

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ  
AL 6013-T6 ALAŞIMININ MİKROYAPI  
ve  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Haşim KAFALI  
Doktora Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı  
Mart - 2011

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Haşim KAFALI'nın "Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmiş Al 6013-T6 Alaşımının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi"** başlıklı **Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki**, Doktora Tezi 10.03.2011 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı- Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof.Dr. Nuran AY	.....
Üye	: Yrd.Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ	.....
Üye	: Yrd.Doç.Dr. Dilek TURAN	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Serdar DALKILIÇ	.....

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

## ÖZET

**Doktora Tezi**

### **SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ AL 6013-T6 ALAŞIMININ MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Haşim KAFALI**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Nuran AY  
2011, 107 sayfa**

Alüminyum alaşımları uçak yapılarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır, özellikle kanat ve gövde kaplamalarında kullanılırlar. Bu yapıların birleştirilmelerinde geleneksel bir teknik olan perçinle birleştirme kullanılır. Fakat perçinleme uçağın yapısal ağırlığını arttırmaktadır ve perçin delikleri yorulma çatlakları için gerilme konsantrasyonu oluşturmaktadır. Geleneksel kaynak tekniklerinde metal ergime noktasına kadar ısıtılmaktadır, bu nedenle de malzemenin mekanik davranışı kötüleşmektedir. Ayrıca yüksek dayanımlı malzemelerin kaynaklanabilirlikleri düşüktür. Son yıllarda Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) alternatif bir birleştirme tekniği olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımlarından 6013-T6'nın FSW ile kaynaklanabilme kabiliyetleri, kaynak yapıldıktan sonraki malzemenin mekanik özellikleri ve içyapıdaki değişiklikler incelenmektedir. Çalışmada ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısıl işlem görmüş malzemelere sertlik testi, çekme testi ve yorulma testi uygulanmış, optik ve elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Kaynaklı malzemedeki metaller arası partiküller ve tane yapısı optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW), Çekme ve Yorulma Testi, Mikroyapısal İnceleme, Uçak Yapısı, Al 6013-T6

## ABSTRACT

### PhD Dissertation

## AN INVESTIGATION of MICROSTRUCTURAL and MECHANICAL PROPERTIES of FRICTION STIR WELDED AL 6013-T6 ALLOY

**Haşim KAFALI**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Aviation Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Nuran AY  
2011, 107 pages**

Aluminum alloys are widely used in aircraft structures especially in the fuselage and wing fairings. For the joining of these structures, the traditional technique of riveting is used. However, riveting increases the structural weight of the aircraft and rivet holes cause stress concentration for the fatigue cracks. In traditional welding techniques, metal is heated up to the melting point for this reason the mechanical behavior of the material deteriorates. In addition to that the weldability of high strength materials is low. In recent years Friction Stir Welding (FSW) has been used as an alternative joining technique. In this study; the weldability by FSW of 6013-T6, an aluminum alloy having an important place in aviation and space industries; the mechanical properties of the material after riveting; and the changes in the internal structure have been examined. Along the course of this study, the raw material, the welded material, and the material which has undergone further heat treatment, have been tested by microhardness test, tensile test, and fatigue test. The microstructure has been examined by the optical microscope and the electron microscope. The particles within metals and the grain structure in the welded material have been analyzed by optical microscope and scanning electron microscope.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Tensile and Fatigue Tests, Microstructural Evaluation, Aircraft Structure, Al 6013-T6

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, büyük emeği ve desteği olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Nuran AY'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmam süresince yönlendirici tavsiyeleri ile beni destekleyen hocalarım Sayın Prof. Dr. Hidayet BUĞDAYCI'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Dilek TURAN'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yoğun çalışma temposu içerisinde bulunduğum zaman süresince beni anlayışla karşılayarak her zaman destekleyen, bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Serdar DALKILIÇ'a ve yanımda bulunan değerli dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca bana her türlü desteği veren, Babam Niyazi KAFALI'ya ve Annem Dursen KAFALI'ya sonsuz teşekkürler.

Haşim KAFALI  
Eskişehir, 2011

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
KISALTMALAR DİZİNİ .....	xi
SİMGELER DİZİNİ .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE UÇAKLARDA KULLANIM ALANLARI</b>	<b>6</b>
2.1. Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri .....	6
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Uçaklarda Kullanım Alanları .....	10
<b>3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (FRICTION STIR WELDING - FSW)</b>	<b>15</b>
3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı .....	17
3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Bölgeler.....	20
3.3. FSW Uygulamasında Malzeme Akışı .....	21
3.4. FSW Uygulamasında Kullanılan Uçlar (Pimler) ve Omuzlar .....	23
3.4.1. Omuz çapı ve şekli .....	23
3.4.2. Uç (pim) boyutu ve şekli .....	26
3.5. FSW ile Birleştirilmiş Parçalara Uygulanan Testler .....	30
3.5.1. Hasarsız testler .....	30
3.5.2. Hasarlı testler .....	31
3.6. FSW Uygulamalarında En Sık Rastlanan Hatalar .....	31

<b>4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR</b>	<b>33</b>
4.1. FSW Uygulama Cihazları ile İlgili Çalışmalar .....	33
4.2. FSW Tekniğinin Alüminyum Alaşımlara Uygulanması .....	36
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>45</b>
5.1. Kullanılan Malzeme (6013 Serisi Alüminyum Alaşımları) .....	45
5.2. Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Değerleri Ölçümü .....	47
5.3. Numune Hazırlanması .....	48
5.4. Kullanılan Cihazlar ve Aletler .....	49
5.5. Yapılan Deneyler .....	52
5.5.1. Hasarsız kontrol yöntemleri .....	52
5.5.2. Isıl işlem .....	55
5.5.3. Sertlik testi .....	57
5.5.4. Çekme deneyleri .....	57
5.5.5. Yorulma deneyleri .....	57
5.5.6. Kırılma yüzeylerinin incelenmesi .....	58
<b>6. DENEYSEL SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR</b>	<b>60</b>
6.1. Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Değerleri .....	60
6.2. Hasarsız Kontrol Yöntemleri .....	62
6.3. Sertlik Testi .....	63
6.4. Çekme Testi .....	65
6.5. Yorulma Testi .....	68
6.6. Mikroyapı İncelemeleri .....	72
6.6.1. Optik mikroskop .....	72
6.6.2. Kırılma yüzeylerinin incelenmesi .....	76
<b>7. GENEL SONUÇLAR</b>	<b>90</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>93</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1.	Alüminyum ve alaşımlarının uçaklar üzerinde kullanım oranları .....	11
2.2.	Airbus 380 yolcu uçağı yapısında alüminyum alaşımlarının kullanım yerleri .....	12
2.3.	Parçalı gövde yapıları ve bütünleşmiş gövde tasarımının uçak parçalarında gösterimi .....	14
3.1.	Eclipse-500'den bir FSW uygulaması .....	16
3.2.	FSW tekniğinin uygulanmasının şematik gösterimi .....	18
3.3.	FSW tekniğinin parça üzerindeki şematik görüntüsü .....	19
3.4.	FSW aleti etrafındaki akış .....	22
3.5.	Bir uç-omuz bağlantısı ve temel ölçüleri .....	23
3.6.	Omuz çaplarının levha kalınlıklarına göre değişimi .....	24
3.7.a.	Omuz yüzeyinin kenarından dışarı doğru uzanan helezonlara sahip tipik bir FSW helezonlu omuz konfigürasyonu .....	26
3.7.b.	Aynı omuz konfigürasyonunun Wiper tasarımı eklenmiş hali .....	26
3.8.	Değişik geometride uçlar .....	27
3.9.a.	Silindirik kısmi dişli uç .....	28
3.9.b.	Konik dişli uç .....	28
3.10.a.	Triflute uç .....	28
3.10.b.	Triflute uç .....	28
3.10.c.	Whorl uç .....	28
3.11.a.	Trivex ucu .....	29
3.11.b.	MX Trivex ucu .....	29
3.12.a.	Uç çapının numune kalınlığı ile değişimi .....	30
3.12.b.	Uç aralığının numune kalınlığı ile değişimi .....	30
4.1.	Kaynak bölgesinden birden fazla geçişin gösterimi .....	39
5.1.	Kaynaklı levha .....	46
5.2.	Kaynak yönü .....	46

5.3.	Sıcaklık ölçümü için termokapılların yerleştirilmesinin gösterimi .....	47
5.4.a.	Çekme ve yorulma numunesi (boyutlar mm olarak verilmiştir) .....	48
5.4.b.	Çekme ve yorulma numunelerinin lazerle kesilmesi ve frezede işlenerek hazırlanması .....	48
5.5.	Prototip üretimi yapılan uç ve omuz takımı .....	49
5.6.	Deneyde kullanılan Instron 8500 cihazı ve yardımcı teçhizatlar .....	51
5.7.	Kaynaklı levhanın gözle kontrolü .....	52
5.8.	Kaynaklı levhaya sıvı penetrant kontrol yönteminin uygulanması .....	53
5.9.	Kaynaklı levhaya ultrasonik kontrol yönteminin uygulanması .....	53
5.10.	Kaynaklı levhaya girdap akımları kontrol yönteminin uygulanması .....	54
5.11.	Kaynaklı levhaya iletkenlik testi uygulanması .....	54
5.12.a	Isıl işlem fırını (çözelti ısıl işlemi için 550°C'ye ısıtılmış durumda) .....	56
5.12.b	Numunelerin 550°C'deki fırından 6 saat sonra çıkartılması .....	56
6.1.	Kaynak hücum ve firar kenarlarından sıcaklık değerleri .....	61
6.2.	Kaynak merkezine 6mm-15mm uzaklıktan ve omuz üzerinden alınan sıcaklık değerleri .....	61
6.3.	Ultrasonik kontrol yöntemiyle levhanın kontrol edilmesi .....	62
6.4.	Kaynaklı malzemenin sertlik profili .....	64
6.5.	Kaynak işleminden sonra tekrar T6 ısıl işlemi uygulanmış malzemenin sertlik profili .....	64
6.6.	Ana metal ve kaynaklı malzemelerin sertlik profillerinin karşılaştırılması .....	65
6.7.a.	Ana malzeme için gerilme-uzama eğrileri .....	67
6.7.b.	Kaynaklı malzeme için gerilme-uzama eğrileri .....	67

6.7.c.	Tekrar ısıtıl işlem uygulanmış malzeme için gerilme-uzama eğrileri .....	67
6.8.	Yorulma testleri sonucunda kopmuş numuneler ve kopmanın olduğu bölgelerin gösterimi .....	68
6.9.	Ana malzemenin S-N diyagramı .....	69
6.10.	FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramı .....	70
6.11.	Tekrar T6 ısıtıl işlem yapılmış FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramı .....	70
6.12.	Ana malzeme, FSW uygulanmış malzeme ve tekrar T6 ısıtıl işlemi yapılmış FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramları ....	71
6.13.a.	AA6013-T6 FSW şematik gösterimi – ana malzeme .....	73
6.13.b.	AA6013-T6 FSW şematik gösterimi – termomekanik etkilenen bölge .....	73
6.13.c.	AA6013-T6 FSW şematik gösterimi – kaynak bölgesi .....	73
6.13.d.	AA6013-T6 FSW şematik gösterimi – termomekanik etkilenen bölge .....	73
6.13.e.	AA6013-T6 FSW şematik gösterimi – kaynak bölgesi .....	73
6.14.a.	AA6013-T6 FSW mikro görüntüler – ana malzeme .....	73
6.14.b.	AA6013-T6 FSW mikro görüntüler – termomekanik etkilenen bölge .....	74
6.14.c.	AA6013-T6 FSW mikro görüntüler – kaynak bölgesi .....	74
6.14.d.	AA6013-T6 FSW mikro görüntüler – termomekanik etkilenen bölge .....	75
6.14.e.	AA6013-T6 FSW mikro görüntüler – kaynak bölgesi .....	75
6.15.a.	Ana malzemenin SEM görüntüsü .....	76
6.15.b.	Ana malzemenin SEM görüntüsü .....	77
6.15.c.	AA6013-T6 için EDX sonuçları .....	77
6.16.	AA6013-T6 için farklı noktalardan EDX sonuçları .....	78
6.17.a.	FSW kaynaklı 6013-T6 levhasının SEM görüntüleri – ana malzeme .....	79
6.17.b.	FSW kaynaklı 6013-T6 levhasının SEM görüntüleri – ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) .....	79

6.17.c.	FSW kaynaklı 6013-T6 levhasının SEM görüntüleri – termomekanik etkilenmiş bölge (TMAZ) .....	80
6.17.d.	FSW kaynaklı 6013-T6 levhasının SEM görüntüleri – kaynak merkezi .....	80
6.18.	Köşelerde meydana gelen çatlak başlangıcı ve çatlağın ilerleme doğrultusu .....	81
6.19.	Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin köşelerde meydana gelmesi .....	82
6.20.	Son kopma ve yorulma bölgelerinin gösterimi .....	82
6.21.	Sünek kırılma gösteren numunenin gösterimi .....	83
6.22.	Yapı içinde oluşan boşluklar ve partiküllerin gösterimi .....	84
6.23.	Yorulma adımlarının belirgin şekilde görülmesi .....	84
6.24.	İri belirgin çukurcukların gösterimi .....	85
6.25.	Yırtılma setleri gösterimi .....	86
6.26.a.	Kaynaklı malzemede çukurların gösterimi .....	87
6.26.b.	Tekrar ısıtıl işlem uygulanmış malzemede çukurların gösterimi .....	87
6.27.	Kaynaklı malzemede yorulma adımlarının gösterimi .....	88
6.28.	Tekrar ısıtıl işlem uygulanmış malzemede yorulma adımlarının gösterilmesi .....	89
6.29.	Ana malzemede yorulma adımlarının gösterimi .....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Alüminyum alaşım grupları .....	7
2.2. Ana ısıl işlem işaretlerinin gösterimi .....	7
2.3. Alüminyum ve alüminyum alaşımların H (sertleştirme) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi .....	8
2.4. Alüminyum alaşımların T (ısıl işlem) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi .....	8
5.1. 6013 ana malzemesinin kimyasal bileşimi .....	46
6.1. Ana malzemenin, kaynaklı malzemenin ve tekrardan T6 ısıl işlemi görmüş kaynaklı AA6013-T6 malzemesinin çekme test sonuçları .....	66

## KISALTMALAR DİZİNİ

DLR	: German Aerospace Center
EBW	: Electron Beam Welding
EDX	: Energy Dispersive X-Ray Enerji Saçılımlı X-Işınları
FSP	: Friction Stir Process
FSW	: Friction Stir Welding Sürtünme Karıştırma Kaynağı
HAZ	: Heat Affected Zone Isıdan Etkilenen Bölge
OM	: Optical Microscope Optik Mikroskop
SE	: Secondary Electron İkincil Elektron
SEM	: Scanning Electron Microscope Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	: Transmission Electron Microscope Geçirimli Elektron Mikroskobu
TMAZ	: Thermo-Mechanically Affected Zone Termo-Mekanik Etkilenen Bölge
TWI	: The Welding Institute

## SİMGELER DİZİNİ

<i>Al</i>	: Alüminyum
<i>Cr</i>	: Krom
<i>Cu</i>	: Bakır
<i>Fe</i>	: Demir
<i>Li</i>	: Lityum
<i>Mg</i>	: Magnezyum
<i>Mn</i>	: Manganez
<i>Si</i>	: Silisyum
<i>SiC</i>	: Silisyum Karbür
<i>Zn</i>	: Çinko
$\sigma$	: Çekme gerilmesi
<i>R</i>	: Gerilme oranı

## 1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanoğlu kendine gerekli araç ve gereçlerin üretiminde kaynakla birleştirme yöntemini kullanmış ve ihtiyaçları doğrultusunda da sürekli olarak yeni kaynak yöntemleri geliştirmiştir. Günümüzde de bu yöntem hala işlerliğini korumaktadır. Çağımızın geliştirilmiş malzemeleri ve alaşımları ele alındığında daha da modern birleştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Dolayısıyla, son yıllarda yeni ve daha etkili kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi, üzerinde çokça yoğunlaşılacak bir alan haline gelmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde sadece birleştirmenin değil aynı zamanda birleştirme yönteminin malzemenin yapısını ve özelliklerini etkilemeden uygulanmasının da önemli olduğu üzerinde durulduğu görülmektedir [1-6].

Kaynak, ara yüzey içinde atomik veya moleküler bağlantılar oluşturmak amacıyla ısı ve/veya basınç uygulanmasıyla iki veya daha fazla aynı tipte ya da sınıftaki malzemenin birleştirilmesi işlemidir. İşlem bir dolgu malzemesini gerektirebilir ya da gerektirmeyebilir [7].

Kaynak için en temel esas, atomların birleşme eğilimleridir. Bir ya da daha fazla atom birbirine yaklaştırıldıklarında pozitif yüklü çekirdek ile negatif yüklü elektronlar arasında bir elektrostatik çekim kuvveti doğar ve bu kuvvet atomlar arasındaki mesafe azaldıkça artar. Ayrıca atomlar birbirine yaklaştıkça potansiyel enerjileri de azalır. Bu mesafe birkaç atom çapı kadar bir değere küçüldüğünde negatif yüklü elektron kabukları arasındaki itme kuvveti çekme kuvvetinden daha hızlı artar. Bu çekme ve itme kuvvetleri bir net kuvvet oluştururlar. Denge mesafesi ya da denge aralığı olarak adlandırılan belirli bir mesafede çekme ve itme kuvvetleri dengelenirler ve net kuvvet sıfır olur. Bu denge aralığında net potansiyel enerji minimumdur. Atomların bir araya gelmesi dengelenmiştir ve atomlar (veya iyonlar) birleşmiştir. Atomlar denge aralığında ve bir arada birleşmiş durumdayken tüm atomlar elektronları paylaşarak veya transfer ederek dengeli bir dış elektron konfigürasyonuna sahip olurlar [7]. Kaynak işlemi için de yapılması gereken, atomları denge aralığına getirmektir. İki mükemmel düzgün yüzey denge aralığına yaklaştırıldıklarında ara yüzeydeki atomlar birleşirler ve iki parça birbirine kaynatılmış olur. Bu durumda hiçbir

fiziksel ara yüzey kalıntısı oluşmaz ve bağlantıyı oluşturan malzemelerin yapısında bozulma olmaz [7].

Gerçekte ise iki malzeme asla mükemmel bir düzgünlüğe ve pürüzsüzlüğe sahip değildir. Bu yüzden, ara yüzeyde denge aralığına ulaşmış tüm atomların kusursuz bir şekilde eşleşmesi mümkün değildir ve iki malzemeyi basit bir şekilde bir araya getirerek kusursuz bir bağlantı asla oluşturulamaz. Gerçek malzemeler oldukça düzensiz yüzeylere sahiptir. Onlarca hatta yüzlerce atom yüksekliğindeki tepeler ya da çukurlar, sadece birkaç noktada atomların denge aralığını oluşturacak şekilde temas etmelerine izin verirler. Tipik olarak gerçek bir yüzeydeki her bir milyar atomdan sadece birisi bir bağ oluşturabilir ve bu yüzden teorik mukavemetin sadece bir milyarda biri kadar bir mukavemete ulaşılabilir. Bu durum, gerçek malzemelerde genelde rastlanan oksit tabakalarının ve soğurulmuş nem tabakalarının varlığı ile daha da kötüleşir. Bu durumu iyileştirmek için gerçek malzemelerin yüzeylerinin temizlenerek hepsi olmasa da çoğu atom arasında geniş bir bölge boyunca yakın temas sağlanması gerekir. Bu da ısı ya da basınç uygulanarak gerçekleştirilebilir [3,5].

Literatürde çok çeşitli kaynak sınıflandırmaları yapılmakla beraber genel olarak kaynak; uygulanacağı malzemenin cinsine göre, gayesine göre, uygulanış şekline göre ve işlemin cinsine göre olmak üzere sınıflandırılabilir. Son yıllarda geliştirilmiş olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding, FSW) tekniği, birleştirme bölgesinde içyapıda önemli oranda bir değişikliğe yol açmadan uygulanabilmektedir. İşlem sırasında malzemedeki ergime söz konusu olmadığından özellikle kaynak yapılması zor olan alüminyum alaşımların birleştirilmesinde etkili bir yöntemdir.

Alüminyum dünyada en bol bulunan elementlerden biridir ve 19. yüzyılın sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında ekonomik bir malzeme olarak kabul görmeye başlamıştır. Alüminyum ve alaşımları benzersiz özelliklerine bağlı olarak birçok işe uygun, ekonomik ve talep edilen malzemeler olmuşlar ve başta otomobil ve havacılık endüstrileri olmak üzere birçok alanda kendilerine yaygın kullanım alanları bulmuşlardır. Bu metalin ve alaşımlarının çok farklı kullanım alanlarına sahip olmalarının nedenleri olarak görünümleri, hafif olmaları, kolay üretilirlikleri, mukavemet özellikleri ve korozyon

dirençleri gösterilebilir. Günümüzde 300'den fazla alüminyum alaşım oluşumu olduğu bilinmektedir [8-10].

Alüminyum ve alaşımları direnç kaynağı, sürtünme kaynağı, lazer-ışın kaynağı, elektron-ışın kaynağı ve gaz-altı ark kaynağı gibi birçok teknikle birleştirilebilirler. En sık kullanılan teknik ise füzyon (ergitme) kaynak tekniklerinden olan gaz-altı ark kaynağıdır. Alüminyum alaşımların kaynaklanmasını etkileyen bazı özellikler oksitlenme özellikleri, ergimiş alüminyum içindeki hidrojenin çözünübilirliği, alaşımın ısı, elektriksel ve manyetik karakteristikleri, mekanik özellikleri ve diğer metallerle alaşımlandırıldıktan sonraki ergime sıcaklıkları olarak sayılabilir. Alüminyumun oksijene karşı güçlü bir afinitesi vardır ve havayla temas eder etmez hemen oksitlenir. Alüminyum oksit yaklaşık 2050°C'de ergir ve bu hem metalin hem de alaşımın ergime noktasından kat kat daha yüksektir. Füzyon kaynağında eğer oksit temizlenmez ya da arındırılmazsa sonuç tamamlanmamış ergitme olur. FSW sayesinde alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanmaları esnasında oluşan olumsuzluklar giderilebilmektedir [1-8,11-15].

Havacılık sektöründe, emniyet faktörünü azaltmadan mukavemet değeri yüksek ve aynı zamanda da hafif malzemelerin ve birleştirme tekniklerinin kullanılması, üzerinde sürekli çalışılan bir konudur. Özellikle günümüzde uçak boyutlarının iyice büyümesi ve şirketlerin maliyetleri en aza indirerek rekabet şartlarını arttırmak istemeleri yeni teknolojik gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. FSW tekniği imalat süresini kısaltması, yüksek mukavemet sağlaması, ağırlık oranını düşürmesi, bakımının ve kontrolünün kolay olması, işlem sırasında gürültü, duman, alev ya da kıvılcım oluşturmaması, düşük maliyetli olması ve diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi herhangi bir dolgu malzemesi ya da koruyucu gaz tabakasına ihtiyaç duymaması gibi nedenlerden dolayı uçak imalatçıları ve kullanıcıları tarafından tercih edilen gelişmiş bir kaynak yöntemidir [16-27].

FSW ile birleştirilmiş malzemelerin, servis şartları altındaki hasar mekanizmaları tam olarak anlaşılırsa daha güvenilir ömür tahminleri yapılabilir. Bu sayede de FSW tekniğinin potansiyelinden daha fazla yararlanılabilir. Yeni nesil uçaklarda, FSW uçak tasarımının bir parçası olduğunda üreticiler güvenilir

ömür belirlemeler sayesinde uçak malzeme ve performanslarını daha da geliştirebilirler. Daha ekonomik, daha hızlı ve daha hafif bir kaynak tekniği, oldukça çetin bir rekabetin yaşandığı havayolu taşımacılığı pazarındaki işletmelerin dikkatini çekecektir.

Ülkemizde son yıllarda uçak parçalarının üretimine başlanması kullanılan imalat yöntemlerine ek olarak FSW tekniğinin de eklenmesi üretim sürecini etkileyecektir.

Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımlarından 6013'ün FSW ile kaynaklanabilme kabiliyetleri, kaynak yapıldıktan sonraki malzemenin mekanik özellikleri ve içyapıdaki değişiklikler incelenmektedir. Çalışmada ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısıl işlem görmüş malzemelere sertlik testi, çekme testi ve yorulma testi uygulanmış, optik ve elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, genel olarak alüminyum ve alüminyum alaşımlarından bahsedilmiş, havacılıkta kullanım alanları ve örnekler verilmiş, çalışma kapsamında karşılaşılan alaşım sınıflarının genel özellikleri incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, sürtünme karıştırma kaynağının tarihçesi, yöntemin temel parametreleri, uygulandığı, kaynak sonunda yapıda oluşan bölgeler, kaynak esnasında kullanılan uç-omuz takımlarının özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölüm kapsamında, yöntemin avantajlarının yanı sıra kaynak esnasında oluşan kusurlardan da bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, sürtünme karıştırma kaynağının nasıl yapıldığı ve işlem parametreleri ile ilgili olarak yapılmış belli başlı çalışmalar incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağın temel prensipleri alanında incelenen çalışmalar, yöntemin tarihsel gelişimini ortaya koyan, yöntemin temel prensibini açıklayıcı, pratikte ve teoride karşılaşılan problemleri ortaya koyan, ticari ve akademik uygulamalar hakkında araştırmalar sunan çalışmaları içermektedir. Bölümün devamında FSW'nin uygulandığı farklı tipte alüminyum alaşımları üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar kullanılan malzemelere uygulanan işlemleri ve kaynak süreci üzerindeki etkilerini de içermektedirler. İkinci bölüm kapsamında aynı zamanda, FSW yapılan malzemeler uygulanan hasarlı testler,

test sonuçlarına göre uygulanan modellemeler, kaynaklı yapının içyapısının incelenmesi ilgili çalışmalarda incelenmiştir. Çalışmalar sonunda bulunan sonuçlar ve varılan yargılar irdelenmiştir.

Beşinci bölümde, çalışma esnasında kullanılan malzeme ve özellikleri hakkında bilgi verilmiş, çalışma boyunca kullanılan alet, cihaz ve takımlar tanıtılmış, uygulanan deneyler görsel dokümanlarla desteklenerek uygulama adımları belirtilmiştir.

Altıncı bölümde çalışma sonunda elde edilen bulgular ortaya konulmuş, elde edilen sonuçlar belirtilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür bilgileriyle de kıyaslanarak yorumlar yapılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde ise değerlendirmeler, benzetimler ile elde edilen sonuçlar ve yorumlar değerlendirilmiştir.

## 2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE UÇAKLARDA KULLANIM ALANLARI

Bu bölümde genel olarak alüminyum ve alüminyum alaşımlarından bahsedilmiş, havacılıkta kullanım alanları ve örnekler verilmiş, çalışma kapsamında karşılaşılan alaşım sınıflarının genel özellikleri incelenmiştir.

### 2.1. Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri

Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metalik element olan ve günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, arttırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için günümüzde önemli bir malzeme konumundadır. Özellikle son yıllarda, enerji tasarrufuna dönük çalışmalar, daha az yakıt harcayan hafif ve ekonomik taşıtların üretimini gündeme getirmiş ve alüminyum alaşımlarının kara, hava ve deniz taşıtlarının imalatında kullanımı artmıştır. Arttırılmış mukavemet ve darbe özellikleri sayesinde savunma sanayinde de kullanıma girmişlerdir [7-9].

Alüminyum alaşımlarını tanımlamak için dört rakamlı bir işaret kullanılır. İlk rakam belirli alaşım elementlerini içeren alaşım grubunu belirtir. Son iki rakam alüminyum alaşımını tanımlar veya alüminyumun saflığını belirtir. İkinci rakam başlangıçtaki alaşım üzerinde yapılan değişiklikleri veya katışkı sınırlarını belirtir. Çizelge 2.1’de alüminyum alaşım grupları görülmektedir [7-9].

Alüminyum alaşımları için ısıtma işlemi işaretleri bir tireyle ayrılmıştır (örneğin 1100-O). Ana ısıtma işleminin alt grubu, harfle belirtilen ana ısıtma işlemi izleyen ek bir rakam daha alır (örneğin 1100-H14). Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan ana ısıtma işlemi gösterimi Çizelge 2.2’de, sertleştirme işlemleri Çizelge 2.3’de ve ısıtma işlemleri Çizelge 2.4’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Alüminyum alaşım grupları [7-9]

<b>Alüminyum Alaşım Grubu</b>	<b>Başlıca Alaşım Elementi</b>	<b>Özel Durum (ısıt işlem durumu)</b>
1xxx	En az % 99.0 veya daha fazla alüminyum	Uygulanamaz
2xxx	Bakır	Uygulanabilir
3xxx	Mangan	Uygulanamaz
4xxx	Silisyum	Uygulanabilir
5xxx	Magnezyum	Uygulanamaz
6xxx	Magnezyum ve Silisyum	Uygulanabilir
7xxx	Çinko	Uygulanabilir
8xxx	Diğer elementler	Uygulanabilir
9xxx	Kullanılmayan dizi	

**Çizelge 2.2.** Ana ısıt işlem işaretlerinin gösterimi [7-9]

<b>Harf</b>	<b>Anlamı</b>
F	Üretildiği gibi. Gerinme sertleşmesinin miktarı üzerinde bir denetim yok; mekanik özellikler üzerinde bir sınır yok.
O	Tavlanmış ve yeniden kristalleşmiş. En düşük dayanım ve en yüksek süneklik için ısıt işlem uygulanmış.
H	Gerinme (şekil değiştirme) sertleştirilmesi yapılmış. Soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Gerinme sertleştirilmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısıt işlem uygulanması takip eder. H' 1 genelde iki veya daha çok sayı takip eder.
T	Isıt işlem. F, O, H' den daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulanması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleştirilmesiyle birlikte uygulanır.

**Çizelge 2.3.** Alüminyum ve alüminyum alaşımların H (sertleştirme) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi [7-9]

<b>Harf</b>	<b>Anlamı</b>
H1	Sadece gerinme (şekil değiştirme) sertleştirilmesi uygulanmış. Gerinme sertleştirilmesinin derecesi ikinci rakamla belirtilir.
H2	Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kısmi tavllanmış. Başlangıçta istenenden fazla dayanıma sahip, soğuk işlenmiş malzemenin kısmi tavllanmasıyla elde edilir.
H3	Gerinme sertleştirilmesi uygulanmış ve kararlaştırılmış. Yaşlanma sertleşmeli alüminyum-magnezyum alaşımına uygulanan ve gerinme sertleşmeli alaşımın düşük bir sıcaklıkta ısıtılma tabii tutulmasıyla sünekliğinin artırılıp mekanik özelliklerinin kararlı hale getirildiği ısıtılma işlemlerdir.

**Çizelge 2.4.** Alüminyum alaşımların T (ısıtılma işlemi) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi [7-9]

<b>Harf</b>	<b>Anlamı</b>
T1	Doğal yaşlandırılmış. Ürün yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden itibaren soğutulmuş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T2	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma.
T3	Çözeltiye alma ısıtılma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T4	Çözeltiye alma işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T5	Yüksek sıcaklıkta şekil verme işleminden ve soğutulduktan sonra yaşlandırma.
T6	Çözeltiye alma ısıtılma işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış.
T7	Çözeltiye alma ısıtılma işlemi görmüş ve kararlaştırılmış.
T8	Çözeltiye alma ısıtılma işlemi görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış.
T9	Çözeltiye alma ısıtılma işlemi, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme yapılmış.
T10	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaşlandırma.

Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır. Mekanik özellikleri, içerdiği silisyum (Si), demir (Fe), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi elementlerin etkisi ile yükselmesine karşın kimyasal maddelere karşı olan direnci azalır; mekanik özellikler alüminyuma uygulanan şekil verme işlemine bağlı olarak da büyük ölçüde değişir [10-12].

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak üretilir. Dövme ve döküm alüminyum alaşımları kendi aralarında da ısıl işlem uygulanamayan (çökeltme sertleştirilmesi yapılamayan ya da soğuk şekil değiştirme sertleştirmeli) ve ısıl işlem uygulanabilen (çökeltme sertleştirmeli) olmak üzere ikiye ayrılırlar [7-9].

Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileridir. 1xxx serisi alüminyum alaşımlarında en az % 99,0 alüminyum olmaktadır ve demir ile silisyum bulunabilir. Yüksek dayanım için bakır katılır. 1100 alaşımının tavllanmış durumda çekme dayanımı 90 MPa civarındadır ve çoğunlukla şekillendirilen sac olarak kullanılmaktadır. 3xxx serisi alüminyum alaşımlarında manganez (Mn) ana alaşım elementidir ve alüminyumun dayanımı artar. Bu grupta en önemli alaşım 3003 serisidir ve aslında % 1,25 manganez katılmış bir 1100 alaşımıdır. 3003 alaşımının tavllanmış durumunda çekme dayanımı 110 MPa civarında olup iyi şekillendirilebilmenin istendiği yerlerde çok maksatlı bir genel alaşım olarak kullanılır. 5xxx serisi alüminyum alaşımlarında ana alaşım elementi magnezyumdur (Mg) ve çözelti sertleşmesi sağlamak için % 5'e kadar katılır. % 2,5 Mg ve % 0,2 krom (Cr) içeren 5052, grubun en önemli sanayi alaşımıdır. Tavllanmış durumda 5052'nin çekme dayanımı yaklaşık 193 MPa'dır [7-9].

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileridir. 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi bakır olmakla birlikte, çoğunda magnezyum da bulunur. Küçük miktarda başka bazı elementler de katılır. Bu grubun en önemli alaşımlarından bir tanesi % 4,5 Cu, % 0,6 Mn içeren 2024 alaşımıdır. Bu alaşımın ısıl işlemle mukavemeti artırılır.  $Al_2CuMg$  metallar arası bileşiği ısıl işlem sonucu oluşur. T6 durumundaki 2024 alüminyum alaşımının çekme dayanımı yaklaşık 442 MPa'dır. Uçak parçalarında yaygın olarak kullanılırlar. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının başlıca alaşım

elementleri, birleşerek  $Mg_2Si$  metaller arası bileşimini yapan magnezyum ve silisyumdur.  $Mg_2Si$  çökelti halinde bu alaşım grubunu güçlendirir. Bu grubun en önemli alaşımı olan 6061 alaşımı yaklaşık % 1.0 Mg, % 0.6 Si, % 0.3 Cu ve % 0.2 Cr bileşimindedir. T6 ısıtıl işlemi gördüğünde bu alaşımın çekme dayanımı 290 MPa civarında olup genel amaçlı yapı elemanı olarak ve uçak parçalarının yapımında kullanılır. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının başlıca alaşım elementleri çinko, magnezyum ve bakırdır. Bu alaşımlar ısıtıl işlem gördüğünde, çinko ve magnezyum birleşerek güçlendirici temel çökelti olan  $MgZn_2$  metaller arası bileşimini oluşturur. Bu grubun en önemli alaşımlarından biri 7075 serisidir. 7075 alaşımı T6 ısıtıl işleminden sonra yaklaşık 504 MPa çekme dayanımına sahip olup uçak parçalarının yapımında kullanılır [8,9].

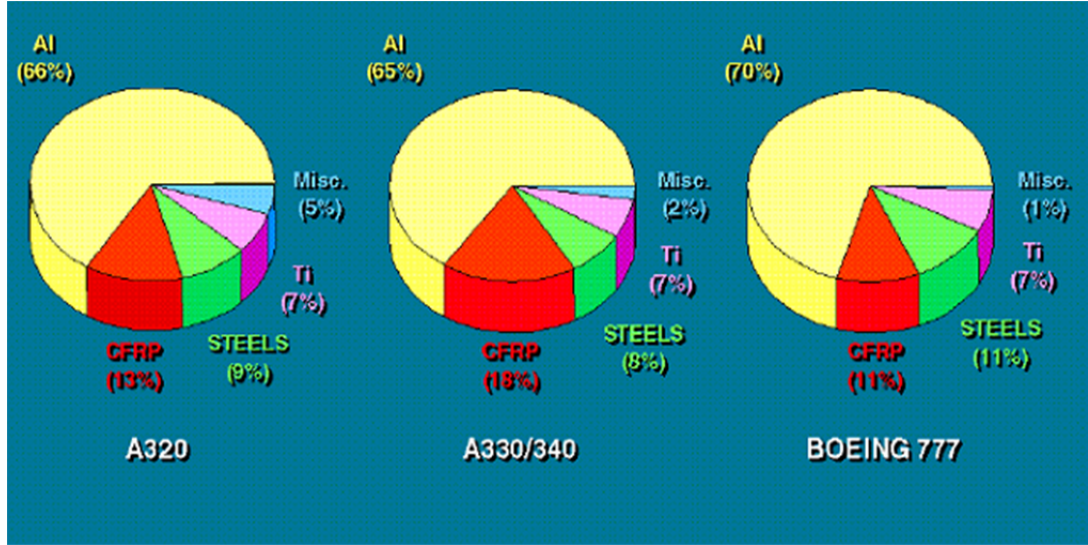
Alüminyum alaşımları kaynak yapılması zor olan malzemelerdir. Genel olarak ark kaynak tekniği ile birleştirilebilirler. Sıvı hal kaynak yöntemleri (ark, lazer ve elektron kaynağı) ve difüzyon kaynağı ile kaynaklanmalarında çeşitli hatalar oluşmaktadır. Ark kaynak tekniğinde yüksek ısı girdisi nedeniyle, bu malzemelerin ısıtıl genleşmelerinin yüksek olması ve katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması sonucu kaynak dikişinde çatlak oluşumu gözlenmektedir [7-10]. Oluşan hatalar yeni kaynak tekniklerinin geliştirilmesine yol açmıştır. En son olarak üzerinde çalışmalar yapılan kaynak tekniği sürtünme karıştırma kaynağıdır.

### 2.2.1. Alüminyum Alaşımlarının Uçaklarda Kullanım Alanları

Havacılık alanında taşıma kuvveti, sürüklenme kuvveti, ani hızlanma veya yavaşlamalar, aerodinamik yükler, iniş sırasında maruz kalınan yükler ve aracın kendi ağırlığı gibi kuvvetler altında çalışan hava araçlarında emniyet ve güvenilirlik çok önemli unsurlardır. Üretilen parçalar önceden belirlenen her türlü çalışma koşulunda kendilerinden bekleneni verebilmelidir. Dolayısıyla hava aracı üzerinde kullanılacak bir malzemenin kullanım şartlarının çok iyi bilinmesi ve bu şartlar altında özelliklerini koruyabilmesi gerekir. Günümüzde kullanılan hava araçlarının gövde yapılarının büyük bir kısmı alüminyum alaşımları kullanılarak imal edilmektedir. Alüminyum alaşımlarını pek çok uygulama için uygun ve

ekonomik kılan özelliklerin başında; görünümü, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımı gelir. Genel olarak yüksek sıcaklıklar için çok uygun olmayan bazı alüminyum alaşımları 300°C'ye varan sıcaklıklara kadar rahatlıkla kullanılabilir [10].

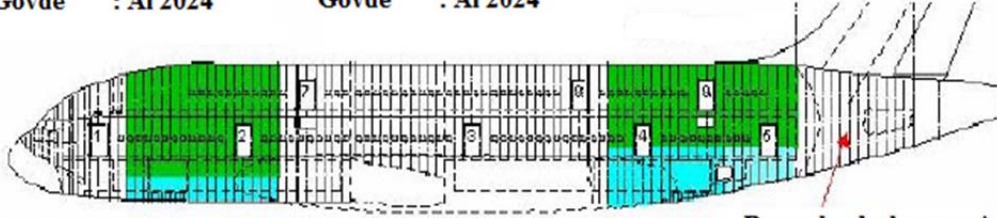
Şekil 2.1'de farklı uçak tiplerinde kullanılan malzemeler ve oranları görülmektedir. Kullanılan malzemeler arasında en yüksek oran alüminyum alaşımlarınca oluşturulmaktadır. Alüminyum alaşımlarının pek çok çeşidi kullanılmaktadır. Örneğin Airbus 380 yolcu uçağında 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Şekil 2.1) Yapılan yeni çalışmalar sonucu bazı alüminyum alaşımları yerini yenilerine bırakmaktadır. Airbus 380'in gövde yapısında 2024 alüminyum alaşımı yerini Pechiney tarafından geliştirilen 6056 alüminyum alaşımına bırakmıştır. Bu alaşımın tane sınır aşınmasına karşı hassasiyeti azaltmakta, daha iyi kaynaklanabilirlik sağlamaktadır [10,11].



Şekil 2.1. Alüminyum ve alaşımlarının uçaklar üzerinde kullanım oranları [11]

Üst Burun Gövdesi  
Kiriş : Al 7XXX  
Kaplama : Al 2524  
Gövde : Al 2024

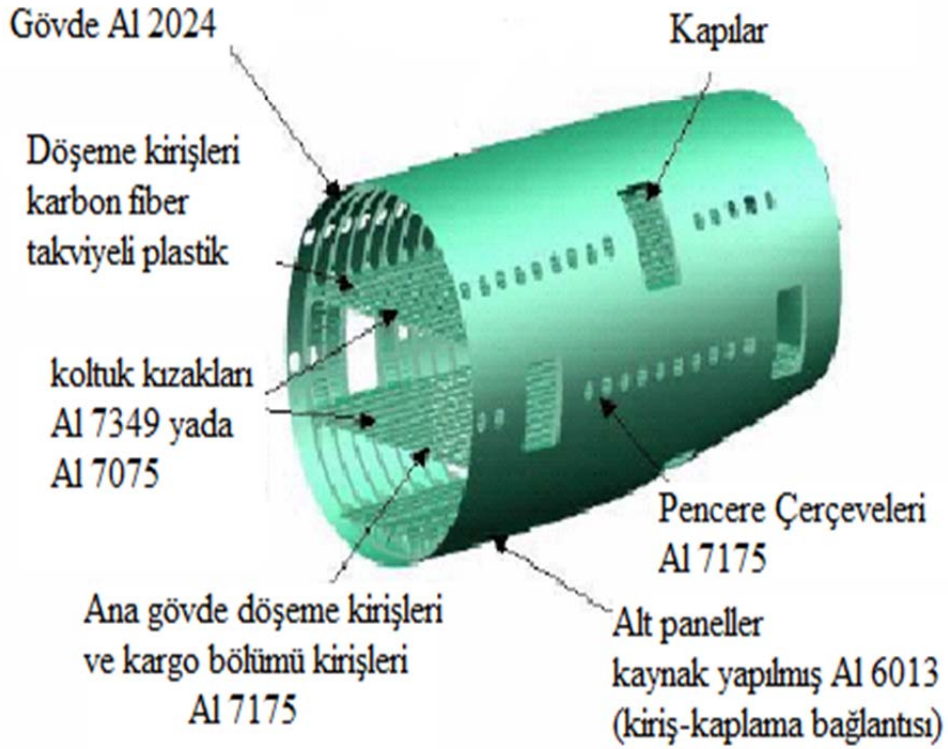
Üst Ana Gövde  
Kiriş : Al 7349 T76  
Kaplama : Al 2524 T3  
Gövde : Al 2024



Alt Burun Gövdesi  
Kiriş : Al 7XXX  
Kaplama : Al 2524  
Gövde : Al 2024

Alt Ana Gövde (kaynaklanmış paneller)  
Kiriş : Al 6XXX  
Kaplama : Al 6XXX  
Gövde : Al 2024  
Al 7075 (ağır yük binen)

Basınçlandırılmamış Arka  
Gövde  
Kiriş : Kompozit  
Kaplama : Kompozit  
Gövde : Kompozit  
Al 7075



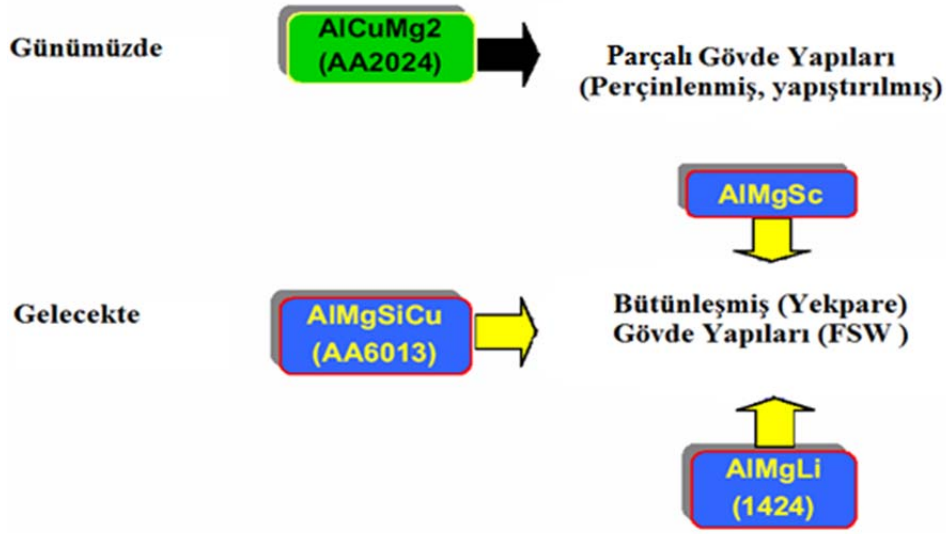
Şekil 2.2. Airbus 380 yolcu uçağı yapısında alüminyum alaşımların kullanım yerleri [11]

Günümüzde uçak gövdeleri perçinlenmiş, yapıştırılmış olarak oluşturulurken gelecekte tek parça olarak üretilmiş ve sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş halde üretilmesi planlanmaktadır. Bütünleşmiş gövde yapılarının kullanımı ile,

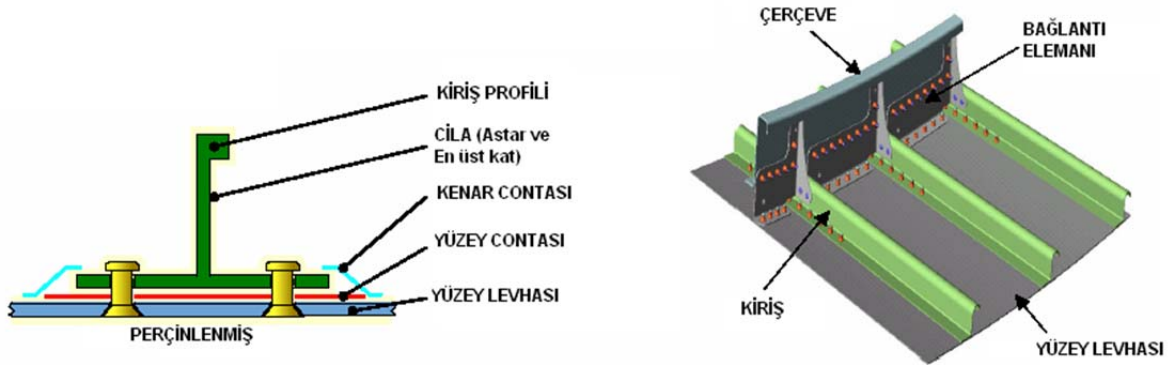
- maliyette azalma – max. % 15,
- yüksek seviyede otomasyon,
- malzeme ağırlığında azalma (birleştirme elemanları, conta, perçin, cıvata bulunmaması),
- imalat adımlarından tasarruf,
- ağırlıkta azalma – max. % 10,
- conta ağırlıklarında azalma,
- tasarımda daha fazla serbestlik,
- düşük yoğunluklu alüminyum alaşımları,
- korozyon dayanıklılığında gelişme,
- boşluklardan ve çatlaklardan bağımsız olma,
- perçin deliğinin olmaması,

üstünlükleri hedeflenmektedir [10-15].

