dk ilerleme kaynak parametrelerinde birleştirilen numunelerin çekme test deneylerinde en yüksek çekme mukavemeti 264,7 MPa olarak elde edilmiştir. Konik uç kullanılarak n: 1800 dev/dk dönme devri ve $f_i$: 233 mm/dk ilerleme kaynak parametrelerinde birleştirilen numunelerin çekme test deneylerinde en düşük çekme mukavemeti 130,4 MPa olarak elde edilmiştir.

***Kırılma yüzeyleri;***

- TIG kaynaklı bağlantılarda, $Tv_{12}15$ ve $Tx_{17}15$ kodlu numunelerin kırılma yüzeylerinde kopan taneler homojen dağılımlı olmuştur. Bu yüzeylerde lokal farklı boyut ve biçimde mikro boşluklar elde edilmiştir. $Tv_{12}15$ kodlu numunede sünek-gevrek mekanizma beraber görülürken $Tx_{17}15$ kodlu numunede sadece sünek mekanizma oluşmuştur. $Tv_{12}13$ ve $Tx_{12}13$ kodlu numunelerin kırılma yüzeylerinde ise daha geniş boşluklu ve heterojen dağılımlı taneler oluşmuştur Bu iki numunenin kırılma mekanizmaları ise gevrek formdadır.
- MIG kaynaklı bağlantılarda, $Mv_{38}13$ ve $Mx_{38}13$ kodlu numunelerin kırılma yüzeylerinde kopan tanelerin homojen dağılımlı olduğu, bu numunelerde lokal farklı boyut ve biçimde mikro boşlukların meydana geldiği ve kırılma mekanizmalarının sünek formda olduğu görülmüştür. $Mv_{45}15$ ve $Mx_{45}13$ kodlu numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise TIG kaynaklı numunelerin kopma yüzeylerine göre daha az boşluklu heterojen dağılımlı taneler oluşmuştur ve kopan yüzeylerde sünek-gevrek kırılma mekanizmaları birlikte sergilenmiştir.
- Konik karıştırıcı ucun kullanıldığı FSW bağlantılarda, düşük kaynak ilerleme hızı ve dönme devri ile düşük dönme devri ve yüksek kaynak ilerleme hızında kopan tanelerin homojen dağılımlı olduğu, bu yüzeylerde farklı boyut ve biçimde mikro boşlukların meydana geldiği ve lokal sünek kırılma mekanizmaların oluştuğu görülmüştür. Yüksek dönme devri ve düşük kaynak ilerleme hızı ile yüksek dönme devri ve kaynak ilerleme hızında kırılma yüzeylerinde ise daha geniş boşluklu heterojen dağılımlı tanelerin oluştuğu ve kırılmanın gevrek olarak meydana geldiği mekanizma oluşmuştur.
- Üçgen karıştırıcı ucun kullanıldığı FSW bağlantılarda, yeterli malzeme ekstrüzyonunun sağlanamaması ve karıştırma işleminin yeterli olmaması, kaynak hattı boyunca kaynak bölgelerinde tünel ve boşlukların oluşmasına ve dolayısıyla kaynaklı birleştirmelerin kötü mekanik özellikler sergilemesine neden olmuştur. Üçgen karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise daha geniş boşluklu heterojen dağılımlı tanelerin oluştuğu ve kopan yüzeylerde gevrek kırılma mekanizmalarının sergilendiği görülmüştür.