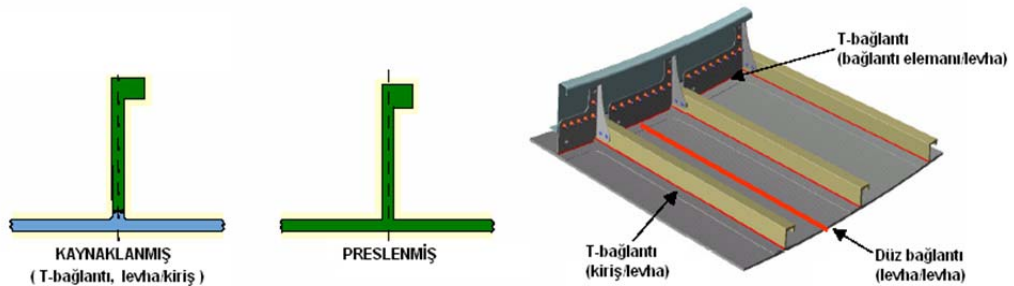
Şekil 2.3’de perçinlenmiş veya yapıştırılmış (parçalı) ve tek parça olarak üretilmiş ve/veya FSW yapılmış gövde yapıları gösterilmektedir.



**Günümüzde:  
Parçalı Gövde Yapıları**



**Gelecekte:  
Bütünleşmiş (Yekpare) Gövde Tasarımı**



Şekil 2.3.Parçalı gövde yapıları ve bütünleşmiş gövde tasarımının uçak parçalarında gösterimi [11]

### 3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (FRICTION STIR WELDING - FSW)

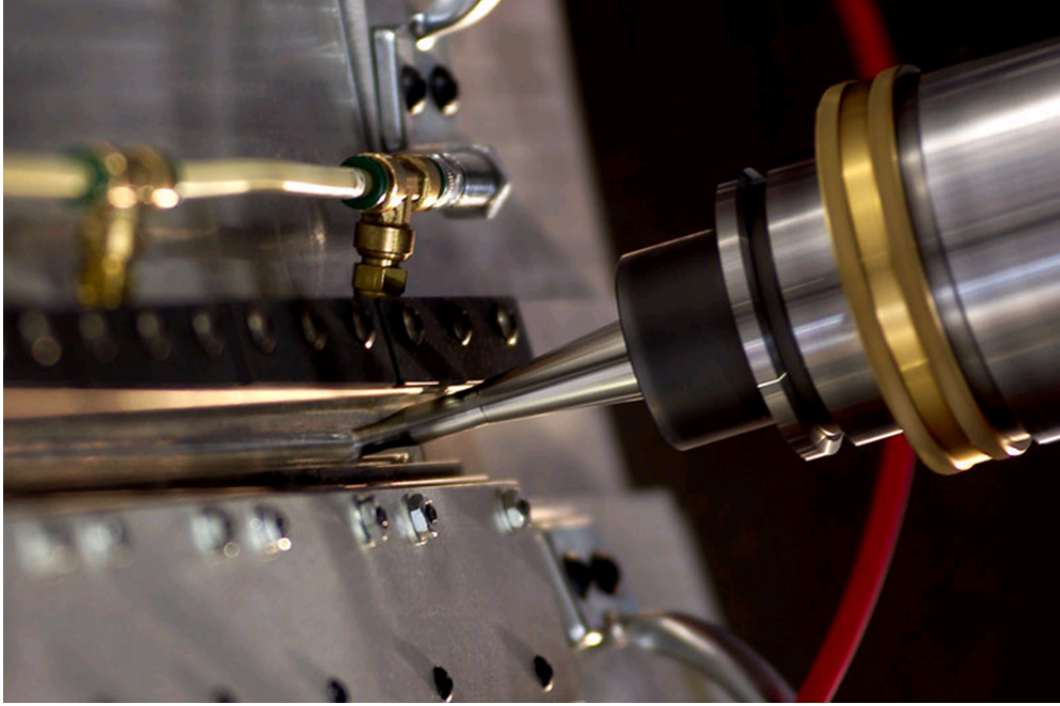
Yeni bir kaynak tekniği olan FSW, Cambridge İngiltere’de bulunan The Welding Institute (TWI) tarafından 1991 yılında bulunmuş ve aynı yıl kendileri tarafından patentlenmiştir. Teknik, öncelikle kaynağı zor, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında kullanılmış, daha sonraları birçok malzeme ve alaşıma uygulanarak geniş bir ticari alana sahip olmuştur. FSW, geleneksel yöntemlerle kaynak yapılabilme kabiliyeti düşük olan alüminyum alaşımları gibi malzemelerin, düşük füzyon kaynaklanabilme özelliği ile kaynak yapılabilmelerine olanak sağlamıştır. Bu kaynak bağlantıları çok az kaynak bozulmalarına (porosite, yetersiz ergime, yetersiz nüfuz etme, ısıdan etkilenmiş bölge çatlakları, yüzeye açık büzülme çatlakları, kalıntılar, bindirme ve yanlış hizalama vb.), yüksek mekanik dayanıma ve iyi yorulma performansına sahiptirler. FSW alüminyum, kurşun, magnezyum, çelik, titanyum, çinko, bakır gibi metallerin ve metal matrisli kompozitlerin bozulma olmaksızın kaynak yapılmasını sağlamaktadır [16-21].

FSW günümüzde uçak, tren, roket, otomobil, gemi ve helikopterler gibi araçların imalatında, köprü ve yol yapımında, bina inşasında, geniş yüzeyli uygun kalınlıktaki levhaların birleştirilmesinde kullanılmaktadır.

Havacılık alanında FSW en geniş anlamda ve yapısal parçalarda kullanılmak üzere, çift jet motorlu Eclipse-500 uçağında kullanım alanı bulmuştur. Eclipse Havacılık Anonim Şirketi, Eclipse-500 uçağını düşük maliyetli taşıyıcılar için tasarlamış ve topla-dağıt sistemindeki havayolu işletmelerine alternatif yaratmayı amaçlamıştır. Üretim ve işletim maliyetlerinin düşük olmasıyla, Eclipse-500 büyük havayolu taşıyıcılarıyla rekabet edebilecek noktadan-noktaya hava taksi şirketlerine temel oluşturmuştur. Eclipse-500’ü düşük maliyetli taşıyıcı yapan da FSW’dir. FSW ispatlanmış kaliteyle, otomatik perçinle birleştirme yöntemine nazaran 6 kat ya da elle perçin yöntemine göre 60 kat daha hızlı üretim sağlamaktadır. Bu uygulama ile FSW havacılık otoriteleri tarafından, yüksek dayanım ve iyi yorulma özellikleri ile uçak yapım zamanını, maliyetleri ve ağırlığı azaltan bir teknoloji olarak kabul edilmiştir [22,23].

FSW'nin diğerk bir avantajı da ince kesitlerin (<3 mm) kaynak yapılmasını sağlamasıdır [22,24-29]. Şekil 3.1'de FSW uygulaması görölmektedir.

Büyük gövdeli ticari uçaklarda ise FSW ilk olarak Airbus UK firması tarafından kullanılmıştır. Airbus, FSW'den TWI'deki ortaklığı nedeniyle haberdar olmuştur ve TWI ortak bir grup kurarak sponsorluk yapmıştır. Buradaki amaç yöntemin güvenilirliğinin incelenmesi ve uygulanabilirliğinin test edilmesidir. Bu program 1996 yılında başlamıştır ve uçak parçaları üzerindeki uygunluk ve kalite testleri başarılı sonuçlar vermiştir. 1997 yılında Airbus şirketinde bir FSW cihazı oluşturulması için çalışmalara başlanmış, 1999 yılında da kurulmuş, 2000 yılında uçak kanat yapılarında kullanılmaya başlamıştır [24,25]. Airbus şirketinin en büyük rakibi, Amerika Birleşik Devletleri Ordusu'nun birçok gereksinimi karşılayan Boeing şirketi, C-217 Globemaster askeri uçağının kargo bölümünde bulunan yükleme-boşaltma sağlayan uçak palet sisteminin oluşturulmasında FSW tekniğini ilk kez kullanmıştır [26].



Şekil 3.1. Eclipse-500'den bir FSW uygulaması [27]

### 3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılışı

FSW kaynak tekniğinde, birleştirilecek olan iki parça birbirine temas ettirilerek takviye plakasının üzerine yerleştirilir ve mengene ile sıkıştırılır. Bir uç (pim) ve uç omzu (destek) içeren alet döndürülür ve yavaşça ek çizgisinin içine daldırılır. İki parçanın, eklenen yüzlere farklı kuvvet uygulanmayacak şekilde sıkıştırılması gerekmektedir [19-21].

FSW aletinin, malzemeyi mekanik özelliklerini kaybettirmeden yumuşatması gerekir. Bu sebeple, alet yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik uygunluğa sahip, yıpranmaya dayanıklı malzemeden imal edilmelidir. Sonuç olarak FSW aleti uç ve uç omzu olmak üzere iki parçadan oluşur.

Ucun geometrisi kaynağın derinliğine bağlıdır. Silindirik ya da konik olabilir. Ayrıca, sarmal yapıda yivlere (vida adımlarına) sahiptir. Bu yivler, yumuşayan kaynak metalinin aşağı yönde ilerlemesini sağlar ve akış yolunu büyütür. Ucun uzunluğu, ek yerinin derinliğinden bir parça daha kısa olmalıdır (0,1-0,2 mm kadar) öyle ki, takviye plakası ile iki parçanın kaynaklanmasını önlemelidir. Ucun çapı, ek yerinin kalınlığı ile orantılıdır. Sonuçta daha iyi bir yapı elde etmek için yivlerin var olması önemlidir [28-40].

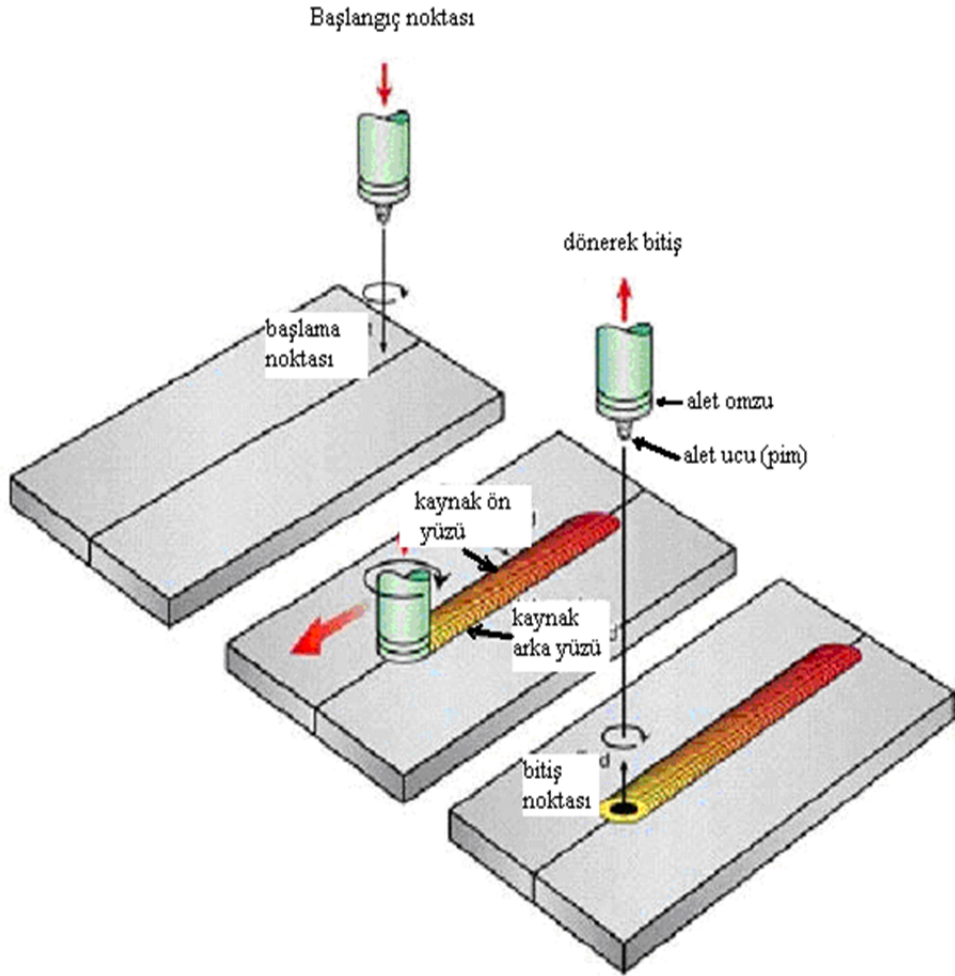
Uç omzu, aletin üst kısmıdır. Döndürülmesi ile işlem için gerekli olan ısının büyük çoğunluğu üretilir. İlk FSW aletleri, düz omuzlara sahiptiler ki bu durum kaynak yüzeyinde, kaynak fazlalıklarının oluşmasına sebep olmaktaydı. Bu durumdan kaçınmak için, şimdilerde hafif içbükey olan uç omuzlarının kullanımı yaygınlaşmıştır [32-40].

Aletin tasarımı ve optimizasyonu, malzemeye ve ucun geometrisine ait parametrelere göre yapılır. Bu parametreler şu şekilde sıralanabilirler:

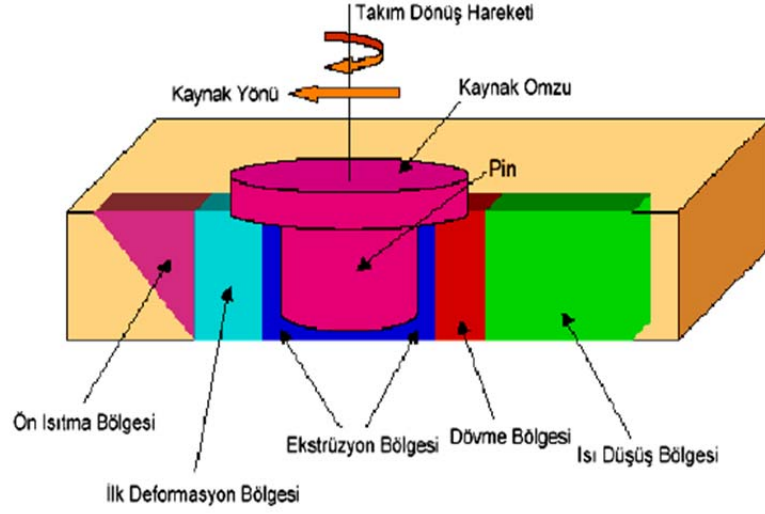
- Yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikler
- Yüksek sıcaklıklarda oksidasyona dayanma gücü
- Isıl iletkenlik
- Uç omzunun çapı ve ucun uzunluğu

FSW sürecinde alet, ek çizgisinin içine daldırıldığı zaman sürtünme sonucu bir ısı oluşturur. Bu ısı, malzemenin ergime noktasına ulaşmayacak şekilde malzemeyi yumuşak hale getirir. Aynı anda, uç omzu, çalışılan parçanın

üst yüzeyi ile yakın temasta bulunarak yumuşayan malzemenin dağılmasını önler. Böylece yumuşamış malzeme ucun hücum kenarı arkasında karıştırılmış ve sıkıştırılmış olur. Bu durumda yumuşamış malzeme, katı durumdaki kaynağı oluşturacak şekilde birleşir ve soğur. Bundan sonra kaynağın kendisi ve yanında oluşan bölge, yüksek mekanik dayanımlı ana malzemeden daha iyi tanecikli yapıya sahip olur. FSW tekniğinin uygulanması Şekil 3.2’de ve parça üzerindeki şematik görüntüsü Şekil 3.3’te gösterilmektedir [20-28].



Şekil 3.2. FSW tekniğinin uygulanmasının şematik gösterimi [20]



Şekil 3.3. FSW tekniğinin parça üzerindeki şematik görüntüsü [28]

Sürtünme karıştırma kaynağı termo-mekanik bir süreçtir ve bu sebeple geleneksel metotlardan farklı parametrelere bağlıdır. Süreç kurulurken, doğru gruptaki değişkenlerin seçilmesi gerekir. Seçilebilecek süreç parametreleri şu şekildedir [16-19,20]:

- Aletin boyutları
- Aletin eğim açısı
- Aletin dönüş hızı
- Aletin içeri girebilme derinliği
- Kaynak hızı
- Dikey yük
- Yatay yük

Bu parametrelere dayanarak, bükülme momenti, kaynak sırasında malzemenin sıcaklığı ve ısı girişi ölçülebilir.

FSW süreci, üzerinde çalışılan parçanın malzemesinin ergime noktasının altında, katı fazda gerçekleştiği için bazı avantajlara sahiptir.

FSW sürecinin, eritme kaynağına göre avantajları şunlardır [16-30]:

- Düşük deformasyon, bozulma, porozite ve büzülme
- Mükemmel mekanik özellikler

- Dumanın, gürültünün, kıvılcımın ve kıvılcım sıçramasının olmaması
  - Tekrarlanabilirlik
  - Düşük maliyetler
  - Dolgu malzemesinin ve gaz koruyucusunun olmaması
  - Kaynak esnasında tüketilecek herhangi bir ek malzemeye ihtiyaç olmaması
  - Deneyimli uygulayıcı personele ihtiyaç olmaması
- FSW'nin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar da şu şekilde sıralanabilir:
- Kaynak işleminin sonunda kaynak deliğinin var olması
  - Üzerinde çalışılan malzemenin hareketinin önlenmesi için çok sıkı sabitleme gerekliliği
  - Üzerinde çalışılan malzemenin desteklenmesi için takviye çubuğunun var olması
  - Kaynak hızının, ergime kaynağına göre kısmen daha yavaş olması

### 3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Bölgeler

Sadece yapı ve kaynak dikişinin (kaynak izinin) özellikleri değil, aynı zamanda bütün kaynak alanı önemlidir. Kaynak yapılan bir parçada dört bölge mevcuttur [19-21]:

1. Etkilenmeyen bölge
2. Isıdan etkilenen bölge (Heat Affected Zone, HAZ)
3. Termo–mekanik etkilenen bölge (Thermo-Mechanically Affected Zone, TMAZ)
4. Kaynak dikişi (Kaynak izi)

**Etkilenmeyen bölge:** Bu kısım, kaynak bölgesinden en uzak olan bölümdür. Ek merkezindeki ısı iletimi sonucu oluşan az miktardaki ısı çevrime maruz kalabilir; ancak herhangi bir deformasyon göstermez. Bu kısmın mikroyapısı ve mekanik özellikleri ana malzeme ile aynıdır [19-21].

**Isıdan etkilenen bölge:** Bu kısım, FSW'nin mikroyapıda ve mekanik özelliklerde değişime sebep olduğu bölgedir. Bununla birlikte, bu bölgede plastik deformasyon oluşmaz [19-21].

**Termo–mekanik etkilenen bölge:** Bu bölgede, malzeme ısı artışına bağlı olarak plastik deformasyona eğilimlidir. Alüminyum alaşımlarında, bu bölgeyi iki alt bölgeye ayırmak mümkündür. Bu bölgelerden bir tanesi, önemli ölçüde yeniden kristalleşme olmaksızın plastik özellikler gösterir. Diğeri ise genellikle, yeniden kristalleşen bölge ve TMAZ arasında belli olan bir sınırdır. Bu davranış sadece alüminyum alaşımlarında olduğu için, bu ayırmadan vazgeçilmiştir. Diğer malzemelerde, ayrı bir yeniden kristalleşmeyen bölge mevcuttur. TMAZ’ın tamamında yeniden kristalleşme görülmektedir [19-21].

**Kaynak dikişi:** Ek yerinin diğer bölgelerinden daha yüksek mekanik karakteristiklere sahip oldukça iyi ve değişmez bir mikroyapı gösterir. Kaynağın ortasında yer alır. Bu kaynak dikişi çoğunlukla asimetriktrir [19-21].

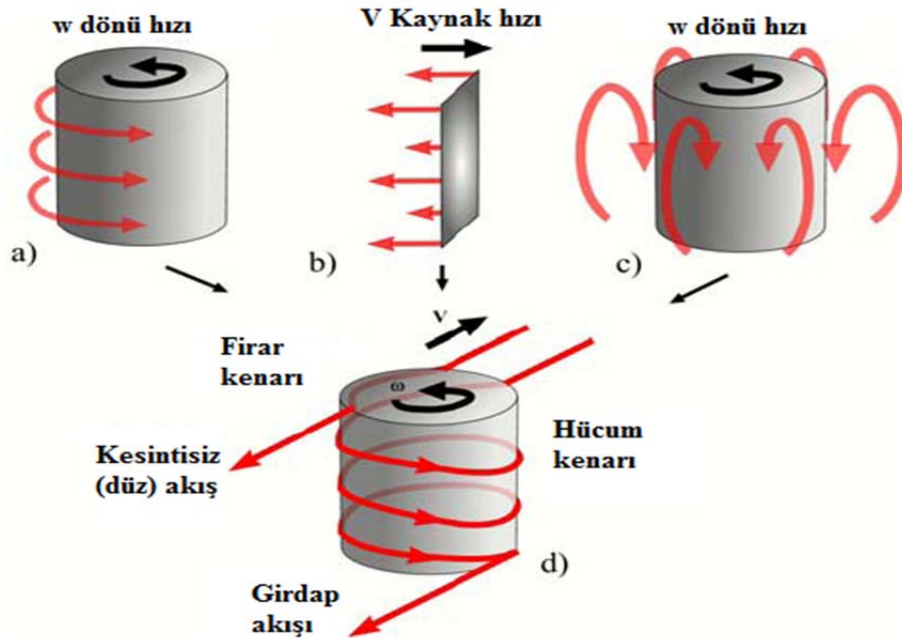
### 3.3. FSW Uygulamasında Malzeme Akışı

FSW aleti etrafındaki karmaşık akış üç basit akış bileşenine bölünebilir [31-32] :

- (i) Birinci akış bileşeni, silindirik kesme yüzeyi tarafından kaynağın geri kalanından ayrılan, ucun dönüşü ile kaynaklanan malzemenin silindirik-hız süreksizliğinin bir yüzeyi (Şekil 3.4.a) olarak düşünülebilir. Bu dönen silindir FSW aletine iliştilirilmiş olarak düşünülebilir. Sınırları, omuz şeklini de hesaba katacak şekilde alet omzuna kadar genişleyebilir. Dahası, kalınlığı firar kenarına uç hareket ettikçe ucun arkasına metal akışını sağlayacak şekilde arttırılabilir. İnce kalınlıktaki malzeme durumunda, bu silindir kısa uç uzunluğunun göz önüne alınması için konik bölge olarak tanımlanabilir. Kesme yüzeyi, bu durumda, omuz köşesi ile ucun en altı arasında yer alır.
- (ii) İkinci akış bileşeni, kaynaklama hızına eşit ve ters yönde olan homojen ve izotropik akış alanıdır (Şekil 3.4.b). Benzer üretim süreçlerinde püskürme hareketi olarak da adlandırılır.
- (iii) Üçüncü bileşen, aleti çevreleyen ve metali omuzun içinde dışarı taraftan yukarı taşıyan, ucun aşağı bölgeleri üzerinde malzemeyi içeri ve dışarı aşağı taşıyan halka girdap akışıdır (Şekil 3.4.c). Bu akış uç üzerinde

dişler ve helezonlar ile elde edilebilir ve dişlerin ve helezonların ters yöne çevrilmesiyle ters yönlendirilebilir. Bu dikine hareket iz deneyleriyle ortaya konabilir [31-32]. Schmidt ve ark. [33] tarafından dört dişli uç ile yapılan deneylerde, işaretleyici, ucun etrafında 18 dönüş işareti bırakmıştır. Bu durum genellikle işaretleyicinin bozulmasına ve ayrışmasına sebep olmaktadır.

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, bu üç akışın birleşmesi yerleşime bağlı olarak düz (kesintisiz) ve girdaplı akımların oluşması ile sonuçlanmaktadır. Hücum kenarına (ileri giden tarafa) yakın malzeme uzun bir ark boyunca dönen silindirde yol alır ve uzun bir süre halka girdabının aksenal akışını ortaya çıkarır. Sonuç olarak, girdap akımı metali kaynağın en altına getirir. Dolayısıyla, girdap akımı kalıntıları, malzemeyi muhafaza etmek için hücum kenarına doğru serbest kalırlar. Diğer taraftan, firar kenarındaki metal, halka girdabına kısa süre maruz kaldığı için düz akımlar geri giden tarafı işgal ederler. Düz ve girdaplı akımların miktarları belki de omuz yüzeyi üzerinde oluşan kesmeye karşı sürtünmedeki değişimler sebebiyle gözle görünür biçimde kararsızdır [34-36].

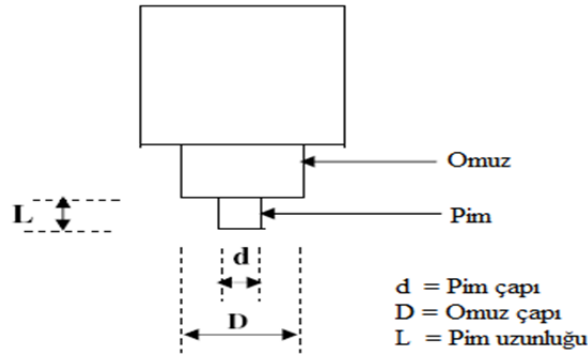


Şekil 3.4. FSW aleti etrafındaki akış [31]

### 3.4. FSW Uygulamasında Kullanılan Uçlar (Pimler) ve Omuzlar

Kaynak parametreleri, FSW işleminde uygulanan birleşme noktalarının kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [32-34]. Uç-omuz tertibatının dönüş hızı, kaynak hızı, aşağı yönlü dövme kuvveti ve son olarak da alet tasarımı, sağlam ve homojen bir kaynak elde edebilmek için en uygun hale getirilmelidir [31,32]. Birleşim yerlerinin özelliklerini değiştirebilen farklı tasarımlar ve alet parametreleri (omuz çapı, ucun boyutu ve şekli) FSW uygulamasında önemlidir.

Son 15 yıl süresince birçok sayıda uç ve omuz geliştirilmiş ve bunlar farklı malzemeleri, parça kalınlıklarını ve bağlantı tiplerini birleştirmek için kullanılmışlardır. Şekil 3.5.'te basit bir uç-omuz bağlantısı ve temel ölçüleri gösterilmektedir [31,37].

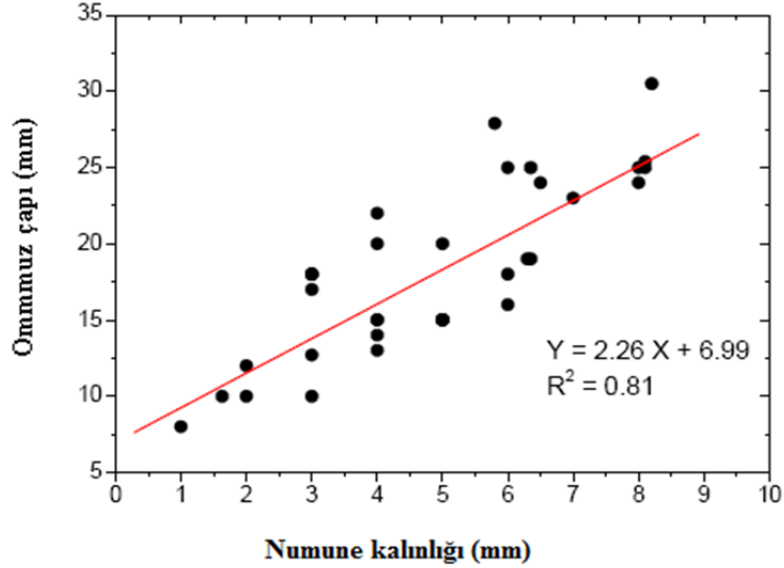


Şekil 3.5. Bir uç-omuz bağlantısı ve temel ölçüleri [37]

#### 3.4.1. Omuz çapı ve şekli

Omuz boyutu, FSW tekniğinin birincil öneme sahip esas değişkenidir. Uygulanan basma kuvveti ve dönüş hızı değişkenleri, ısı girişi fonksiyonuna birinci dereceden (lineer) etki ederken, omuz yarıçapı üçüncü dereceden etki etmektedir. Dolayısı ile sağlam bir kaynak elde edilmesi büyük ölçüde alet boyutuna bağlıdır [31]. Ayrıca, Z-ekseni basma kuvveti de omuz yarıçapının bir fonksiyonudur. 30 farklı numune için, omuz çapları ile levha kalınlıklarının yer aldığı etkileşim Şekil 3.6'da görülmektedir. Kalınlık arttığında daha fazla enerji

girişi gerekli olur ve bu da daha geniş omuz çapı tasarımı ile elde edilebilir. Omuz çapının küçülmesi durumunda ısı üretiminde meydana gelen azalma, dönüş hızının artırılması ile dengelenebilir [31,37].



Şekil 3.6. Omuz çaplarının levha kalınlıklarına göre değişimi [31]

Literatürde kaydırma tip ve kapak tip olmak üzere iki farklı omuz şekli ortaya çıkmıştır. Bunlardan ilki büyük çaplı aletler için tercih edilirken diğeri işleme kolaylığı açısından küçük çaplı aletler için tercih edilmektedir. Kaydırma tipi omuz, yüzey malzemesini dişli uca doğru çekecek şekilde aletin dönüşünün tersi yönde yerleştirilir. Bu profil yüzey pürüzlülüğünü düzeltir, çıkan çapakları azaltır ve aletin, üzerinde çalışılan yüzeye dik bir şekilde kalmasını sağlar. Bazı çalışmalarda görülmüştür ki, kaydırma tipi omuz kullanıldığı durumlarda FSW'ye maruz kalan tabakalarda gerilme korozyonu çatlak ilerleme oranı daha düşüktür [31-37].

İçbükey omuzlar, düz ve dışbükey helezonik omuzlar, vb. çeşitli omuz konfigürasyonları, sürtünme karıştırma kaynağı ve süreçte kullanılan alet tasarımları dahilinde ele alınmıştır. Farklı omuzlara sahip aletlerle alüminyum alaşımlarda üretilen kaynakların incelenmesi ile omuz pürüzlülüğünün ve kaynakların en üst tabakasındaki metal deformasyonunun büyük ölçüde omuz tasarımından etkilendiği tespit edilmiştir. Düz ek noktaları, eklem bağlantıları,

sürtünme karıştırma kaynağına uğramış malzeme, vb. üzerindeki yüzey hasarlarını azaltmak için farklı kıvrım yapılarına sahip aletler test edilmiştir [38].

Sürtünme karıştırma kaynağının ve işlem aletlerinin omuzu, iç mikro-yapı özelliklerinden ve değişimlerinden dolayı doğrudan ve dolaylı olarak, kaynaklanan ve işleme maruz kalan bölgelerin birçok özelliğini etkilemektedir. Alet omzunun işlevleri arasından en önemlisi, düzgün tutulmayı ve sağlamlığı garanti edebilmek için malzemenin denetimidir. Bu bağlamda omuzun verimliliği, yüzey pürüzlüğü ve kaynak hattı düzgünlüğü boyunca üretilen çapakların miktarı ile ölçülebilir. Oldukça çok çapağa sahip pürüzlü kaynak aleti hatları, çoğunlukla tekrar çalışmayı gerektirir. Dolayısıyla, kaynak ve işlem aletlerinin, mümkünse, minimum çapaklanmalı kaliteli kaynak hattı işleme üretebilen, verimli omuzlara sahip olmalıdır [37,38].

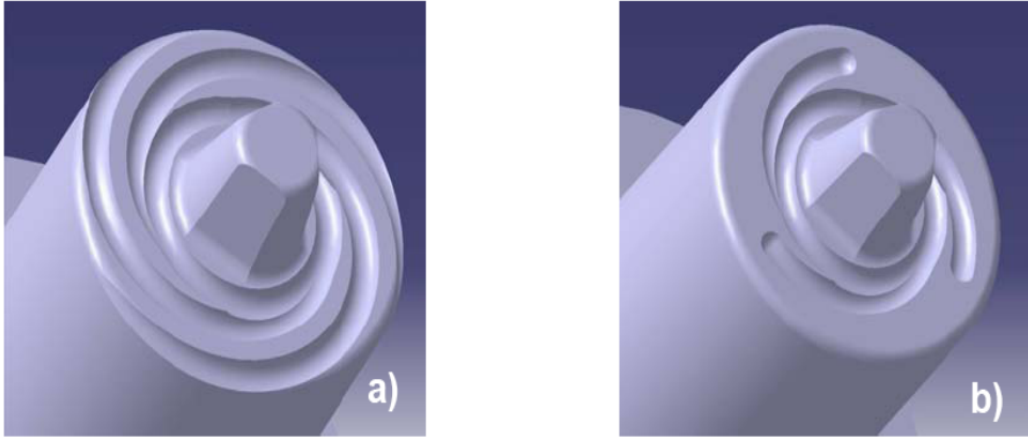
İyileştirilmiş kaynak hattı özellikleri için omuz tasarımı yapılırken, omuzun yüzey bozulması ve iç malzeme akışı üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Alet hattındaki yüzey bozukluğu, alet tarafından üretilen dönel akış omuz geometrisi ve aletin üzerinde çalışılan parça yüzeyine göre nasıl yönlendirilmiş olduğu ile kontrol edilen omuzun altındaki güç dağılımı tarafından etkilenmektedir. Örneğin, helezonlu içbükey ya da helezonlu düz omuz, maddesel hidrostatik ve sapma/fark gerilmeleri probun arkasına yönlendirecek şekilde arkaya eğimlendirilebilir. Dışbükey alet toplanmış gerilme dağılımını doğrudan probun etrafına verecek şekilde kullanılabilir [31,37,38].

Omuzun malzeme akışına katkısı omuzun, üzerinde çalışılan malzemeyi proba ne kadar iyi yönlendirdiğine bağlıdır. Üzerinde çalışılan parçayı tutmak için yeterli içe yönlenmiş çekme kuvvetine sahip omuzun ihtiyacı vardır [31,37,38].

Helezonlar, FSW ve FSP (Friction Stir Process) alet omuzları altında içe yönlenmiş çekme kuvvetini geliştirebilmek için kullanılan geometrik yapılar içinde en kullanışlı olanlarıdır. Verilen alet tasarımına tek ya da çok sayıda helezon ilave edilebilir. Ancak, tasarımın verimliliği alet boyutuna, üzerinde çalışılan malzemeye, alet üretim imkânlarına, aletin malzemesine vb. bağlıdır. Helezonlar, ağırlıklı olarak oyuk veya düz alanlardan oluşurlar [38].

Sürtünme karıştırma kaynağı ve helezonlu omuzlara sahip işlem aletleri (FSP) tarafından üretilen kaynak hattı yüzey kalitesini iyileştirmek için Wiper

olarak adlandırılan geometrik özel bir aksam geliştirilmiştir. Wiper tasarımı omuz üzerinde helezonların tek sarmal olarak ilerlemeyip üç sarmalın iç içe geçmiş halidir. Helezonlar yüzeye açılmayarak omuz içinde sonlanmaktadır. Bu kendine özgü aksam Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.7.a, uçtan kenara doğru ya da omuz sahasına doğru uzayan eşit aralıklı üç helezon içeren helezonlu bir omuz yapısını göstermektedir. Şekil 3.7.b, aynı aletin Wiper aksamı eklenmiş halini göstermektedir [38].



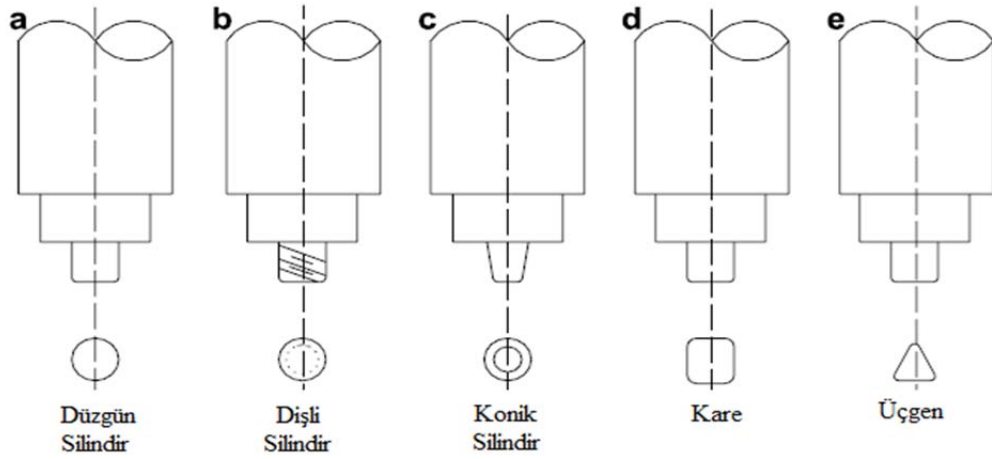
**Şekil 3.7. (a)** Omuz yüzeyinin kenarından dışarı doğru uzanan helezonlara sahip tipik bir FSW helezonlu omuz konfigürasyonu. **(b)** Aynı omuz konfigürasyonunun Wiper tasarımı eklenmiş hali [38]

Verilen bir omuz yüzeyine Wiper aksamının dahil edilmesi düzgün, sürekli alet omuz kenarı ve sıkı bir yüzey alanı sağlar. Bu, verilen değişken sürtünme katsayılı (alüminyum üzeri alüminyum ve alet malzemesi üzeri alüminyum arasında değişmektedir) omuz yüzeyinin kenarına uzayan helezonların kesintili yüzey kenarının aksine bir durumdur [31,37,38].

### 3.4.2. Uç (pim) boyutu ve şekli

FSW alet tasarımında önemli parametrelerden biri de dinamik hacmin (dönme hareketi sırasında ucun süpürdüğü hacim) statik hacme (ucun kendi hacmi) oranıdır. Bu oranın artırılması kaynaklarda boşluk oluşumunu azaltır ve yüzey oksitlenmesinin mikroyapı içinde daha etkin bir biçimde dağılmasına ve

çözülmesine olanak verir. Geleneksel FSW’de dinamik/statik oran, yeniden girişli uç, dişli uç, helezonik uç ve/veya yassı uç kullanılarak artırılabilir [28-32]. Yassı uçlar bir bıçağın keskin kenarı gibi davranırlar. Malzeme, uçlarla yakalanır ve sonra tam karışmayı destekleyecek şekilde aletin arkasına bırakılır. Bu prensibin bir uzantısı da sürtünme veren karıştırma tekniğidir [31-38]. Şekil 3.8’de farklı tipte uç geometrileri verilmiştir.



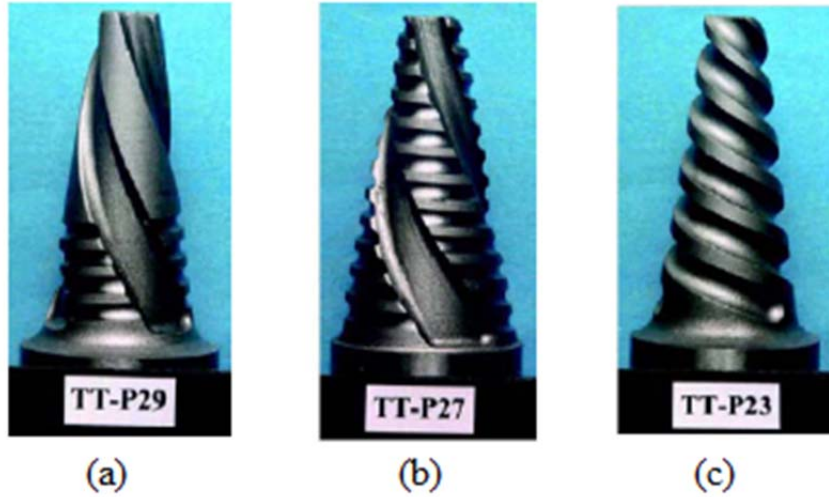
Şekil 3.8. Değişik geometride uçlar [37]

Son 15 yıl süresince birçok sayıda alet geliştirilmiş ve bunlar farklı malzemeleri, parça kalınlıklarını ve bağlantı tiplerini birleştirmek için kullanılmışlardır [16-32]. İnce levhaların kaynaklanması (<12 mm) için en sık kullanılan aletler, kısa uçlar üzerinde de üretilebilecek basit şekillerinden silindirik dişli uçlar ve Trivex’tir. Daha kalın malzemelerin kaynaklanması için (>12 mm), Triflute ve Whorl genellikle kullanılır. Kaydırma bağlantı için en çok kullanılan aletler ise Flared-Triflute, Skew ve Whisk tiptir. Klasik FSW aleti Şekil 3.9’da gösterildiği üzere silindirik ve konik dişli uçtur. Triflute (Şekil 3.10.a ve Şekil 3.10.b), Whorl geometrisinden üç helezon eklenerek geliştirilmiştir. Bu alet akış artışı ve yeterli karıştırmayı sağlamak ve böylece boşluk oluşumunu azaltmak ya da yok etmek için geliştirilmiştir. Dahası bu geometri, kaynak işlemi süresince aleti döndürmek için gerekli olan döndürme momentini ve kuvvetini de azaltır. Bu aletin uçları kesik koni olarak şekillendirilir. Bunun sebebi bu

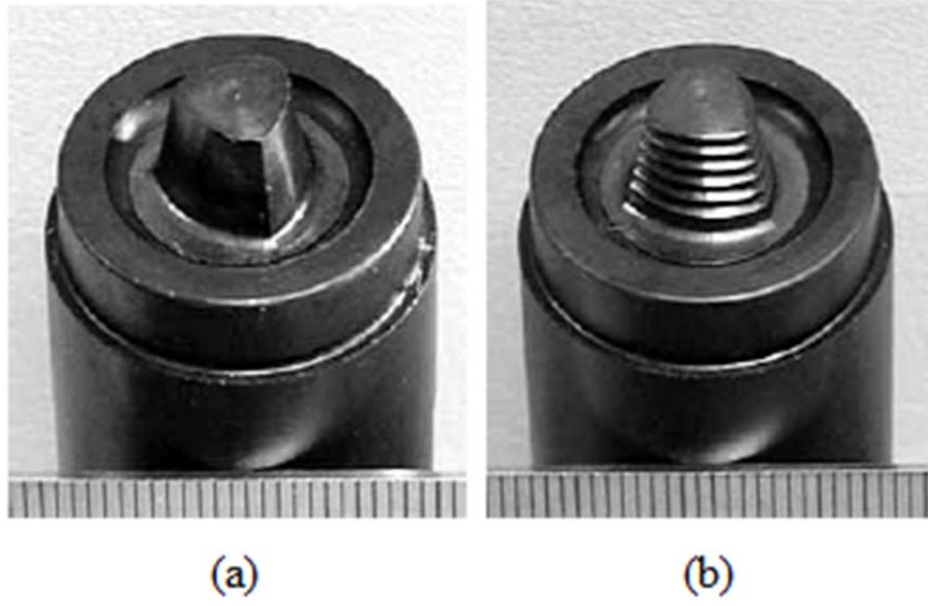
şekillendirmenin aynı kök çapına sahip silindirik aletten daha az hacim kaplamasıdır. Şekil 3.11’de Trivex ve MX Trivex uçları göstermektedir. Daha önce de söylendiği üzere, dışbükey şekil malzemenin kaymasını sağlar. Trivex ucu MX Trivex ucuna göre daha az çapraz kuvvete sahiptir. Bu durum dişlilerin, kesme gerilimini taşıyan alanı artırmasının bir sonucudur [31,37,38].



Şekil 3.9. (a) Silindirik kısmi dişli uç, (b) Konik dişli uç [31]



Şekil 3.10. (a) Triflute uç, (b) Triflute uç, (c) Whorl uç [31]

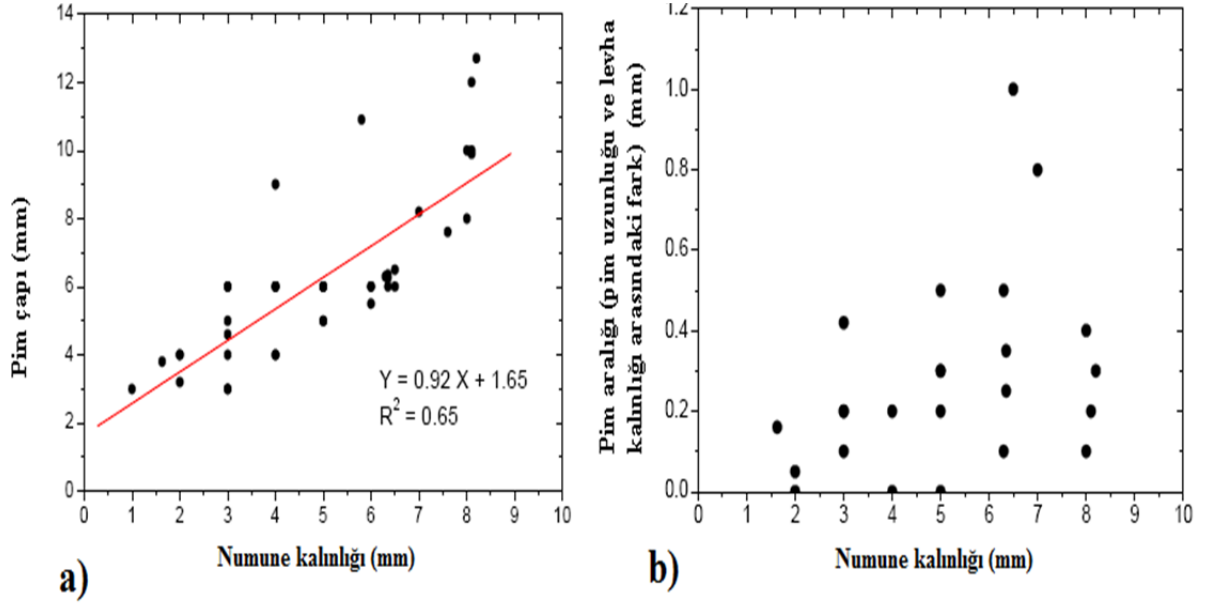


Şekil 3.11. (a) Trivex ucu, (b) MX Trivex ucu [31]

Şekil 3.12, literatürde yer alan 28 farklı düzenek için, uç çapını ve uç aralığını levha kalınlığının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 3.12.a'da gözlenen genel davranış eğilimi, 1 mm ile 8.3 mm aralığındaki kalınlıklar için uç çapının levha kalınlığına yaklaşık olarak eşit olmasıdır. Ayrıca, minimum uç yarıçapı da yaklaşık olarak 3 mm'dir. Uç yarıçapının alabileceği değerlerin aralığı büyük olabilir. Örneğin, 8mm kalınlığındaki levhanın kaynağında, 8 mm'den 13 mm'ye kadar uç çapları hatasız bir kaynak sağlar. Reynolds ve arkadaşları, 8mm'den 12 mm'ye kadar olan uç çaplarının, x-eksenindeki kuvvetlere (kaynaklama yönü boyunca oluşan kuvvetlere) ve özgül kaynak enerjisine etkisini incelemişlerdir. Bu aralıktaki alet geometrileri için, uç çapının gerekli x-ekseni kuvvetleri ve özgül kaynak enerjisi üzerinde bir etkisi olmadığı ortaya çıkmıştır [31-38].

Şekil 3.12.b, uç aralığının (uç uzunluğu ve levha kalınlığı arasındaki fark) değişimini göstermektedir. Bu değer, süreç sırasında aletin daldırılması sırasında hesaba katılmaz. Uç aralık değeri, kaynağın kökündeki yeterli plastik deformasyonu güvence altına almak için önemlidir. Eğer uç aralığı çok küçük olursa, bu durum kökte bağlanmamış alanlar ve çekme süresince erken çatlaklar meydana getirebilir ya da bükülme/kıvrılma deformasyonu ortaya çıkabilir.

Uç aralığının sıfır olarak alınmasından genelde kaçınılır. Çünkü böyle bir durum kaynak işleminde aletin daldırılması nedeniyle uç hasarına yol açabilir [31,34-38].