***Yorulma dayanımları;***

- Kaynaklı bağlantılarda kullanılan AA7075 alaşım esas malzemesinin yorulma dayanımındaki sürekli mukavemet sınırı 379,46 MPa, AA5182 alaşım esas malzemesinin ise 219,1 MPa olarak elde edilmiştir.
- TIG kaynak işlemi ile V ve X kaynak ağzı açılarak birleşimi yapılan numunelerin yorulma sonuçlarında; V kaynaklı bağlantıların en düşük ve en yüksek yorulma dayanımlarındaki sürekli mukavemet sınırı $Tv_{12}13$ ve $Tv_{12}15$ kodlu numunelerde sırasıyla 19,1 ve 58.02 MPa olarak elde edilirken X kaynaklı bağlantılarda ise yorulma dayanımlarındaki sürekli mukavemet sınırı $Tx_{12}13$ ve $Tx_{17}15$ kodlu numunelerde sırasıyla 56 ve 131,5 MPa olarak elde edilmiştir.
- MIG kaynak işlemi ile V ve X kaynak ağzı açılarak birleşimi yapılan numunelerin yorulma sonuçlarında, V kaynaklı bağlantılarda en düşük ve en yüksek yorulma dayanımlarındaki mukavemet sınırları $Mv_{45}15$ ve $Mv_{38}13$ kodlu numunelerde sırasıyla 34 ve 68,1 MPa, X kaynaklı bağlantılarda ise $Mx_{38}13$ ve $Mx_{45}13$ kodlu numuneler için sırasıyla 75,6 ve 130,4 MPa olarak elde edilmiştir.
- FSW kaynak işlemi ile konik ve üçgen karıştırıcı uç kullanılarak birleşimi yapılan numunelerin yorulma sonuçlarında; Konik karıştırıcı kullanılarak birleştirilen bağlantılarda en yüksek ve en düşük yorulma dayanımlarındaki sürekli mukavemet sınırı $FSW_{k2}18$ ve $FSW_{k1}09$ kodlu numunelerde sırasıyla 52,2 ve 158,8 MPa olarak elde edilmiştir. Üçgen karıştırıcı kullanılarak birleştirilen bağlantılarda ise $FSW_{u2}18$ ve $FSW_{u1}18$ kodlu numunelerde 71,1 ve 120 MPa olarak elde edilmiştir.
- TIG, MIG ve FSW yöntemleri ile birleştirilen bağlantılarda, en iyi yorulma dayanımlarının helisel kanallara sahip konik karıştırıcı uç kullanılarak birleşimi yapılan FSW numunelerinde elde edildiği görülmüştür.

## 6.2. Öneriler

Bu çalışmada, AA7075 ve AA5182 alüminyum alaşım çiftleri farklı kaynak parametrelerinde TIG, MIG ve FSW yöntemleri ile birleştirilmiştir. Ancak günümüzde farklı özelliklere sahip malzemeler mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır ve bu malzemelerin kaynaklı bağlantıları bazı uygulamalarda hayati önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yapılacak ileriki çalışmalara ışık tutmak için aşağıda verilen önerilerin göz önünde tutulmasının önemli olacağı düşünülmektedir.

- Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan veya kullanılabilecek malzemelerin (titanyum ve alaşımlarının, metal matrisli kompozitlerin veya farklı alaşım elementlerinin) farklı kaynak parametrelerinde ve yöntemlerinde bağlantıları incelenebilir.
- AA7075 alaşımlarının TIG kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak geçiş bölgelerinde oluşan düzgün olmayan iri taneli yapının giderilmesi için kaynak işleminden önce AA7075 alaşım plakası ön ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra kaynak işlemi yapılabilir. Ayrıca gerilme giderme ısıl işlemi de yapılabilir.
- AA7075 ve AA5182 alaşım plakalarının FSW yöntemi ile birleştirilmesinde, karıştırıcı uçların birleştirme plakaları üzerindeki basınç ayarlaması daha gelişmiş cihazlar kullanılarak belirlenebilir.
- FSW yönteminde, helisel kanallara sahip konik karıştırıcı ucun kullanıldığı 1325 dev/dk ve 1800 dev/dk dönme devir hızlarındaki birleştirilmelerde, kaynak ilerleme hızları azaltılarak her dönme hızı için optimum kaynak ilerleme hızı tespit edilebilir.
- FSW yönteminde, üçgen profilli karıştırıcı uca konik biçimde üçgen kanallar açılarak kaynaklı bağlantıların etkisi incelenebilir.
- Tahribatsız muayeneler yapılabilir.
- Genlikler hesaplanabilir.

**KAYNAKLAR**

Alsaran, A., 1997, Kaynaklı parçaların yorulması, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Anık, S., 1960, Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı, ITÜ Yayınları, İstanbul.

ASM Handbook Committee, 1979, Metals handbook Properties and selection, Nonferrous alloys and pure metals, 9. edition, volume 2. American Society for metals, Metalspark Ohio.

Aval, H. J., Serajzadeh, S, Kokabi, A. H. and Loureiro, A., 2013, Effect of tool geometry on mechanical and microstructural behaviours in dissimilar friction stir welding of AA 5086–AA 6061, *Science and Technology of Welding and Joining*, 16 (7), 597-604.

Avner, S. H., 1974, Introduction to Physical Metallurgy, McGraw Hill, USA.

Barlas, Z. ve Uzun, H., 2010, Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Cu/Al-1050 alın birleştirmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (4), 857-865.

Bilgin, B., 2007, Ti-6Al-4V/304L Malzeme çiftinin bakır ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.

Binan, A., 2006, AA2024-T3 Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.

Borrego, L. P., Costa, J. D., Jesus, J. S., Loureiro, A. R. and Ferreira, J. M., 2014, Fatigue life improvement by friction stir processing of 5083 aluminum alloy MIG butt welds. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 70, 68–74

Büyükarslan, S., 2006, Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Carlone, P., Palazzo, G. S., 2015, Characterization of TIG and FSW weldings in cast ZE41A magnesiumalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 87–94.

Cavaliere, P. and Cerri, E., 2005a, Mechanical response of 2024-7075 aluminum alloys joined by Friction Stir Welding, *Journal of Materials Science*, 40, 3669 - 3676.

Cavaliere, P. and Squillace, A., 2005b, High temperature deformation of friction stir processed AA7075 aluminum alloy, *Materials Characterization*, 55, 136-142.

Cavaliere, P., 2006, Effect of friction stir processing on the fatigue properties of a Zr-modified 2014 aluminum alloy, *Materials Characterization*, 57, 100-104.

Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F. W. and Squillace, A., 2006, Mechanical and microstructural behavior of 2024-7075 aluminum alloy sheets joined by friction stir welding, *International Journal of Machine Tools*, 46, 588-594.

Cavaliere, P. and Panella, F., 2008, Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by Friction Stir Welding, *Journal of Materials Processing Technology,* 206: 249-255.

Chen, Y. C. and Nakata, K., 2008, Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys, *Scripta Materialia*, 58, 433-436.

Colligan, K. J., Fisher, J. J., Gover J. E. and Pickens, J. R., 2002, Friction stir welding in the AAAV, Advanced Materials & Processes, 160, 39-41.

Çam, G., 2002, Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları, *PAÜ Mühendislik Fakültesi 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 450-458.

Çam, G., 2007, Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarındaki son gelişmeler, *Makine Teknolojileri*, 120, 48-58.

Coşkuner, A.O., 2001, 5000 Serisi alüminyum magnezyum alaşımlarının döküm ve termomekaniksel prosesleri, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Dawes, C. J. and Thomas, W., 1995, Friction stir joining of aluminum alloys, TWI Bulletin 6, Reprint 493/6/95, pp. 124-127.

Durgutlu, A., Gülenç, B. ve Tülbentçi, K., 1999, Ark kaynağında kaynak hızının nüfuziyete ve mikroyapıya etkisi, *Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, Cilt 23, 251-259.

Ericsson, M. and Sandström, R., 2003, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue,* 25, 1379–1387.

Fadaeifardi, F., Khamirul A. M., Farhad G., Muath A. and Gholamreza V. S., 2016, Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AA6061-T6 alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* 26, 3102−3114.

Fine, M. E., 1975, Precipitation hardening of aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions,* 6A, 625-630.

Fujii, H., Cui, L., Maeda, M. and Nogi K., 2006, Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys, *Materials Science and Engineering*, 419, 25-31.

Gou, G., M. Zhang, H. Chen, J. Chen, P. Li, Yang, Y. P., 2015, Effect of humidity on porosity, microstructure, and fatigue strength of A7N01S-T5 aluminum alloy welded joints in high-speed trains, *Materials and Design*, 85, 309–317.

Guerraa, M., Schmidta, C., McClurea, J. C., Murra, L. E. and Nunes, A. C., 2003, Flow patterns during friction stir welding, *Materials Characterization*, 49, 95-101.

Güngör, B., Kaluç, E. and Taban, E., 2014, Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys, *Materials and Design*, 56, 84–90.