Şekil 3.12. (a) Uç çapının numune kalınlığı ile değişimi (b) Uç aralığının numune kalınlığı ile değişimi [31]

### 3.5. FSW ile Birleştirilmiş Parçalara Uygulanan Testler

FSW ile birleştirilmiş parçalara hasarlı ve hasarsız testler uygulanarak özellikleri belirlenmiş, mikro yapıları incelenmiştir. Uygulanan testler; hasarsız kontrol yöntemleri (ultrasonik kontrol, girdap akımları, X-ışınları), hasarlı testler (çekme, yorulma, sertlik ölçme) ve mikroyapı karakterizasyonudur (optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu geçirimli elektron mikroskobu).

#### 3.5.1. Hasarsız testler

Kritik boyut üzerindeki kaynak hatalarını ortaya çıkarmak için, hasarsız kontrol yöntemlerine ihtiyaç vardır. İnce tabakaların içindeki hataların yeri ile ilgili bilgi sağlayabilme gibi avantajları olan X-ışınları testi, ultrasonik hasarsız

kontrol yöntemi, sıvı penetrant kontrol yöntemi, manyetik parçacık kontrol yöntemi, girdap akımları kontrol yöntemi gibi metotlar ile var olan hataların görüntüleri yeterli çözünürlükte elde edilebilir [39-43].

Kaynak yapılmış parçalara uygulanan hasarsız kontrol yöntemlerinden ultrasonik kontrol yöntemi FSW yapılan numunelere uygulanmıştır. Diğer hasarsız kontrol yöntemleri ultrasonik kontrol yöntemini desteklemek amacıyla kullanılmıştır [39-43].

### **3.5.2. Hasarlı testler**

Hasarlı testler, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan testlerdir. Her bir test için standartlara uygun, ana malzemeyi aynen temsil eden numuneler hazırlanmaktadır. Uygulanan testler sonunda numuneler kullanılamaz hale gelmektedir [44-55]. Bu çalışmada FSW uygulanmış parçalara hasarlı testler olarak mekanik testlerden çekme deneyi, yorulma deneyi ve sertlik ölçme deneyi uygulanmıştır. Bu testler mekanik karakterizasyon için yeterli görülmüştür.

### **3.6. FSW Uygulamalarında En Sık Rastlanan Hatalar**

Her ne kadar FSW süreci kendine özgü karakteristik kusurlara sahip olsa da, alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kusurlarının oluşumu, diğer geleneksel metotlarla kıyaslandığında daha düşük kalır. Problemler, kaynak koşulları standart çalışma şartlarından saptığı zaman ortaya çıkabilir. Kaynak aletinin arkasındaki alan, aletin hücum kenarına doğru akan malzeme ile tamamen doldurulmazsa, boşluklar açılabilir. Eğer sürecin denetimi en uygun şekilde yapılmazsa, kaynaklanan yer kaynak dikişi ile termo-mekanik etkilenen bölgenin geri kalanı arasında süre giden boşluklar içerebilir. En önemli iki hata tipi kaynak doğrultusundaki düzensiz şekilli boşluklar ve kaynağın kök doğrultusundaki tamamlanmamış eklemelerdir [37-43].

Diğer sıkça rastlanan ve çok önemli iki hata ise şöyledir [37-43] :

- Kaynaklanan eklenme yerinin içinde, ince bir tabaka vardır. Bunun içerisinde üzerinde çalışılan malzemenin iki parçası arasında yakın bir temas söz konusudur. Bu tür bir hatanın ortaya çıkarılması hasarlı testler kullanılmadan kolay değildir.
- Boşluklar, kaynak hızının çok hızlı ya da çok yavaş olmasından kaynaklanan uzunlamasına hatalardır.

#### 4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

FSW kaynak yönteminin alüminyum alaşımlarında uygulanabilirliği üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda öncelikli olarak yöntemin temel prensiplerinden bahsedilmiş ve daha sonra FSW ile birleştirilen malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiş, çekme, yorulma, sertlik ölçme (özellikle Vickers sertlik ölçme testi) testleri uygulanmıştır. Bu testler sonunda numunelerin mikro yapıları, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM), geçirimli elektron mikroskobu (Transmission Electron Microscope, TEM) gibi optik cihazlar kullanılarak incelenmiştir. Bu sonuçlar yardımıyla servis esnasında FSW ile birleştirilen malzemelerin kullanım ömürleri, yorulma çatlak ilerleme hızı, kalıntı gerilmesi gibi değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmalar esnasında kaynak veriminin (kaynaklı malzemenin çekme gerilmesinin kaynaklanmamış ana malzemenin çekme gerilmesine oranı [56]) artırılması amacıyla uç ve omzun şekli, açısı, ilerleme ve dönüş hızları üzerinde de çalışmalar yapılmıştır [16-43,56-113]. Bu çalışmalara ek olarak akademik alanda yapılan ulusal [114-137] ve uluslararası [138-155] tezlerle de yöntemin uygulanabilirliği desteklenmiş, ticari alandaki uygulamalar için alt yapı oluşturulmuştur.

##### 4.1. FSW Uygulama Cihazları ile İlgili Çalışmalar

Sürtünme karıştırma kaynağı, 1991 yılında keşfedilen ve geliştirilmeye devam eden bir katı hal kaynak tekniğidir. Kaynak yapmanın zor olduğu birçok malzemeyi herhangi bir hata, çatlak veya deformasyon oluşturmadan kaynaklamayı sağlar. Alüminyum alaşımları, çinko ve kurşun levhaları, düşük karbonlu yumuşak çelikler, paslanmaz çelikler, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları, saf bakır ve pirinç levhaların FSW kaynağının kullanımını içeren çalışmalar mevcuttur [57-59]. FSW kaynak tekniğinde malzeme cinsi, levha kalınlığı, uç-omuz tasarımı önemli rol oynamaktadır.

Thomas ve ark. [16,17], 2003 yılında yapmış oldukları çalışmalarda farklı tip ve tasarımlarda uç-omuz takımları kullanarak 5083 alüminyum alaşımına sürtünme karıştırma kaynağı uygulamışlardır. Kullandıkları takımlar ile elde ettikleri kaynak yapılarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağını dönüş yönünü değiştirilerek uygulamalar yapmışlardır. Kaynak ucunu her iki tarafa da sırasıyla döndürerek kaynak verimini arttırmaya çalışmışlardır. Geleneksel sürtünme karıştırma kaynağıyla karşılaştırdıklarında uyguladıkları teknikle asimetrik oluşumların engellendiği, özellikle köşe kısımlarında yapılan kaynakların daha verimli olduğu ve farklı tipte malzemeleri birleştirmede kaynak veriminin arttığını saptamışlardır.

Dubourg ve Dacheux [31] 2006 yılında yaptıkları çalışmada, kaynak yapısı içinde oluşan bölgeler ve özellikleri vurgulanarak, uç-omuz tasarımı ve parametrelerinden bahsedilmiş, literatürde yer alan uç-omuz tipleri incelenmiştir. Çalışma sonunda uç-omuz tasarımının kaynak verimini doğrudan etkilediği vurgulanarak, kullanılan uç-omuz düzeneklerin standartlarının oluşturulmadıklarını belirtmişlerdir.

Christner ve ark. [22], sürtünme karıştırma kaynağının uçaklar üzerindeki uygulamaları ve havacılıkta ilk kullanılan Eclipse-500 uçak tipinin ve getirdiği avantajları vurgulamışlardır. Yaptıkları çekme ve yorulma testleri sonucu elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda sürtünme karıştırma kaynağının geleneksel perçinle birleştirme yöntemine nazaran daha güvenilir ve kaliteli olduğunu ortaya koymuşlardır.

Elangovan ve Balasubramanian [37], sürtünme karıştırma kaynağının yapılışını, kullanılan uç geometrilerinin ve omuz çaplarının kaynak kalitesini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Elde ettikleri kaynaklı malzemelere çekme testleri uygulamışlar, kaynaklı numunelerin çekme gerilme değerini ana malzemeyle karşılaştırarak kaynak verimliliğini hesaplamışlardır. Kullandıkları uçlar arasında kare uçlu aparatın en iyi kaynak performansını gösterdiğini, farklı omuz çapları arasında 18 mm'lik omuzun en uygun birleşmeyi sağladığı sonucunu ifade etmişlerdir.

Shepherd [24], derleme bir çalışma yaparak, Airbus uçak imalatçı firması tarafından sürtünme karıştırma kaynağının kullanım alanlarını, elde ettikleri

deneysel veriler doğrultusunda kanat yapılarında kullanım bölgelerini, kaynaklı yapılarının uçak ömür tahminlerini nasıl etkilediğini, perçinle birleştirme tekniğiyle kıyaslamalarını ortaya koymuştur.

Lohwasser [25], uçak yapısında kullanılan 6065-T6 ve 6005-T6 alüminyum ince levhaların sürtünme karıştırma kaynağıyla kaynaklandıktan sonraki mekanik özelliklerini ve bu yapılarda korozyonun etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda FSW'nin perçinle birleştirmeye nazaran daha yüksek verim sağladığını ve kaynaklı bölgelerin korozyona karşı da dirençli olduğunu vurgulamıştır. Çalışma sonunda kaynaklı yapıların uçaklarda özellikle kaplama malzemesi olarak kullanılan alanlarda da kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Talwar ve ark. [26], Boeing firmasının askeri kargo uçaklarının daha hızlı ve efektif doldurulup boşaltılabilmesi için tasarlayıp uygulamaya koydukları bir konteynırlı kargo sisteminin imal edilmesi ve bu imalat aşamasında maliyetlerin düşürülerek zamanın kısaltıldığı sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı süreci incelemiştir. Birleştirme yapılan malzemelerin ısıl işlem görmeden ve gördükten sonraki mekanik özelliklerini incelemiştir. Ayrıca kaynaklı malzemelerin korozyon dirençlerini ölçmüşlerdir. Çalışma sonunda oldukça verimli kaynak bağlantılarının yapıldığı ve kaynaklı bölgelerin korozyona karşı da dirençli oldukları belirtilmiştir.

Burford ve ark. [38], omuz tasarımının sürtünme karıştırma kaynağı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Farklı tarzlarda üretilmiş uçlarla elde ettikleri kaynaklı yapıların mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Özellikle yüzeyde oluşan kılcal çatlaklar ve kalıntıların azalmasıyla yorulma ömrünün arttığını gözlemlemiştir. Daha önce kullanılan omuz örnekleri düz yüzeye sahip iken Burford ve ark. spiral şeklinde oyuklu yüzeye sahip omuz takımları kullanmışlardır. Ayrıca daha önce kullanılan düz, içbükey, dışbükey omuz aparatları ile alüminyum malzemelerde yapılan kaynaklarda özellikle yüzey pürüzlülüğünün fazla olduğu, mukavemet değerlerinin daha az değerlerde olduğu belirtilmiştir. Çalışmalar sonucunda yüzey düzlüğünü en iyi sağlayan Wiper omuz tasarımını elde etmişlerdir.

## 4.2. FSW Tekniğinin Alüminyum Alaşımlara Uygulanması

Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin alüminyum alaşımlarında kullanılabilirliği üzerinde pek çok araştırma yapılmıştır. Kaynaklanabilen alüminyum alaşımları şunlardır:

- 2000 serisi alüminyum alaşımı (Al-Cu)
- 5000 serisi alüminyum alaşımı (Al-Mg)
- 6000 serisi alüminyum alaşımı (Al-Mg-Si)
- 7000 serisi alüminyum alaşımı (Al-Zn)

FSW kaynak yönteminin, 2000 serisi [22,30,41,60-68], 5000 serisi [42,69], 6000 serisi [42,56,65,66,70-84,98,99] ve 7000 serisi [85-90] alüminyum alaşımlarında uygulanabilirliği üzerinde yapılan çalışmalarda kaynağın diğer kaynak tekniklerinden daha verimli birleştirmeler yaptığı tespit edilmiştir [41]. Kaynaklama işleminde, üzerinde çalışılan malzemenin işleme sıcaklığında çalışacak aletleri ve tasarımları oluşturmak en önemli konudur. Alüminyum alaşımlarda FSW ile birleştirmelerde cihazının tek yüzden geçişinde 1,2 mm'den 50 mm'ye kadar kalınlıklar, her iki yüzden geçişinde (karşılıklı gelecek şekilde) 50 mm'den 100 mm'ye kadar kalınlıklar kaynaklanabilmektedir. Değişik geometrideki yapılar için, özel geliştirilmiş ve tasarlanmış aletler seçilmelidir. FSW işlemi yatay, düşey, yukarı konumda, dairesel olmak üzere her yönde kullanılabilir çünkü malzemenin katı durumda oluşu kaynak işlemi üzerinde hiçbir etkisi olmayan yerçekimi kuvvetinden bağımsız çalışmaktadır [7,10-12].

Liu ve ark. [30] tarafından yapılan çalışmada 2017-T351 alüminyum alaşımına sürtünme karıştırma kaynağı yapılabilirliği ve en uygun kaynak parametresinin belirlenebilmesi için, kaynak parametreleri ile kaynaklı malzemenin çekme özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, çekme özellikleri ve kırılma oluşumlarının kaynak parametrelerinden doğrudan etkilendiği göstermiştir. Ana malzemeye nazaran kaynaklı malzemenin çekme gerilmesinin azaldığı saptanmıştır.

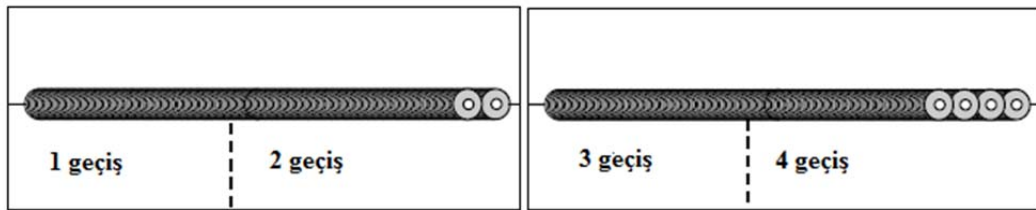
Zhou ve ark. [41], 2006 yılında yaptıkları çalışmada FSW yapılmış 2024-T3 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışları incelemişlerdir ve buldukları sonuçları literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak uygun olmayan kaynak parametreleri kullanılarak kaynak bölgesinde kaynak hatalarının, özellikle birleştirme yüzeyinin altında oluşan kök hasarlarının oluşmasına izin verilmiştir. Bu hasarlı yapıların hasarsız yapılarla aralarındaki mukavemet ve yorulma ömrü değerleri kıyaslanmıştır. Çalışma sonunda kaynak esnasında oluşan kök hasarlarının yorulma ömrünü azalttığı bulunmuştur. Ayrıca kaynak yapılmış parçalarda kaynağın uygun değerler içinde olup olmadığını karşılaştıracak uluslararası standartların oluşmadığını vurgulamışlardır. Bu çalışmaya benzer bir araştırma da 2008 yılında Fersini ve Pirondi [60] tarafından gerçekleştirilmiştir. FSW kaynak yapısında kusurların bulunabileceğini, özellikle kök hasarlarının oluştuğunu ve bu hasarların kaynak verimini ne kadar etkilediğini ortaya koymuşlardır. Fersini ve Pirondi tarafından yapılan çalışmada, 2024-T3 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesinin yanı sıra, farklı olarak sonlu elemanlar analizi uygulanmış ve kullanım ömrü hesaplamaları yapılmıştır. Öncelikle sonlu elemanlar metodu kullanarak elde ettikleri yorulma ömür tahminleri deneysel verilerden oldukça düşük çıkmıştır. Daha sonra sayısal değerlerde ihmal ettikleri Tip II değerleri göz önüne alınca deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca aşırı yük uygulamasının yorulma ömrünü arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ali ve arkadaşları [61] 2007 ve 2008 yıllarında FSW ile birleştirilmiş 2024-T3 ve 2024-T351 alüminyum alaşımının yorulma davranışını incelemişlerdir. Kaynak esnasında kaynak yapılan yüzeyin alt kısmında hasar oluştuğunu savunan çalışmaların [30, 22] aksine, kaynak işlemi esnasında oluşan soğan halkası izlerinin malzemenin yorulma davranışını kötü yönde etkilediğini, hasarların yüzeyden başladığını ortaya koymuşlardır. 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada yüzeyde oluşan soğan halkalarının çatlak oluşumu ve ilerlemesi üzerindeki etkisini azaltmak için shot peening yüzey işlemi uygulamışlardır. Çalışma sonunda kaynaklı yapıların yüzey işleme sonucunda yorulma ömürlerinin arttığı tespit edilmiştir. 2008 yılında yapılan çalışmada, bir önceki çalışmadan farklı olarak 2024-T351 alaşımlarındaki kalıntı gerilmesi ve

yorulma dayanımları incelenmiştir. FSW’de doğal yorulma çatlak başlangıcı için kritik bölgeler tespit edilmiş, oluşan kılcal çatlakların yorulma ömrünü kısalttığını Hobson Brown çatlak ilerleme matematiksel modellemesi ile ortaya koymuşlardır. Nielsen [62] 2008 yılında FSW ile kaynaklanmış 2024 alüminyum alaşımının üzerinde kaynak esnasında oluşan farklı bölgeleri, hasar oluşumunu, son kırılma bölgelerini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kaynaklı yapılarda yorulma ömründe azalma olduğunu, azalmanın sebebi olarak da kaynak esnasında oluşan ikinci faz partiküllerinin oluşmasıyla meydana gelen boşlukların çatlak başlangıcı için zayıf bölgeler oluşturmalarını göstermişlerdir. Scialpi ve arkadaşları [63] 2008 yılında 0,8 mm kalınlığındaki 2024-T3 alüminyum alaşımına sürtünme karıştırma kaynağını yapmışlardır. Kaynak yaptıkları levha kalınlığı 1 mm’den küçük olduğu için ilk defa Nishihara [64] tarafından mikro FSW olarak adlandırılan tekniği kullanmışlardır. Yorulma testleri, mikrosertlik ve kalıntı gerilmesi testleri uygulamışlardır. Yapmış oldukları mikro sürtünme karıştırma kaynağının mekanik özelliklerini diğer çalışmalarla [65,66] karşılaştırmışlardır. Çekme testleri sonunda kırılmanın kaynak bölgesinde olduğunu tespit etmişler, yorulma testleri sonucunda da özellikle geleneksel birleştirme teknikleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek yorulma limit değerleri elde etmişlerdir.

Hatamleh [67], FSW yapılmış 2195 alüminyum alaşımlarına yüzeydeki kalıntı gerilimini azaltmak için lazer ve shot peening yüzey işleme uygulayarak çatlak ilerlemesinin nasıl olduğunu araştırmışlardır. Çatlak ilerlemesinde kalıntı gerilmesinin büyük bir rolünün olduğunu, sürtünme karıştırma kaynağında diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha az kalıntı gerilmesi oluşmasına rağmen çatlak ilerlemesinde bu değerlerin oldukça etkili olduklarını ortaya koymuştur. Lazerle yüzey işleme prosesi, yüzeyi şeffaf bir maddeyle kaplı genellikle bu su tabakasıdır, metalin üzerine yüksek enerjili lazer akımının iletilmesiyle gerçekleştirilir. Lazer ve yüzey tabakası arasındaki etkileşim, metalin içine doğru ilerleyen bir basınç şok dalgası oluşturur. Şok dalgasının maksimum basıncı malzemenin dinamik akma gerilmesinden büyük olduğu anda malzemede plastik deformasyona yol açar. Lazer ve shot peening yüzey işleme yöntemiyle çatlak ilerleme oranında azalma olduğu saptanmıştır.

Pouget ve Reynolds [68] 2008 yılında FSW ile kaynaklanmış 2050 alüminyum alaşımının kalıntı gerilmesi ve mikroyapının yorulma çatlak ilerlemesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yorulma ömür tahmini yaparken kalıntı gerilmesi etkisi yanında bölgelere bağlı olarak değişen mekanik özelliklerin de göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamışlardır. Yeniden kristallenmiş kaynak dikişi bölgesinde ana malzemeye nazaran yorulma çatlak ilerleme hızının daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Leal ve Loureiro [69] tarafından 2008 yılında gerçekleştirilen çalışmada FSW yapılan, tavllanmış ve yeniden kristalleşmiş 5083 alüminyum alaşımının mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma ile sürtünme karıştırma kaynağının kalite ve dayanımının sadece kaynak parametrelerine bağlı olmadığı, tekniğin uygulandığı malzemeye ve malzemeye uygulanma işlemlerine bağlı olduğu saptanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak kaynak dikişinin üzerinden birden fazla geçerek kaynak işlemi uygulamışlardır. Şekil 4.1’de kaynak bölgesinden birden fazla geçiş yapılması gösterilmiştir. Kaynak bölgesinden birkaç kez geçiş yapmanın sertlik ve mukavemet değerlerini arttırdığını, parlatma işlemlerinin kaynak verimliliğini arttırdığını ortaya koymuşlardır. Dickerson ve Przydatek [42] FSW kaynak tekniği ile birleştirilmiş AA5083-O ve AA5083-H-321 alüminyum alaşımlarını inceleyerek tavllanmış ve gerilme sertleştirmesi uygulanmış durumdaki alaşımların yorulma davranışı farklılıklarını ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında kaynak esnasında oluşan kök hasarlarının belirlenmesi ve kaynak parametrelerinin bu sonuçlar doğrultusunda iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Kaynak parametreleri değiştirilerek kusurlu ve kusursuz kaynaklı levhalar elde edilmiştir. Özellikle kaynak yapılan malzemenin alt yüzeyinde oluşan kök hasarlarının malzemenin mukavemetini azalttığı, yorulma ömrünü kısalttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Kaynak bölgesinden birden fazla geçişin gösterilmesi [69]

Ericsson ve Sandröm [70] FSW ile kaynaklanmış 6082 alüminyum alaşımının T4, T6 ve T4'ün T6 yapılması durumlarındaki çekme ve yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Kaynaktan sonra alaşım 530-550°C'de çözeltiye alma işlemine alınmış, ardından oda sıcaklığında su verme işlemi uygulanmıştır. Alaşım bu durumda doğal yaşlandırmaya bırakılarak T4, 170-200°C sıcaklıkta bekletilerek de suni yaşlandırma sonucu T6 durumu elde edilmiştir. T4 durumundaki alaşıma tekrar ısıtma işlemi uygulanarak ve 185°C sıcaklıkta 5 saat bekletilerek suni yaşlandırma yapılmıştır. T4 durumundaki tekrar ısıtma işlemi yapılmış numunenin yorulma dayanımının T6 durumundan daha düşük olduğu bulunmuştur. 6082-T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağının [63,42,73] kaynak veriminin diğer kaynak teknikleriyle [98,99] birleştirilen malzemelere nazaran daha yüksek olduğu saptanmıştır. Borrego ve arkadaşları, FSW ile kaynaklanmış 6082-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışlarını çentikli numuneler kullanarak sabit genlikli ve aşırı yük altında incelemişler, aşırı yük altında çatlak ilerlemesinde gecikme olduğunu açıklamışlardır [71, 72].

Elangovan ve Balasubramanian [56] tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada FSW yapılmış 6061 alüminyum alaşımına kaynaktan sonra uygulanan farklı ısıtma yöntemlerinin, çekme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma ayrı ayrı uygulanarak ve çözeltiye alma ve yaşlandırma birlikte uygulanarak kaynaklı malzemelere uygulanmıştır. Çözeltiye alma ısıtma işlemi 530°C'de bir saat, suni yaşlandırmayı ise 160°C'de 18 saat uygulamışlardır. Suni yaşlandırma süresinin artışı çökelti yoğunluğunu ve çekme değerlerini arttırmıştır. Çekme testleri ve Vickers mikrosertlik testleri uygulandıktan sonra kaynaklı malzemelerin mikroyapısı incelenmiştir. Suni yaşlandırma uygulanan numunelerde çekme mukavemetinin ve kaynak veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Moreira ve arkadaşları [73] 6061-T6 alüminyum alaşımını 2007 yılında metal soy gaz kaynağı (MIG) ve sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirerek numunelerin yorulma davranışlarını ve kırılma yüzeylerini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin yorulma ömürlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapısal inceleme sonucunda yorulma adımları ölçümleri yapılarak yorulma çatlak ilerleme oranları hesaplanmıştır. Moreira ve arkadaşları [66] 2008 yılında FSW ile kaynaklanmış

6061-T6 alüminyum alaşımları üzerinde yaptıkları çalışmada kaynaklı malzemenin farklı bölgelerinde oluşan yorulma hasarları için yorulma çatlak ilerleme eğrilerini çizerek malzemelerin ana malzemeye nazaran daha düşük dayanıma ve sünekliğe sahip olduklarını saptamışlardır.

Moreira ve arkadaşları [74] 2008 yılında FSW ile birleştirilmiş 6063-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışını çentikli numuneler kullanarak incelemiş ve sonlu elemanlar metodu kullanarak analizler yapmışlardır. Gerilme ömür grafiklerini kullanarak yaklaşımlarda bulunulmuştur. Kaynak bölgesinde ana malzemeye nazaran düşük mukavemet değerleri bulunmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılan numunelerin yorulma davranışlarının ana malzemeye nazaran kötüleştiğini belirtmektedirler.

Lin ve ark. [75] içbükey omuz kullanarak 6111-T4 alüminyum alaşımını FSW ile kaynaklamışlar ve malzemenin yorulma davranışlarından yorulma ömür tahminleri yapmışlardır. Ömür tahminleri yaparken yorulma çatlak ilerleme modeli Newman ve Dowling [76] tarafından yapılan çalışmadan, gerilme şiddet faktörü çözümleri Wang ve ark. [77] ve Wang ve Pan [78] tarafından yapılan çalışmalardan örnek alınmıştır. Ayrıca yorulma çatlak ilerleme modeli için Paris eşitliği kullanılmıştır. Değişken genlikli yükler altında yorulma testleri uygulanmıştır. Elde ettikleri deneysel sonuçlar ile modellemelerden üretilen sonuçlar benzerlik göstermiştir.

Rodriguez ve ark. [79], 1mm kalınlığındaki A6016-T4 alüminyum alaşımı levhalarını farklı iki omuz kullanarak FSW ile birleştirmişlerdir. İki farklı omuz tipinin kaynak işlemi sonucunda alaşımın mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda farklı omuz tiplerinin kaynak bölgesindeki mikroyapıyı değiştirdiğini saptamışlardır. Kullandıkları konik omuz ile yaptıkları kaynaklı bölgede, sarmal omuz ile kaynaklanan bölgeye nazaran daha iri tane boyutu ve çökeltelerde daha az miktarda kabalaşma gözlenmiştir. Bu sonuçlarla ilişkili olarak sarmal omuz kullanarak yaptıkları kaynaklarda mukavemet değerlerinin düştüğü ifade edilmektedir.

Tesch ve arkadaşları [80] 6013-T6 alüminyum alaşımında küçük köşe çatlaklarının yorulma çatlak ilerleme davranışı üzerindeki etkilerini

incelemişlerdir. Çentikli numuneler kullanmışlar ve çentikler özel bir teknikle, odaklı iyon ışını kullanılarak açılmıştır. Küçük çentikli numunelerin büyük çentikli numunelere nazaran daha düşük yorulma ömrü gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Derry ve Robson [81] FSW ile birleştirilmiş 6013-T6 alüminyum alaşımında, FSW'nin tokluk özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sertlik testleri uygulamışlar ve sertlik eğrileri oluşturmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu kullanarak ana ve kaynaklı malzemelerin mikroyapısal incelemelerini yapmışlardır. Mikroyapısal incelemeler sonunda yapıda sünek kırılmanın meydana geldiğini tespit etmişler, bunun sebebini de yapı içinde oluşan boşlukların birleşerek çatlakları oluşturmaları olarak açıklamışlardır. Braun ve arkadaşları [65] FSW ile kaynaklanmış 6013-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışını incelemişlerdir. Ana malzeme, kaynaklı malzeme ve kaynaklı malzemeye yüzey işlemi uygulandıktan sonraki numuneler üzerinde yorulma deneyleri yapmışlardır. Yorulma performansının kaynaklı numunelerde ana malzemeye nazaran düştüğü gözlenmiş, parlatma yüzey işlemi uygulanan numunelerde ise ana malzemeye yaklaştığı görülmüştür. Braun ve ark. tarafından yapılan çalışmaya benzer bir çalışma da Done ve arkadaşları [91] tarafında yapılmıştır. FSW ile kaynaklanmış 6013-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışını incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde kalan kalıntı gerilmesi etkilerini yorulma testleri sonucunda ortaya koymuşlardır. Heinz ve Skrotzki [82] tarafından yapılan çalışmada T4 ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış 6013 alüminyum alaşımlarından levhalara FSW kaynağı yaptıktan sonra mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. T4 durumundaki malzemeye kaynak işleminden sonra tekrar ısıtma işlemi uygulanmıştır. Mikro sertlik ve çekme testleri, kaynağın en zayıf bölgesinin ısıdan etkilenen bölge olduğunu göstermektedir. Kaynaklı levhalar ana malzemeye nazaran düşük dayanım ve süneklik göstermektedir. Troeger ve Starke [83], yaptıkları çalışmada FSW yapılmış 6013 alüminyum alaşımının tane büyüklüklerinin ölçülmesi ve superplastisite (şekil alınabilirlik) özelliğinin incelenmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, gerilmenin tane boyutu ve porozite (gözeneklilik) üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Uzun ve ark. [84], farklı iki malzeme olan 6013-T6 alüminyum alaşımı ve X5CrNi18-10 paslanmaz çelik levhaları birbirlerine sürtünme

karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak esnasında oluşan bölgelerin mikro yapıları optik mikroskop ile incelenmiştir. Sonuçlar bu iki farklı malzemenin FSW ile birleştirilebileceğini göstermiştir. Sertlik dağılımı ile kaynak bölgeleri aralarında iyi bir bağlantı olduğu belirlenmiştir. FSW ile birleştirilen alüminyum alaşımı ve paslanmaz çeliğin bileşiminin yorulma ömrünün, 6013-T6 alüminyum alaşımına göre % 30 azaldığı gözlenmiştir.

Heinz ve ark. [85], uçak ve uzay sanayinde yeni kullanım alanı bulan 7050 alüminyum alaşımının özellikleri ve sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanma kabiliyetini incelemişlerdir. John ve arkadaşları [86] FSW ile birleştirilmiş 7050-T7451 alüminyum alaşımının yorulma ve yorulma çatlak ilerleme özelliklerini incelemişler, kalıntı gerilmesi ve kalıntı oranı tahmini üzerinde çalışmışlardır. Çatlak ilerleme sonuçları kalıntı gerilmesinin ilerlemede etkin rol oynadığını göstermiştir. Numune geometrisin kalıntı gerilme değerlerini değiştirdiğini saptamışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağında düşük kalıntı gerilmesi oluşmasına rağmen, yorulma çatlak ilerlemesinde kalıntı gerilmesinin etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Hassan ve ark. [87] FSW yapılmış 7010 alüminyum alaşımının ısı işlemin ilk safhası olan çözeltiye alma işleminin davranışları üzerinde çalışmışlardır. Çözeltiye alma işlemi sırasında kaynak dikişindeki tanelerin doğası gereği kararsız olduğunu saptamışlardır.

Lomolino ve ark. [88], FSW yapılmış 7475 serisi alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Yorulma çatlaklarının kaynak bölgesinde oluşmaya başladığını, özellikle de kaynak bölgesinde oluşan kaynak izlerinin ve çukurların çentik etkisi yarattıklarını tespit etmişlerdir. Ayrıca doğal yaşlandırılmış alüminyum alaşımların yapay yaşlandırılmış alaşımlara nazaran daha iyi yorulma dayanımı gösterdiklerini saptamışlardır.

Pirondi ve arkadaşları [89,90] 2008 ve 2009 yıllarında metal matrisli kompozitlerin sürtünme karıştırma kaynağıyla kaynaklanabilirliklerini ve elde ettikleri kaynaklı malzemelerin yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Yorulma deneylerinde çentikli numuneler kullanmışlardır. Kaynaklı malzemelerde çatlak ilerleme oranının ana malzemeye nazaran fazla olmasının sebebi olarak kaynak

bölgesinde sürtünmeden dolayı oluşan yeniden kristalleşmenin oluşması ve partiküllerin parçalanması belirtilmiştir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda, sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanmış 6013-T6 alüminyum alaşımın sabit genlikli yük altındaki yorulma davranışları ve yorulma sonucu oluşan kırık yüzeylerin gösterdiği farklılıklar incelenmiştir. Isıl işlemin etkilerini görebilmek amacıyla bir grup kaynaklı numuneye ısıl işlem uygulanmıştır. Testler ve incelemeler sırasıyla ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısıl işlem görmüş malzemelere uygulanmıştır. Öncelikle kaynaklı malzemelerin, süreksizlik ve hata kontrolleri hasarsız kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ana, kaynaklı ve tekrar ısıl işlem görmüş malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre sabit genlikli yorulma testleri yapılmıştır. Numunelerin kırılma yüzeyleri optik ve taramalı elektron mikroskopları kullanılarak incelenmiş ve analizler yapılmıştır.

### 5.1. Kullanılan Malzeme (6013 Serisi Alüminyum Alaşımları)

6xxx serisi alüminyum alaşımlar ana katkı maddesi olarak Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) içerirler. Bu iki elementin yanı sıra Bakır (Cu), Manganez (Mn) ve diğer elementlerden de az miktarda içerebilmektedir. 6xxx serisi alüminyum alaşımların birçoğuna Manganez (Mn) ve Krom (Cr) eklenmesi ile elastik sınırlarda ve tane boyutunun kontrolünde artış sağlanabilir [54-57].

AA6013 alüminyum alaşımı (Al-Mg-Si alaşımı) yüksek mukavemet-ağırlık oranına ve iyi korozyon direncine sahip düşük ağırlıklı yapıların üretilmesinde geniş bir kabul görmektedir.

Kaynak yapılan 6013 alüminyum alaşımı, T6 ısıl işlemi görmüş olarak plaka halinde temin edilmiştir. Çizelge 5.1’de kimyasal bileşimi verilen 3,6 mm kalınlığındaki AA6013- T6 levhasına German Aerospace Center (DLR) tarafından FSW yapılmıştır. Kaynak işlemi üç boyutlu CNC frezede özel bir uç ve omuz kullanılarak yapılmıştır. Kaynak 1000 mm/dak, 1200 Rpm’de gerçekleştirilmiştir. Uç ve omuzun çapları sırası ile 6 mm ve 18 mm’dir.

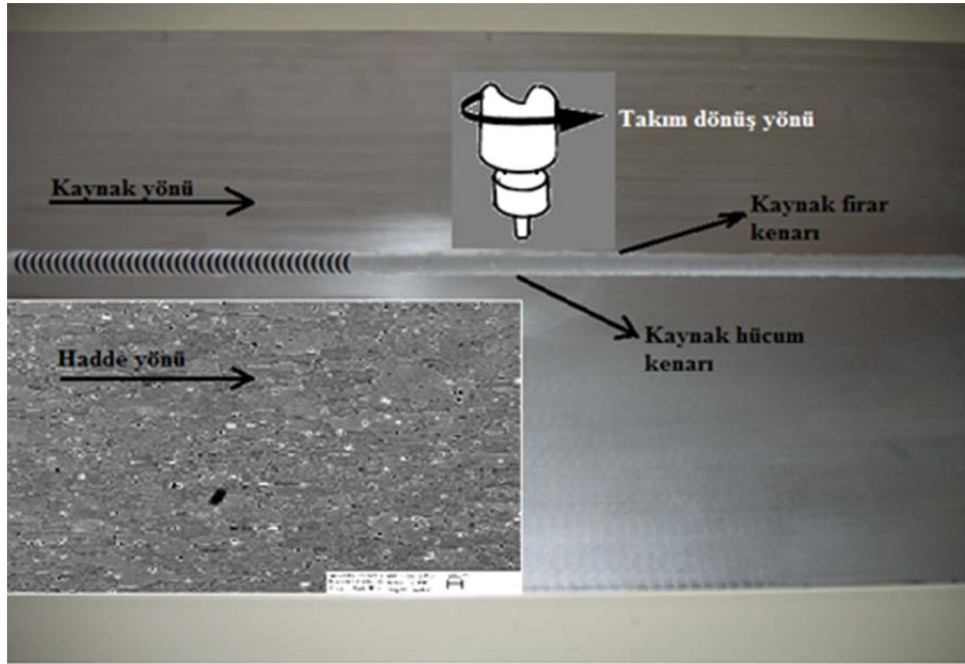
Çizelge 5.1. 6013 ana malzemesinin kimyasal bileşimi [57]

Element	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
Ağr. (%)	0,90	0,72	0,95	0,36	0,27	0,03	0,07	0,02	denge

Kaynak yapılmış olan levha Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Kaynak hadde yönüne paralel olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 5.2’de kaynak yönü, kaynak hücum ve firar kenarları gösterilmiştir.



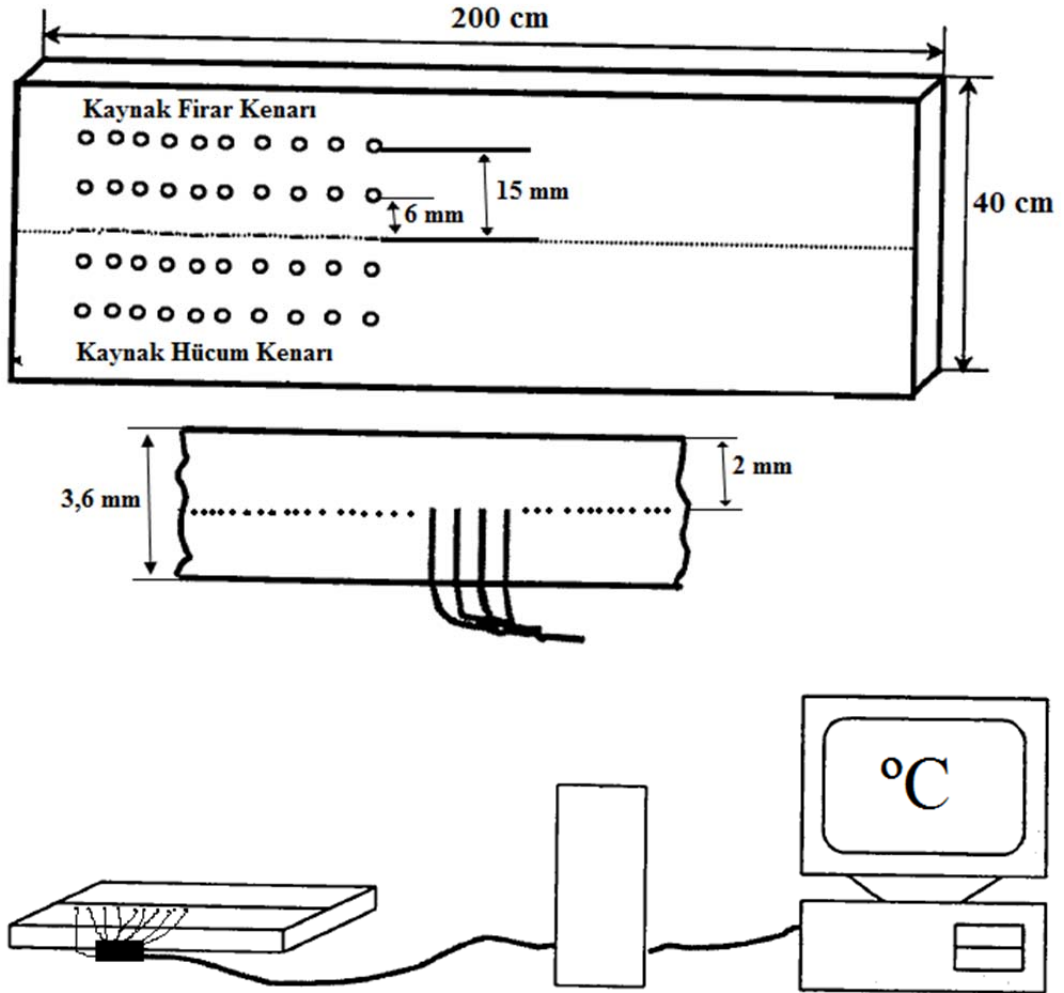
Şekil 5.1. Kaynaklı levha



Şekil 5.2. Kaynak yönü

## 5.2. Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Değerleri Ölçümü

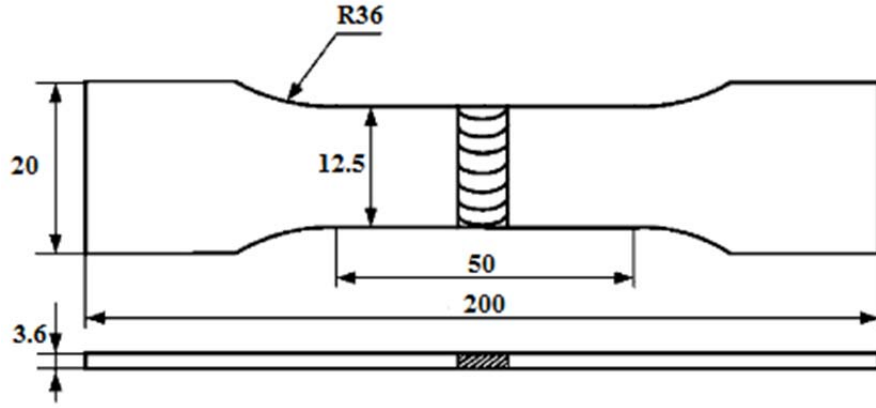
German Aerospace Center (DLR) tarafından yapılan sürtünme karıştırma kaynak işlemi esnasında kaynak bölgesinde sıcaklık değişimlerini gözlemlemek amacıyla termokapıllar (thermocouple-ısı müşirleri) kullanılarak ısı değerleri ölçülmüştür. Termokapıllar malzeme yüzeyinden 2 mm derinliğe, kaynak hücum ve firar kenarında olacak şekilde kaynak merkezinden 6 mm ve 15 mm uzaklıklara yerleştirilmiştir. Kaynak merkezindeki sıcaklık değerlerini elde edebilmek için bir termokapıl da omuz üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Sıcaklık ölçümü için termokapılların yerleştirilmesinin gösterimi [138]

### 5.3. Numune Hazırlanması

FSW'den sonra elde edilen kaynaklı levha, lazer kesim tekniğiyle kesildikten sonra, istenilen numune ölçüleri için freze tezgâhında işlenmiştir. Çekme ve yorulma testlerinde kullanılmak için hazırlanan numuneler ASTM E 8M ve ASTM E 466 standartlarına göre hazırlanmıştır. Şekil 5.4.a numune boyutları ve Şekil 5.4.b'de numunelerinin lazerle kesildikten sonra frezede işlenerek hazırlanmaları verilmiştir.



Şekil 5.4.a. Çekme ve yorulma numunesi (boyutlar mm olarak verilmiştir)

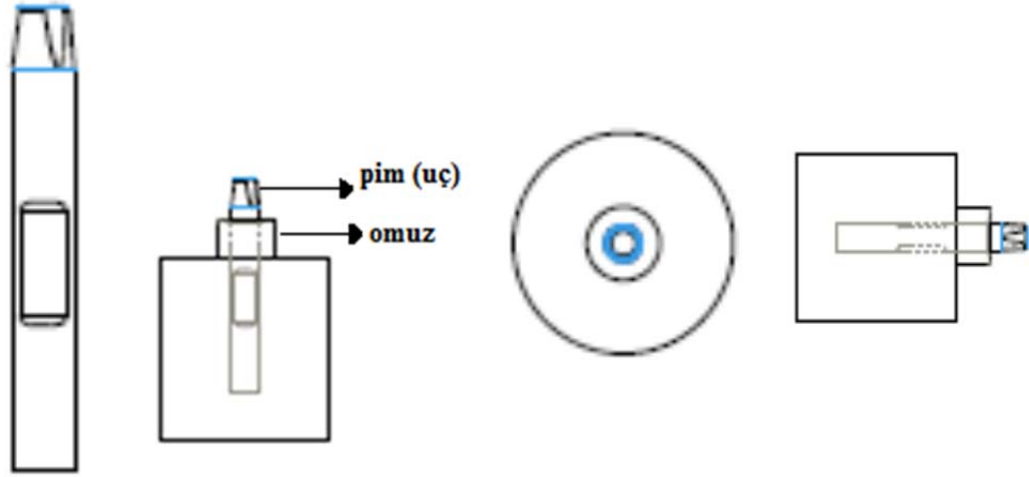


Şekil 5.4.b. Çekme ve yorulma numunelerinin lazerle kesilmesi ve frezede işlenerek hazırlanması

#### 5.4. Kullanılan Cihazlar ve Aletler

Bu bölümde yapılan testler ve incelemeler doğrultusunda kullanılan cihaz ve aletler işlem sırasına uygun olacak şekilde verilmiştir.

Tekniğin en önemli parametreleri olan uç (pim) ve omuz geometrileri çalışmaya uygun olacak şekilde Pro-engineer çizim programı öğrenilerek çizilmiştir. Yapılan çizim kullanılarak prototip uç ve omuz üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’de çizimler gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Prototip üretimi yapılan uç ve omuz takımı

Kaynaklı levha üzerinde herhangi bir hasar olup olmadığı hasarsız kontrol yöntemleri ile test edilmiştir. Kullanılan teknikler gözle kontrol, sıvı penetrant kontrol, ultrasonik kontrol, girdap akımları ile kontrol ve iletkenlik testleridir. Sıvı penetrant kontrol yöntemi için Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Hasarsız Kontrol Laboratuvarı kapsamında bulunan sıvı penetrant hattında kontroller yapılmıştır. Ultrasonik kontrol yöntemi için aynı laboratuvarında bulunan Sofranel 104 test cihazından faydalanılmıştır. Girdap akımları ve iletkenlik ölçümü içinse Olympus Nortec 500 D cihazı kullanılmıştır.

Isıl işlem uygulamaları Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü envanterinde bulunan Naberthern 1340 ve Reta 1350 fırınlarında gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem kaynak yapılmış malzemedan ASTM E 8M ve ASTM E 466 standartlarına göre çıkartılan numunelere uygulanmıştır.

Microsertlik değerleri Vickers ucu kullanılarak, Buehler Digital Microhardness Tester MMT-3 cihazında ölçülmüştür.

Çekme ve yorulma deneyleri 200 kN statik, 100 kN dinamik yük kapasiteli bilgisayar kontrollü, Instron (8500 model) test cihazında (Şekil 5.6) yapılmıştır. Numune, cihaz çenelerine yük dağılımı düzgün olacak şekilde hidrolik basınçla sıkıştırılan kavrama teçhizatı ile bağlanmıştır. Çekme deneylerinin yapımında Series IX paket programı kullanılmıştır. Bu programa çekme hızı, numune boyutları, tutucu çeneler arasındaki mesafe, ortam sıcaklığı ve nem oranı verileri girilerek, deney sonunda akma dayanımı, çekme dayanımı gibi değerler program tarafından hesaplanmaktadır. Yorulma deneylerinin bilgisayar kontrolünde MAX paket programı kullanılmıştır. Bu programda deneyler, ortalama yük değeri, genlik, frekans ve çevrim sayısı bilgileri girilerek yapılmaktadır.

Standart çekme ve yorulma numuneleri ASTM E 8M ve ASTM E 466 standartlarına göre hazırlanmıştır. Numuneler freze ile işlenerek çıkartılmıştır.

Nicon Optiphot-100 optik mikroskop ve üzerinde Oxford Instrument EDX (Energy Dispersive X-ray, enerji saçılımlı X-ışınları) - 7430T ilavesi bulunan Zeiss Supra 50 VP FEG taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kapsamlı bir mikro yapısal inceleme yapılmıştır.

Numunelerin bir kısmı hiçbir işlem yapılmadan kırılma yüzeylerinden incelenmiş, diğer numuneler mekanik olarak parlatılmıştır. Kesme işlemi hassas kesme cihazı Strevers Secoton 10 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kalıplama Buehler marka epoxy reçine kullanılarak yapılmıştır. Parlatma önce zımpara daha sonra elmas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi Buehler Phoenix 4000 otomatik zımparalama parlatma cihazı kullanılarak yapılmıştır. Dağlama işlemi ise Keller dağlayıcısı kullanılarak yapılmıştır.