Hynes, N. R. J., Velu, P. S., 2018, Effect of rotational speed on Ti-6Al-4V-AA 6061 friction welded joints, *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 288–297.

http://www.aluminium.org/ [Ziyaret Tarihi: 15 Aralık 2017].

https://abs.cu.edu.tr/Dokumanlar/2016/MK%20226/756768739_kaynak-teknolojisi_makine.pdf [Ziyaret Tarihi: 15 Mayıs 2018]

http://www.metaluzmani.com/ [Ziyaret Tarihi: 15 Mayıs 2018].

Imam Fauzı, E. R., Che Jamil, M. S. Z., Samad. and P. M., 2017, Microstructure analysis and mechanical characteristics of tungsten inert gas and metal inert gas welded AA6082-T6 tubular joint: A comparative study, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27, 17−24.

Infante, V., Braga, D. F. O., Duarte, F., Moreira, P. M. G., Freitas, M de. and Castro, P. M. S. T., 2016, Study of the fatigue behaviour of dissimilar aluminum joints produced by friction stir welding. *International Journal of Fatigue*, 82,310–316.

Jafarlou, H., Jamalian, H. M., Eskandar, M. T., 2018, Investigation into the role of pin geometry on the corrosion behaviorof multi-pass FSWed joints of Al5086 besides applying Al2O3nanoparticles, *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 425–431.

Jamshidi Aval, H. and Loureiro, A., 2013, Effect of welding parameters on microstructure, mechanical properties and residual stress fields of friction stirwelds on AA5086, *Kovove Materialy*, 53 2015 51–58.

Jang, K. C., Lee, D. G., Kuk, J. M. and Kim, I. S., 2005, Welding and environmental test condition effect in weldability and strength of al alloy, *Journal of Materials Processing Technology*,164-165 :1038-1045.

Jones, M. J., Heurtier, P., Desrayaud, C., Montheillet, F. and Allehaux, D. Driver J. H., 2005, Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminum alloy, *Scripta Materialia*, 52, 693-697.

Kadayifçi, Z. A., 2013, Benzer ve farklı türden alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.

Kalfalı, H., 2009, AA 2024 Al alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında (skk) kaynak parametrelerinin birleşmeye etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, ANKARA

Kalafat, H., 2001, Çekme-Basmalı yorulma deney cihazının tasarımı ve nervürlü inşaat çeliklerin mekanik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.

Kaluç, E. ve Bozdurman, B., 1998, Sürtünen Eleman ile Birleştirme Yöntemi, *Makina Magazin*, 27, 54-61.

Kaluç, E., 2004, Kaynak teknolojisi el kitabı- cilt 1- ergitme esaslı kaynak yöntemleri, MMO Yayını, Yayın No: 356, Ankara.

Karadeniz, S., 1990, Plazma tekniği, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, s.123.

Karcı, A., 2002, 2024-T3 Al Alaşımının tek aşırı yük altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Khaled. T., 2005, An outsider looks at friction stir welding, Terry Khaled, Ph.D., Chief Scientific / Technical Advisor, Metallurgy, Federal Aviation Administration, 3960 Paramount Boulevard. Lakewood, CA 90712.

Kurt, A., Boz, M. ve Özdemir, M., 2004, Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşe bilirliğe etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 191-197.

Kurtuluş, O., 2001, Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklana bilirliği ve değişik parametrelerin mekanik özellikler ile mikro yapı üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Lee, W. B., Yeon, Y. M. and Jung, S. B., 2003, Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6005 aluminum alloy, *Materials Science and Technology*, 19, 513-518.

Lim, S., Kim, S., Lee, C. G. and Kim, S. J., 2004, Tensile behavior of friction stir welded Al 6061- T651. Metallurgical and Materials Transactions A, 35(9), 2829–35.

Liu, Y., W. Wang, J. Xie, S. Sun, L. Wang, Y. Qian, Y. Meng. and Y. Wei., 2012, 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.

Mathers, G., 2002, The Welding of aluminum and its alloys, woodhead publishing limited, Cambridge, UK.

Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., 2005, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*: Rep. 50, 1-78.

Mishra, A., Nidigonda, G., 2018, Comparative Mechanical and Microstructure properties analysis of Friction Stir Welded and TIG Welded AA6061-T6 Similar joints, Journal of Advanced Research in Manufacturing, *Material Science & Metallurgical Engineering*, 5 (1-2), 1-8.

Moradi, M. M., Aval, H. J., Jamaati, R., Amirkhanlou, S., Ji, S., 2018, Microstructure and texture evolution of friction stir welded dissimilaraluminum alloys: AA2024 and AA6061, *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 1–10.

Moreira, P. M. G. P. and, 2007, Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminum alloys, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 169–177.

Mutombo, K., Toit, M.D., 2011, Corrosion fatigue behaviour of aluminium alloy 6061-T651 welded using fully automatic gas metal arc welding and ER5183 filler alloy. *International Journal of Fatigue*, 33 (12), 1539–1547.

Oğuz, B., 1990, Demir dışı metallerin kaynağı metalurji uygulama, Oerlikon Yayınları, İstanbul.

Oysu, M., 1996, 7075 Alüminyum alaşımlarına uygulanan mıg kaynağının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Öksüz, C., 1996, Yüksek mukavemetli (2024, 6061, 7075) alüminyum alaşımlarının jominy yöntemi ile su verme duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Özarpa, C., 2005, Al 2024-0 ve Al 5754-H22 Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Özdemir, M., 2003, Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum alaşımlarının kaynaklana bilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Özdemir, N., 2002, Tane küçültülmüş düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirile bilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Özdinçer, A., 2006, Alüminyum alaşımlarının gaz altı kaynağında koruyucu gaz karışımlarının nüfuziyet ile diğer kaynak dikişi özeliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özsoy, M. ve Kaluç, E., 2002, Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 43, 513, 19-26.

Reynolds, A. P., Tang, W., Gnaupel-Herolh, T. and Prask, H., 2003, Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds, *Scripta Materialia*, 48, No: 9, 1289-1294.

Reyes G. and Kang, H., 2007, Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fiber-metal laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 284-290.

Rhodes, C. G., Mahoney, M. W., Bingel, W. H. and Spurling, R. A. 1997, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scripta Materialia*, 36 (1), 69-15.

Ghogheri, S. M., Kasırı-Asgarani, M., and Amini, K., 2016, Friction stir welding of dissimilar joint of aluminum alloy 5083 and commercially pure titanium, *Kovove Mater*, 71 – 75.

Sarsılmaz, F., Özdemir, N. ve Kırık, İ., 2012, Evaluation of microstructure and fatigue properties of dissimilar AA7075/AA6061 joints produced by friction stir welding. *Kovove Material*, 259–268.

Sarsılmaz, F., Özdemir, N. ve Özel, S., 2008, Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen AA6061/AA7075 Çiftinde Karıştırıcı Uç Omuz Genişliğinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *Selçuk Ünv. Teknik Online Dergisi*.

Savaşkan, T., 1999, Malzeme bilgisi ve muayenesi, Beta Basım A.Ş., Trabzon.

Scialpi, A., Filippis, L. A. C. and Cavaliere, P., 2007, Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminum alloy, *Materials and Design*, 28, 1124-1129

Sharma, S.R., Ma., Z. Y. and Mishra, R. S., 2004, Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy, *Scripta Materially*, 51, 237-241.

Sharma, C., Upadhyay, V., Dwivedi, D. K. and Kumar, P., 2017, Mechanical properties of friction stir welded armor grade Al−Zn−Mg alloy joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27-, 493−506.

Shigematsu, I., Kwon, Y.J., Suzuki, K., Imai, T. and Saito, N., 2003, Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding, *Journal of Materials Science Letters*, 22, 353- 356.

Sinhmar, S., Dwivedi, D. K., (2018), A study on corrosion behavior of friction stir welded and tungsten inert gas welded AA2014 aluminium alloy, *Corrosion Science*, 133, 25–35.

Srinivasan, B.P., Dietzel, W., Zettler, R. and Sivan, V., 2005, Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075-AA6056 dissimilar joint, *Materials Science and Engineering*, 392, 292-300.

Su, J.-Q., Nelson, T.W., Mishra, R. and Mahoney, M., 2003, Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminum. *Acta Materially*, 51, 713-729.

Şaldır, R., 2002, Alüminyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Şık, A., Ertürk, İ. ve Önder, M., 2010, AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*-Cilt 16, Sayı 2, 2010, Sayfa 139-147.