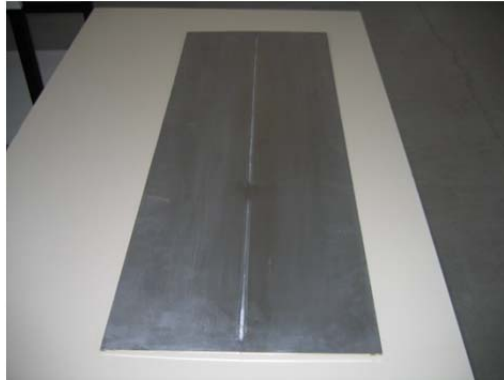
Şekil 5.6. Deneyde kullanılan Instron 8500 cihazı ve yardımcı teçhizatlar

## 5.5. Yapılan Deneyler

Çalışma boyunca yapılan test ve incelemeler uygulama sırası, izlenen yöntem ve adımlar doğrultusunda verilmiştir. Uygulanan testler adım adım açıklamalı olarak anlatılmıştır.

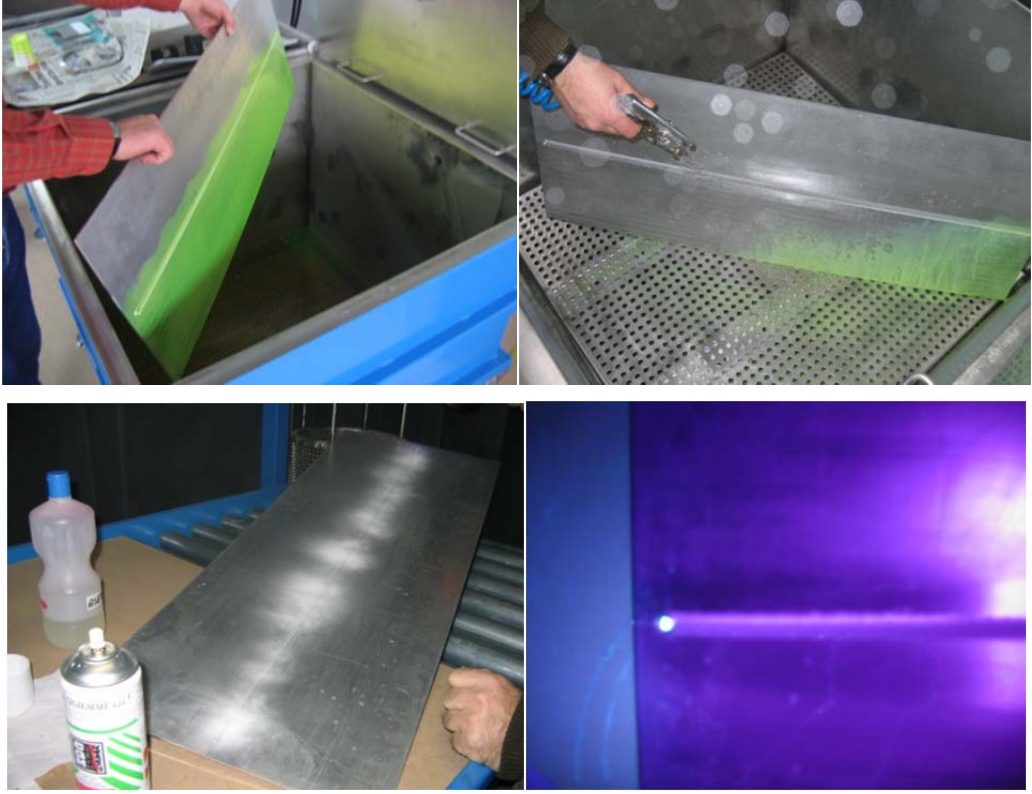
### 5.5.1. Hasarsız kontrol yöntemleri

Kaynak yapılmış alüminyum 6013-T6 levhasında kaynak bölgesi ve ana malzemede herhangi bir hasar olup olmadığı hasarsız kontrol yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Sırasıyla levhaya gözle kontrol (Şekil 5.7), sıvı penetrant kontrol yöntemi, ultrasonik kontrol yöntemi, girdap akımları kontrol yöntemi ve iletkenlik testleri uygulanmıştır.



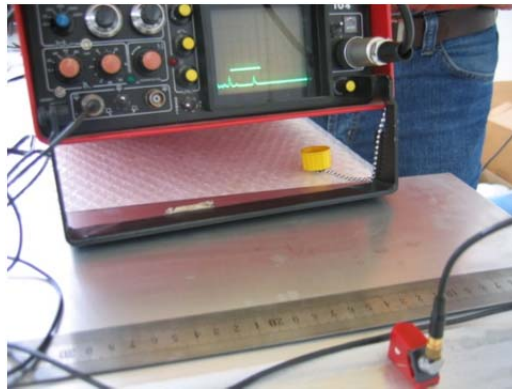
Şekil 5.7. Kaynaklı levhanın gözle kontrolü

Sıvı penetrant yöntemi öncelikli olarak yüzey temizleme işlemiyle başlamıştır. Kaynaklı levha penetrant tankına daldırılıp çıkartıldıktan sonra 20 dakika bekletilerek penetrant sıvının malzemeye nüfuz etmesi sağlanmıştır. Daha sonra levha üzerindeki fazla penetrant temizlenmiş ve levha kuruma için 50°C de 15 dakika bekletilmiştir. Levha karanlık odaya alınıp developer uygulanmıştır. Tüm işlemlerin ardından levha mor ışık altında incelenmiştir (Şekil 5.8).



**Şekil 5.8.** Kaynaklı levhaya sıvı penetrant kontrol yönteminin uygulanması

Ultrasonik kontrol yöntemi yüzey temizliği işlemiyle başlamıştır. 45° açılı prob seçilmiş ve gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Prob ile levha yüzeyi arasına sızdırmazlık sağlaması için sıvı sürülmüştür (Şekil 5.9).



**Şekil 5.9.** Kaynaklı levhaya ultrasonik kontrol yönteminin uygulanması

Girdap akımları kontrol yöntemi için yüzey önce temizlenmiş ardından da şeffaf folyo ile kaplanmıştır. Uygun prob seçilmiş, gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Prob el kontrolünde uygun hızda levha üzerinde gezdirilmiştir (Şekil 5.10). Şekil 5.11’de iletkenlik testi uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Kaynaklı levhaya girdap akımları kontrol yönteminin uygulanması



Şekil 5.11. Kaynaklı levhaya iletkenlik testi uygulanması

### 5.5.2. Isıl işlem

Bir grup numuneye kaynak işleminden sonra malzemenin mekanik özelliklerindeki değişiklikleri görmek amacıyla T6 ısıl işlemi uygulanmıştır.

İncelenen çalışmalar doğrultusunda, alüminyum alaşımların bir kere yüksek sıcaklıkta (örneğin T6 işlemi) yaşlandırılıp sonrasında epey düşük bir sıcaklığa maruz bırakılmaları durumunda, mikro yapılarının ve mekanik özelliklerinin sonsuz bir süre boyunca kararlı kaldığı tespit edilmiştir [57-59].

Isıl işlenebilir alüminyum alaşımlarının birçoğu, genellikle T6 yaşlandırma işlemi ve soğutmaya maruz bırakılırlar. Tipik T6 yaşlandırma sıcaklığındaki doğal yaşlandırmanın, alaşımın uzun bir süre oda sıcaklığında tutulması ile ve yapay yaşlandırılmanın ise oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda daha kısa süreli bekletilmesi sonucu uygulandığı belirtilmiştir [57-59].

AA6013 alaşımı homojen preslenmiş levha şeklinde temin edilmiştir. Bütün numuneler ısıl işlem fırınında 6 saat süresince 550°C de çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuştur; sonrasında oda sıcaklığındaki suya daldırılarak soğutulmuştur. Daldırma işlemi değişik açı ve hızlarda yapılmış, bazı numunelerin eğildiği gözlenmiştir. En uygun daldırmanın numuneyi dik tutarak hızlı bir şekilde uygulanması olduğu tespit edilmiştir. İlk durumda, çözelti işlemine uğramış ve soğutulmuş alaşım 175°C sıcaklıkta yapay yaşlandırma ile geleneksel T6 ısıl işlemine maruz bırakılmıştır (Şekil 5.12.a-b). Alaşım 10 saat zaman aralığında 175°C de yapay yaşlandırma, arkasından soğutma ve sonrasında oda sıcaklığında da ikincil yaşlandırmayı içeren sürece bırakılmıştır. Alaşım daha sonra, daha fazla sertlik oluşumunu hızlandırmak için 2 haftalık bir süre boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur.



Şekil 5.12.a Isıl işlem Fırını (Çözelti ısıl işlemi için 550°C'ye ısıtılmış durumda)



Şekil 5.12.b Numunelerin 550°C'deki fırından 6 saat sonra çıkartılması

### 5.5.3. Sertlik testi

Microsertlik değerleri Vickers ucu kullanılarak, Buehler Digital Microhardness Tester MMT-3 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik testleri ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısıtılma işlem görmüş numunelere uygulanmıştır. Kaynaklı malzemelerde kaynak bölgesi ve oluşan bölgelerdeki farklılıkları gözlemlemek amacıyla, sertlik değerleri kaynak merkezinin her iki tarafından yaklaşık 30 mm uzaklığa kadar alınmıştır. Ölçümler yüzeyden 1mm derinlikte alınmıştır. Numuneler mekanik olarak parlatılmıştır.

### 5.5.4. Çekme deneyleri

Çekme testleri üç ana grupta gerçekleştirilmiştir. Öncelikle malzemenin özelliklerinin belirlenmesi için ana malzemenin testleri yapılmıştır. Daha sonra kaynak yapılmış malzemenin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra da ısıtılma işleminin mekanik özellikler üzerine etkisini görebilmek için tekrardan ısıtılma işlemi yapılmış malzemenin testleri yapılmıştır. Çekme deneyleri 1 mm/dak çekme hızında yapılmıştır. Ana malzeme için 5, kaynaklı malzeme için 7 ve tekrar ısıtılma işlemi görmüş malzeme için 6 numune kullanılmıştır.

Çekme ve yorulma testleri bilgisayar kontrollü Instron 8500 Servo Hydraulic Universal Test Machine kullanılarak yapılmıştır. Cihaz 200 kN statik ve 100 kN dinamik yük kapasitesine sahiptir.

### 5.5.5. Yorulma deneyleri

Yapılan yorulma deneylerinde, sabit genlikli yükleme sırasında uygulanmış yükün 6013-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygulanan yük değerleri malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Yorulma deneyleri oda şartlarında, frekans değeri 10 Hz ve gerilme oranı  $R=0,1$  alınarak yapılmıştır. Yapılan yorulma deneylerinde yük değerleri elastik sınır içinde kalacak şekilde seçilmiştir. Ana malzeme için maksimum yük 15,3 kN, yük genliği 6,9 kN, kaynaklı malzeme için maksimum

yük 9,3 kN, yük genliği 4,2 kN, tekrar ısıl işlem görmüş malzeme için maksimum yük 9,3 kN, yük genliği 4,2 kN alınmıştır. Yapılan deneylerde, her değişik yük oranı için en az 4 tane numune kullanılmıştır. Ana malzeme için toplam 24, kaynaklı malzeme için 32, tekrar ısıl işlem görmüş malzeme için 19 tane numune test edilmiştir.

Sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük sinüs eğrisi şeklindedir ve deneylerin çoğu numuneler kopuncaya kadar devam etmiştir. Sünek malzemelerde belirli bir noktadan sonra plato (düzleşme) oluşur. Bu düzleşmenin olduğu noktaya yorulma sınırı (limiti) denilmektedir. Yorulma limitinden sonra malzeme sonsuza kadar kopmaz. Alüminyum alaşımlarında bu limit söz konusu değildir. Fakat yapılan çalışmalar incelendiğinde çevrim sayısı  $10^6$ - $10^7$  mertebelerinden sonra deneylerin çok uzun sürdüğü ve bu değerlerde testlerin sonlandırıldığı görülmektedir. [30-42,49-51]. Bu çalışmada da uygulanan yorulma değerlerinde çevrim sayısı  $10^7$  değerine ulaştığında testler durdurulmuştur.

#### 5.5.6. Kırılma yüzeylerinin incelenmesi

Mekanik karakterizasyona ek olarak, optik mikroskop ve üzerinde Oxford Instrument EDX 7430T ilavesi bulunan Zeiss Supra 50 VP FEG taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kapsamlı bir mikro yapısal inceleme yapılmıştır. Alüminyum alaşımında hadde yönünü, tanelerin dağılımını, tanelerin yaklaşık büyüklüklerini ve kaynaktan etkilenen bölgeleri net olarak göstermek amacıyla optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

Yorulma deneyleri sonucunda kırılan numuneler hem kırılma yüzeylerinden hem de yan yüzeylerden detaylı olarak incelenmişlerdir. Kırılma yüzeylerinin düz olamaması nedeniyle mikro yapı incelemeleri derinliğine görme yeteneği optik mikroskoba nazaran çok daha iyi olan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin bir kısmı hiçbir işlem görmeden ve alüminyum iletken olduğu için yüzeyleri kaplanmadan incelenmiştir. İnceleme öncesi herhangi bir toz ya da yabancı madde bulunmasını engellemek amacıyla alkol içine daldırılıp temizlenmiş, iyice kurutulduktan sonra, hareket

etmeyecek şekilde stablara (elektron mikroskobu için numune yatakları) yerleştirilerek incelemeler gerçekleştirilmiştir. 10 kV ila 20 kV hızlandırma voltajında ikincil elektron (secondary electron, SE) görüntü tekniği kullanılarak kırılma yüzeylerinin görüntüleri elde edilmiştir.

Numunelerin farklı bölgelerinin ve bu bölgelerde oluşan farklı fazların kompozisyonlarını belirlemek amacıyla kimyasal analizler, SEM'e bağlı olan EDX detektörü ile elde edilmiştir. Bu detektörler bileşimde bulunan tüm elementleri saptayabilir ve kimyasal bileşimler yaklaşık olarak belirlenebilir.

Numunelerin bir kısmı hiçbir işlem yapılmadan kırılma yüzeylerinden incelenmiş, diğer numuneler mekanik olarak parlatılmıştır. Parlatma önce zımpara daha sonra elmas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kısa zımparalama, düşük kuvvet ve düşük devir uygulanmıştır. Devir sayısı 150 Rpm olacak şekilde 220 grip zımpara ile işlem başlatılmış, 1200 gripte bitirilmiştir. Zımpara işlemi üzerine düşük devirde 3 mikron ve ardından 1 mikron elmas kullanılarak işlem sonlandırılmıştır. Parlatmadan sonra hidroflorik asit kullanılarak dağlama yapılmıştır.

Kesme işlemi hassas kesme cihazı Strevers Secoton 10 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Silisyum Karbür (SiC) kesme diski kullanılarak, 1500 Rpm dönü hızı ve 0,1 mm/sn ilerleme hızı uygulanmıştır. Kalıplama Buehler marka epoxy reçine kullanılarak soğuk kalıplama yapılmıştır. Parlatma, önce zımpara daha sonra elmas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi Buehler Phoenix 4000 otomatik zımparalama parlatma cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kısa zımparalama, düşük kuvvet ve düşük devir uygulanmıştır. Devir sayısı 150 Rpm olacak şekilde 220 grip zımpara ile işlem başlatılmış, 1200 gripte bitirilmiştir. Zımpara işlemi üzerine parlatma işlemi düşük devirde 3 mikron ve ardından 1 mikron elmas kullanılarak işlem sonlandırılmıştır. Parlatma işleminde 150 Rpm dönü hızı ve 10 N yük kullanılmıştır. Dağlama işlemi ise Keller dağlayıcısı kullanılarak yapılmıştır. Karışımın içinde % 2 hidroflorik asit (HF), % 98 su bulunmaktadır. Daldırma 15 saniye sürede yapılmıştır.

## 6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

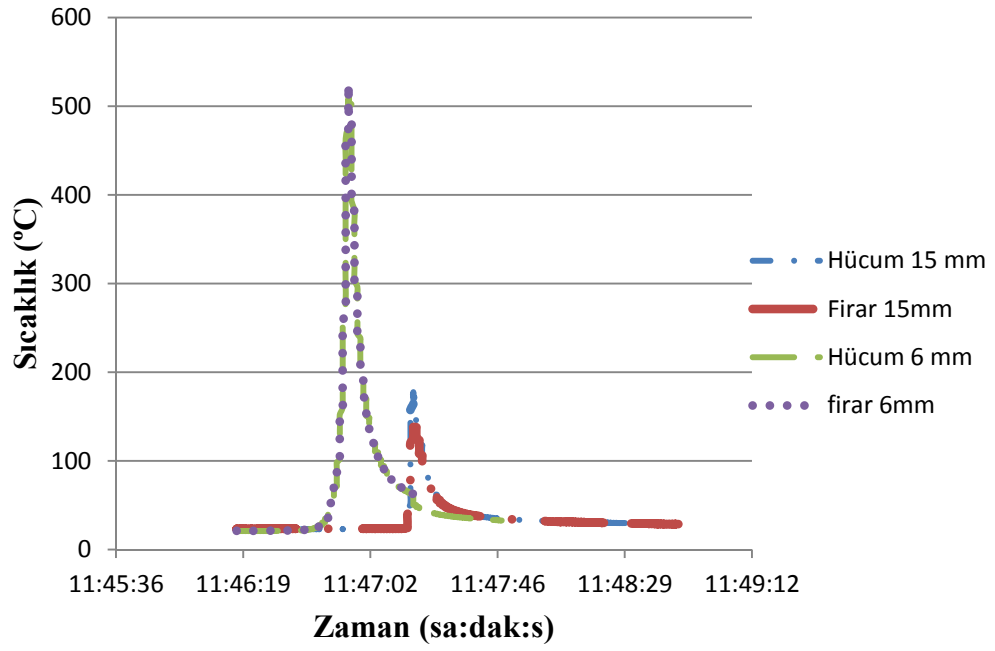
Bu bölümde, yapılan deneyler ve testler doğrultusunda elde edilen sonuçlar, literatür çalışması esnasında elde edilen verilerle de karşılaştırmaları yapıp, ortaya konularak yorumlanmıştır.

### 6.1. Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Değerleri

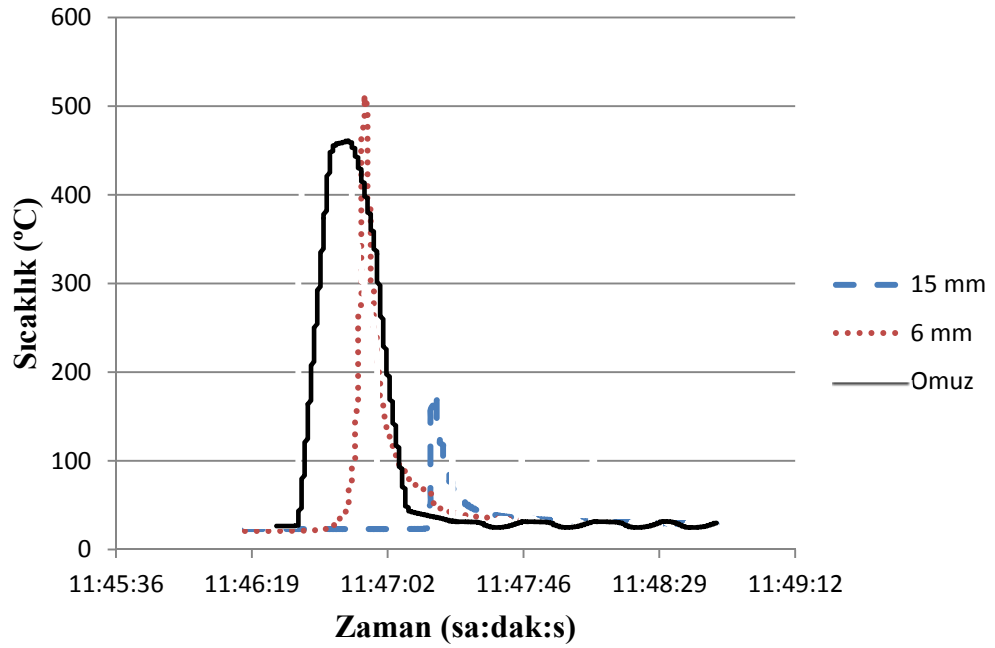
Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında kaynak merkezinden 6 mm ve 15 mm uzaklıklardan ayrıca omuz üzerinden sıcaklık değerleri alınmıştır. Kaynak işlemi yaklaşık 1,5 dakika sürmüştür ve bu süre zarfında sıcaklık değerleri termokapılardan alınan değerler doğrultusunda bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.

Kaynak merkezinden uzaklaştıkça ısı değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kaynak hücum ve firar kenarı taraflarından eşit mesafede alınan sıcaklık değerleri arasında ihmal edilebilir bir fark görülmektedir (Şekil 6.1). Bu da kaynak işlemi esnasında sıcaklığın kaynak yapılan malzemelere eşit oranda yayıldığını göstermektedir. Ayrıca kaynak hücum ve firar kenarlarındaki sıcaklık farkının az oluşu kaynak ucunun dönüş yönünün, kaynak yapılan malzemede ortaya çıkan sıcaklığa etki etmediği saptanmıştır.

Şekil 6.2 incelendiğinde kaynak merkezine 6 mm uzaklıktan ve omuz üzerinden alınan değerlerde sırasıyla en yüksek sıcaklık değerleri 500°C ve 480°C bulunmuştur. Bu değerler göz önüne alındığında alüminyumun ergime sıcaklığı olan 660°C sıcaklığı asla çıkmadığı görülmüştür. Kaynak işlemi esnasında ergime gerçekleşmemiştir.



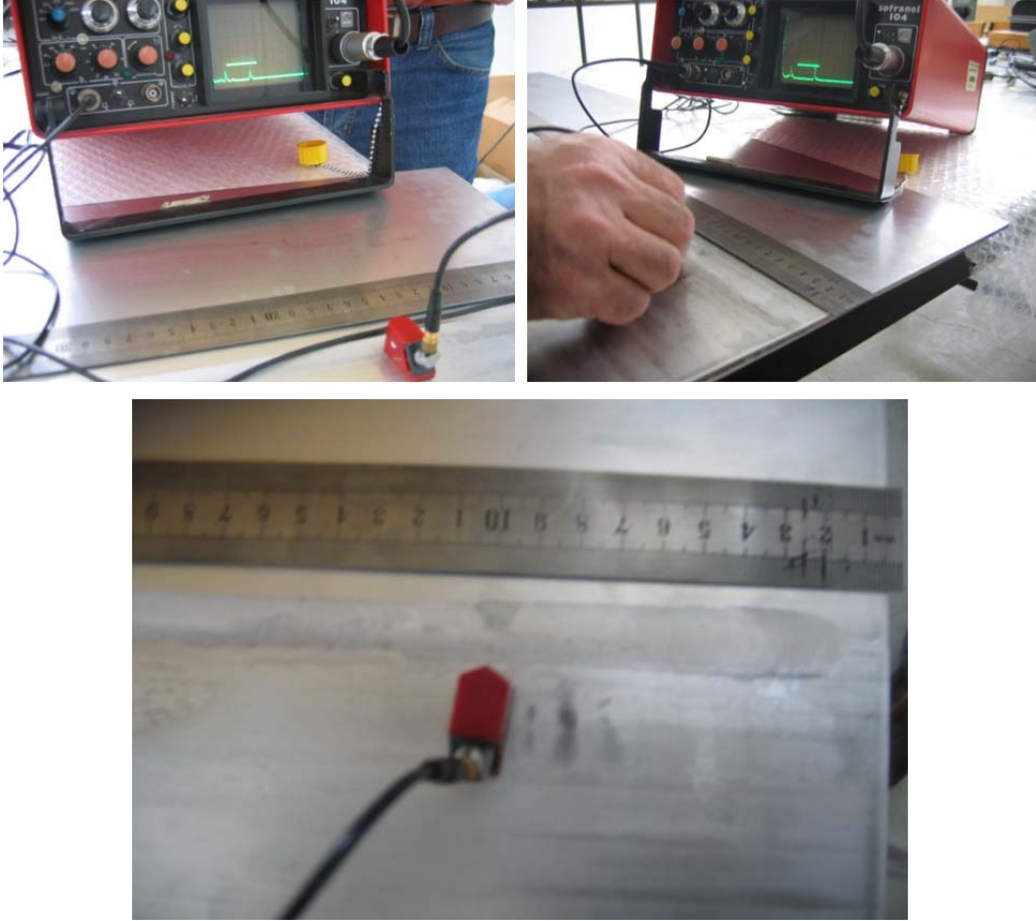
Şekil 6.1. Kaynak hücum ve firar kenarlarından alınan sıcaklık değerleri



Şekil 6.2. Kaynak merkezine 6mm – 15mm uzaklıktan ve omuz üzerinden alınan sıcaklık değerleri

## 6.2. Hasarsız Kontrol Yöntemleri

Girdap akımları kontrol yöntemi ve sıvı penetrant kontrol yöntemleriyle levha üzerinde herhangi bir hata ya da süreksizliğe rastlanmamıştır. Sıvı penetrant kontrol yöntemi ultrasonik yöntemde yüzeye açık süreksizliklerin gözden kaçabileceği durumları engellemek için uygulanmıştır. Girdap akımları kontrol yöntemi de ultrasonik kontrol yönteminde çıkan sonuçları desteklemesi için uygulanmıştır. Ultrasonik kontrol yöntemi ile kaynaklı levhanın kaynağın bittiği kenardan 100 mm içeride bir süreksizlik tespit edilmiştir (Şekil 6.3). Ancak bu alan testlerde kullanılmadığı için değerlendirmeye alınmamıştır. Levha üzerinde ve kaynak bölgesinde başka bir hata ya da süreksizliğe rastlanmamıştır.