Şık A., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Endüstri Sanayi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 11 (12), 30-43.

Taban, E. ve Kaluç, E., 2005, EN AW-5083-H321 alüminyum alaşımının MIG, TIG ve sürtünme karıştırma kaynaklı (FSW) bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelikleri, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 46, 541, 40- 51.

Thomas, W. M., Treadgill, P. L. and Nicholas, E. D., 1999, The Feasibility of friction stir welding steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4., No.6, pp.365- 372.

Threadgill, P., 1997, Friction Stir Welds in Aluminum Alloys- Preliminary Microstructural.

Tülbentçi, K., 1990, Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı, Böhler Yayınları. İstanbul.

Tülbentçi, K., 1986, Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı, Yıldız Üniversitesi Lisansüstü Kaynak Tekniği Yaz Okulu, Yıldız Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Uzun, M., 2014, MIG kaynağı ile birleştirilen AA5000 serisi malzemenin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelemesi, Yüksek lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Uzun, H., 2007, Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminum alloy matrix composite, *Materials and Design*, 28, 1440-1447.

Yalçın, E.D., 2010, AA5754-H22 ve AA7075-T651 alüminyum alaşımları sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.

Yılmaz, B., 2002, Alüminyum alaşımlarında faz yapılarının mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.

Zeng, W. M. and Wu, H.L., 2006, Effect of tool wear on microstructure, mechanical properties and acoustic emission of friction stir welded 6061Al alloy, *Acta Metallurgical Sinica*, 19, 9-19.

Zhang, T., He, Y., Shao, Q., Zhang, H. and Wu, L., 2013, Comparative study on fatigue properties of friction stir welding joint and lap joint, *13th International Conference on Fracture*, June 16–21, Beijing, China.

Zhao, Y., Lin, S., Wu, L. and Qu, F., 2005, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Materials Letters*, 59, No: 23, 2948-2952.

Zhou, C., Yang, X. and Luan, G., 2006a, Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering*, 418, 155-160.

Zhou, C., Yang, X. and Luan, G., 2006b, Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al-Mg alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 98, 285-290.

Wadeson, D.A., Zhou, X., Thompson, G.E., Skeldon, P., Osterkamp, L.D. and Seamans, G., 2005, Corrosion behavior of friction stir welded AA7108 T79 aluminum alloy, *Corrosion Science*, 48, 887-897.

Xu, G., Qian, J., Xiao, D., Deng, Y., Lu, L., Yin, Z, 2016, Mechanical Properties and Microstructure of TIG and FSW Joints of a New Al-Mg-Mn-Sc-Zr Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, JMEPEG, 25, 1249–1256.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER


| | | |
|---|---|---|
| **Adı Soyadı** | **:** | Edip ÇETKİN |
| **Uyruğu** | **:** | Türkiye Cumhuriyeti |
| **Doğum Yeri ve Tarihi** | **:** | Bingöl/Merkez-1987 |
| **Telefon** | **:** | (0534) 461 98 54 |
| **Faks** | **:** | - |
| **e-mail** | **:** | edip.cetkin@gmail.com; edip.cetkin@batman.edu.tr |


## EĞİTİM

| **Derece** | | **Adı, İlçe, İl** | **Bitirme Yılı** |
|---|---|---|---|
| Lise | : | Rekabet Kurumu Lisesi, Bingöl | 2004 |
| Üniversite | : | İnönü Üniversitesi, Malatya | 2010 |
| Yüksek Lisans | : | İnönü Üniversitesi, Malatya | 2013 |
| Doktora | : | Batman Üniversitesi, Batman | - |

## İŞ DENEYİMLERİ

| **Yıl** | **Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2011- | Batman Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |

## UZMANLIK ALANI

Mekanik ABD

## YABANCI DİLLER

İngilizce

## BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

## YAYINLAR*

Çetkin, E., Çelik, Y.H., Temiz, Ş., (2018), AA5182/AA7075 alüminyum alaşımlarının TIG kaynağında kaynak akımının mekanik özellikler üzerine etkisi. *International Engineering and Technology Symposium'18 (IETS'18), Batman 3-5 May 2018.*