Şekil 6.3. Ultrasonik kontrol yöntemi ile levhanın kontrol edilmesi

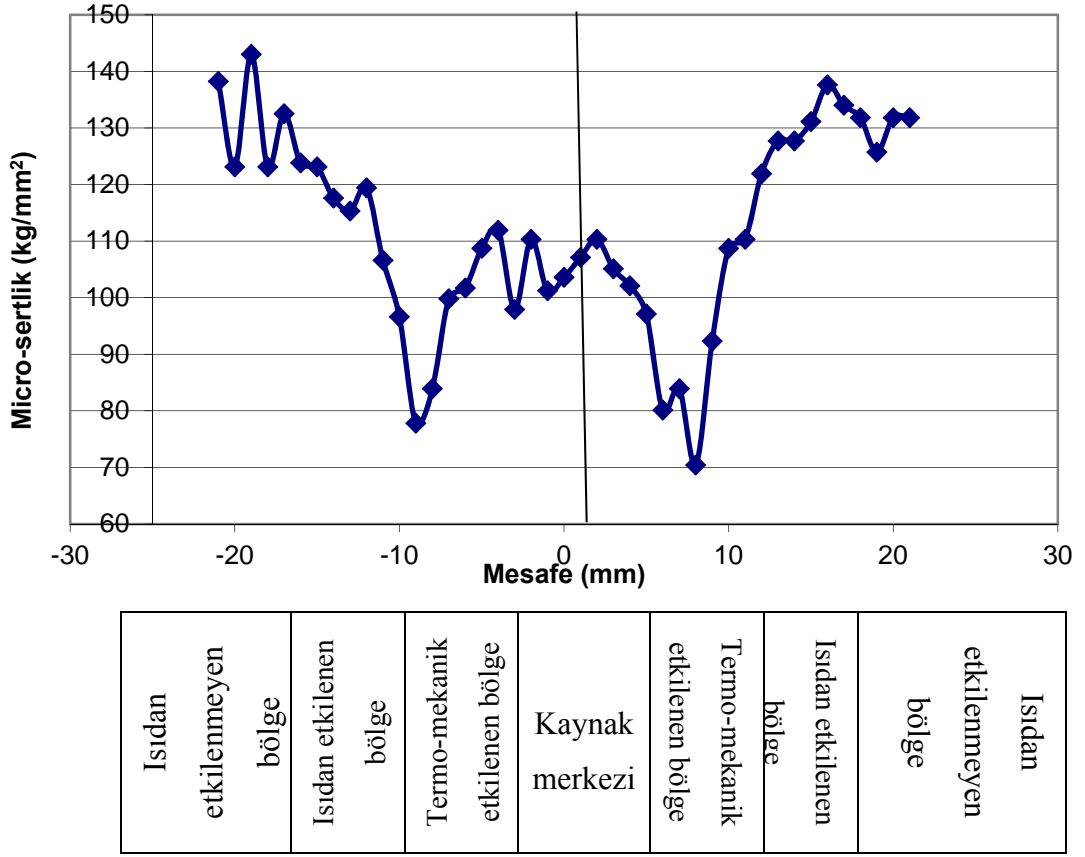
### 6.3. Sertlik Testi

Sertlik testleri ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısıl işlem görmüş kaynaklı malzemenin aralarındaki farklılıkları ortaya koymak ve kaynak esnasında oluşan farklı bölgelerdeki değişimleri anlayabilmek amacıyla uygulanmıştır.

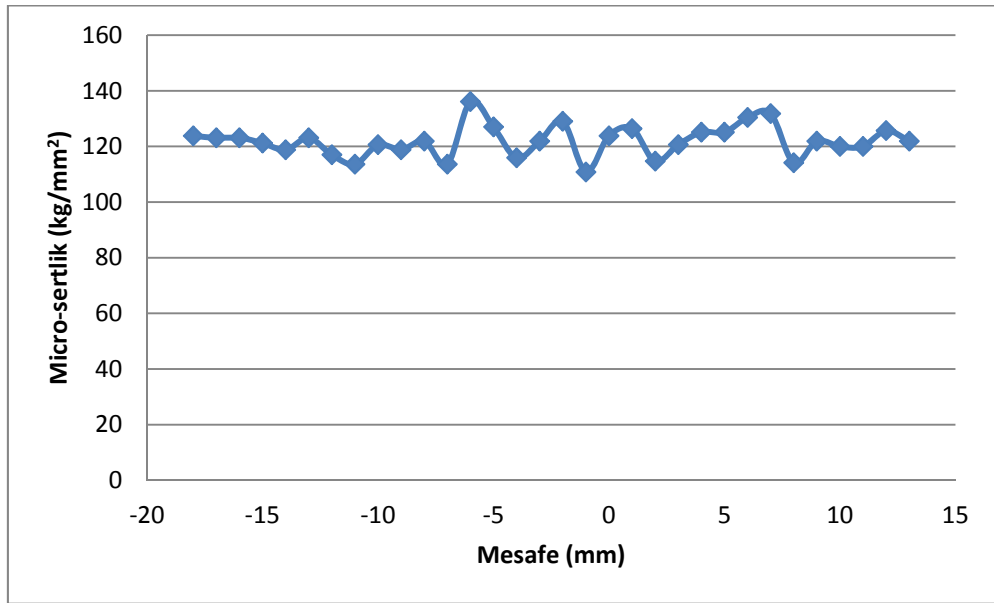
Mikrosertlik değerleri Vickers ucu kullanılarak, Buehler Digital Microhardness Tester MMT-3 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.4'de verilmiştir. T6 konumundaki ana malzemenin ortalama sertlik değeri 130 HV iken, kaynaklı malzemenin kaynak bölgesindeki sertlik değeri 100 HV, ısıdan etkilenen bölgede 85 HV'dir. Kaynak bölgesi ana malzemeye göre daha az mukavemetlidir. Isıdan etkilenmiş bölge en az mukavemet değerine sahip bölgedir. Bu sertlik değerlerindeki azalma kaynak merkezinin her iki tarafından yaklaşık 15 mm uzaklıkta görülmektedir. Literatürde incelenilen kaynaklarda da sertlik değerlerinin termo-mekanik etkilenmiş bölgenin bitişiyle, ısıdan etkilenmiş bölgenin başlangıcı olan alanda azaldığı görülmüştür [79,81,100].

Kaynak yapıldıktan sonra tekrar ısıl işlem uygulanmış kaynaklı malzemede ise ortalama sertlik değeri 125 HV'dir. Isıl işlemde sonra kaynak bölgesi ve ısıdan etkilenen bölgelerin ana malzemeye yakın sertlik değerlerine ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 6.5).

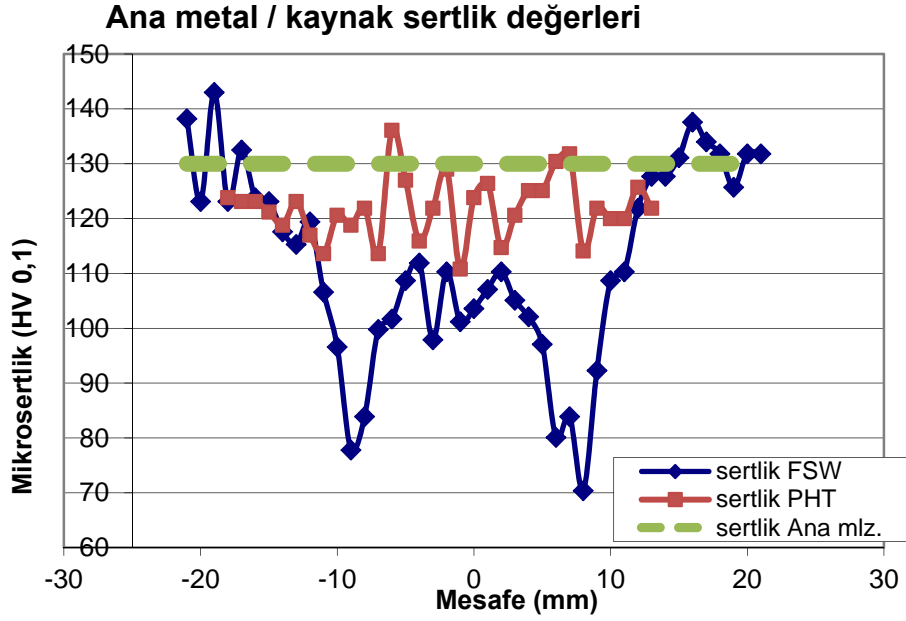
Çözülmenin, kabalaşmanın ve kaynak prosesinden açığa çıkan ısının bir sonucu olarak sertlik değerleri kaynak dikişi (nugget) ve ısıdan etkilenmiş bölgede düşmüştür. Bunun nedeni  $Mg_2Si$  fazlarının bu ısıya bağlı olarak çözünmesi, kabalaşması ve dönüşmesinin sonucudur. Azalan bu sertlik profilinin sınırı aynı zamanda ısıdan etkilenen bölgenin de sınırını oluşturmaktadır. Kaynak dikişindeki sertlik değerlerinde hafif bir yükselme görülmektedir. Bu genellikle bu bölgede soğuma koşullarına bağlı doğal yaşlanmanın sonucudur. Minimum sertlik kaynak merkezinden yaklaşık 8-10 mm uzakta ölçülmüştür. Bu sınır termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin kenarı ve ısıdan etkilenmiş bölgenin başlangıcını oluşturmaktadır (Şekil 6.6).



Şekil 6.4. Kaynaklı malzemenin sertlik profili



Şekil 6.5. Kaynak işleminden sonra tekrar T 6 ısl işlemi uygulanmış malzemenin sertlik profili



Şekil 6.6. Ana metal ve kaynaklı malzemelerin sertlik profillerinin karşılaştırması

#### 6.4. Çekme testi

Çekme testleri sırasıyla ana malzeme, sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış malzeme ve kaynaktan sonra tekrar ısıtılmış malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda akma değerleri ( $\sigma_a$ ) bulunmuştur ve malzemelerin farklı numunelerinden alınan ortalama kopma değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Kaynaklanmamış ana malzeme 300 MPa akma gerilmesi ve 375 MPa kopma gerilmesi göstermiştir. Buna karşın, kaynaklı malzeme ise 207 MPa akma gerilmesi ve 281 MPa kopma gerilmesi göstermiştir. Tekrar ısıtılmış malzeme ise 245 MPa akma gerilmesi ve 300 MPa kopma gerilmesi göstermiştir. Ana malzeme ile kıyaslandığında, kaynağa göre enlemesine test edilen numuneler daha düşük gerilme ve süneklik ortaya koymuştur. Bu durumda, testi yapılan 6013-T6 malzemenin FSW’li kaynaklarda gerilme değerlerinin % 25-30 düştüğü görülmüştür. Kaynak işleminden sonra tekrar ısıtılmış malzemede mukavemetinin ana malzemeye göre % 20 düştüğü ve kaynaklı malzemeye nazaran mukavemetin arttığı gözlenmiştir. T6

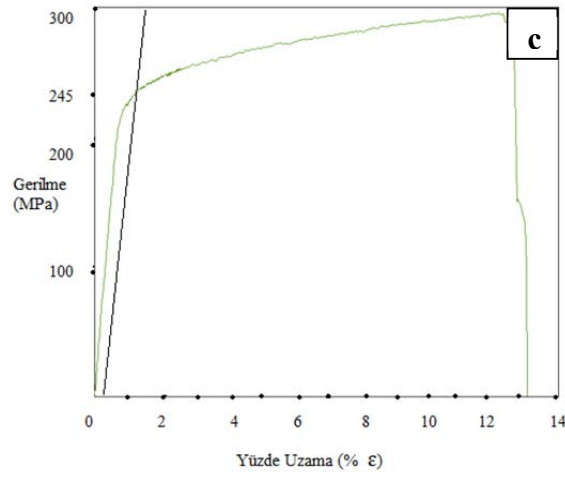
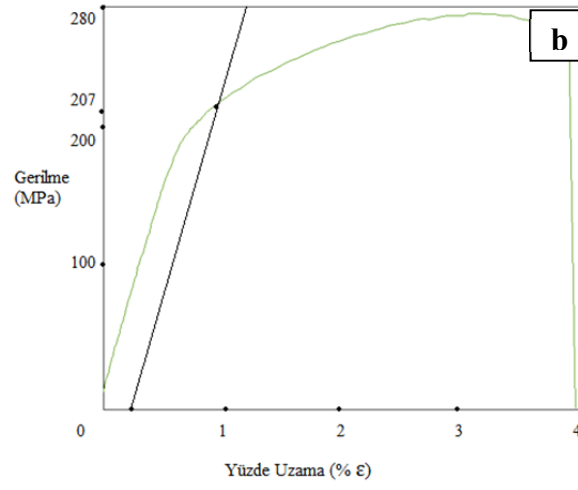
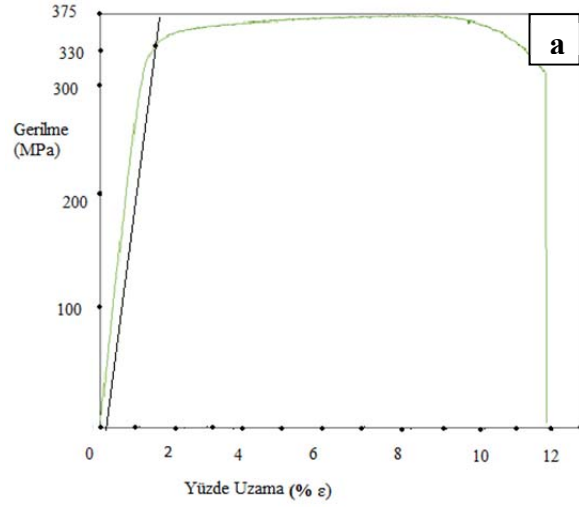
durumundaki çekme testleri, kırılmanın her zaman ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) meydana geldiğini göstermektedir. Kaynak verimliliği ( $\sigma_{\max\text{FSW}} / \sigma_{\max\text{Ana}}$ ), kaynaklı malzemenin kopma gerilmesinin kaynaklanmamış ana malzemenin kopma gerilmesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Kaynaklı malzemede % 75 ve tekrar ısı işlem görmüş malzemede % 80 kaynak verimine ulaşılmıştır.

**Çizelge 6. 1.** Ana malzemenin, kaynaklı malzemenin ve tekrardan T6 ısı işlemi görmüş kaynaklı AA6013-T6 malzemesinin çekme test sonuçları

Malzeme	Young Modülü [MPa]	Akma Gerilmesi (% 0.2) [MPa]	Çekme Gerilmesi ( $\sigma_{\max}$ ) [MPa]	Mukavemetteki Değişim [%]	Kaynak Verimi $\sigma_{\max\text{FSW}} / \sigma_{\max\text{Ana}}$ [%]
6013-T6 Ana	31804	330	375		
6013-T6 FSW	32453	207	281	64	75
6013-T6 FSWPHT		245	300	75	80

Kaynaklı numunelerde sertlik profilinden anlaşılacağı üzere (Şekil 6.6) kaynak bölgesinde ısıdan etkilenen bölgede sertlik dolayısıyla da mukavemet düşmektedir. Bu durum, mukavemet açısından ısıdan etkilenmiş bölgenin çekme testlerinde en zayıf bölge olmasına neden olmuştur.

Isıdan etkilenmiş bölge (HAZ) sıcaklığa maruz kaldığı için, çökelti partiküllerinin büyümeye devam ettiği aşırı yaşlanma ya da kabalaşma gösterdiği gözlenmiştir. Bu büyüme partiküller arasındaki mesafenin artmasına bu nedenle de dislokasyonların bir engele çarpmadan daha fazla ilerlemesine dolayısıyla da mukavemet azalmasına sebep olmuştur. Kaynaklı malzemenin en zayıf ve en az sertliğe sahip bölgesidir. Uygulanılan çekme testlerinde kopma hep bu bölgede gerçekleşmiştir. İncelenilen daha önce yapılmış çalışmalarda da çekme test sonuçlarında aynı bölgede kopma olduğu görülmüştür [30,56,81,82]. Şekil 6.7'de ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısı işlem uygulanmış malzeme için gerilme-uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 6.7. (a) Ana malzeme (b) kaynaklı malzeme (c) tekrar ısıl işlem uygulanmış malzeme için gerilme-uzama eğrileri

## 6.5. Yorulma testi

Yapılan deneysel çalışmalarda, sabit genlikli yükleme sırasında uygulanmış yükün 6013-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışı incelenmiştir. Uygulanan yük değerleri malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Yorulma deneyleri normal şartlar altında, frekans değeri 10 Hz ve  $R=0,1$  alınarak yapılmıştır.

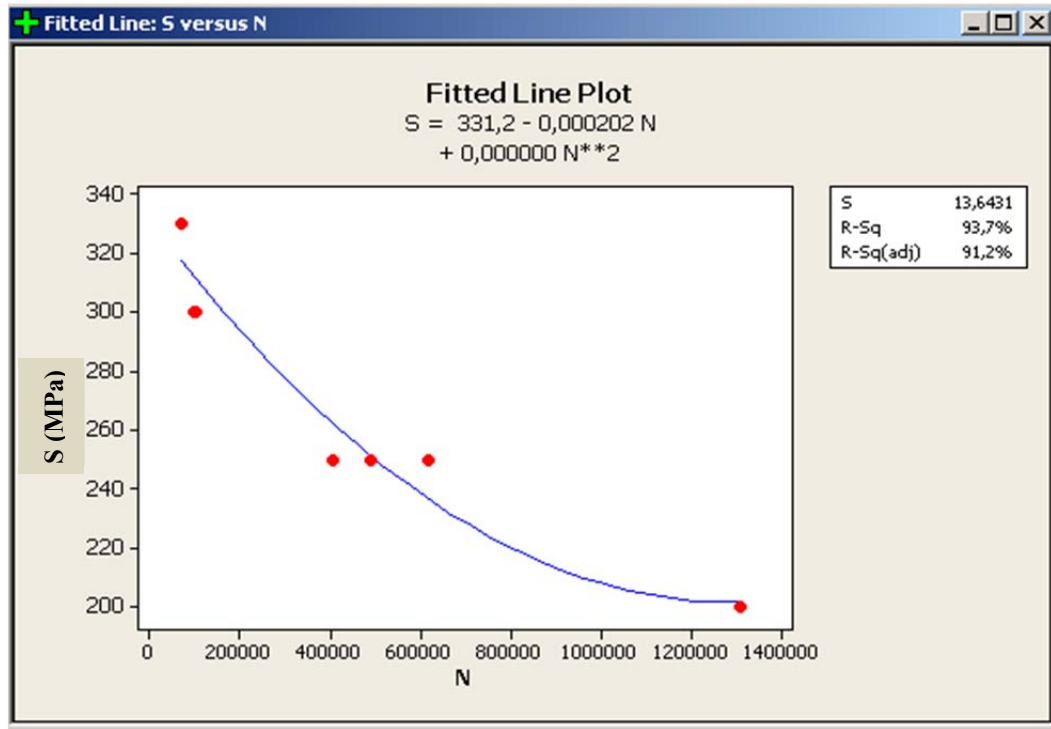
Ekte gerilme-deformasyon eğrileri verilmiştir. Regresyon denklemleri MINITAB istatistik paket programında Stat menüsünden Regression seçilmiş, oradan Fitted Line Plot kullanılarak kurulmuştur.

Uygulanan yorulma deneyleri sonucunda numunelerin ısıdan etkilenen bölgeden koptuğu gözlenmiştir (Şekil 6.8). Bu bölgenin diğer bölgelere nazaran daha düşük mukavemet değerlerine sahip oluşu ve kaynak esnasında oluşan soğan halkası izlerinin (onion ring) bu bölgede de oluşu yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için geçerli sebepler oluşturmaktadır.

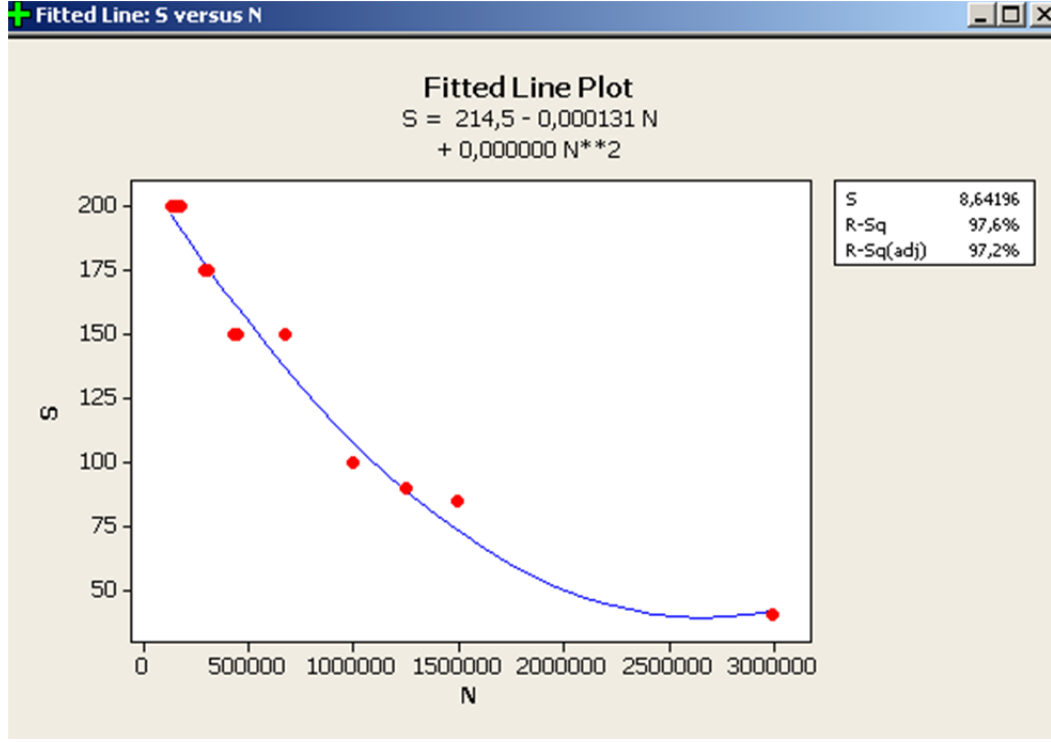


Şekil 6.8. Yorulma testleri sonucunda kopmuş numuneler ve kopmanın oluştuğu bölgelerin gösterimi

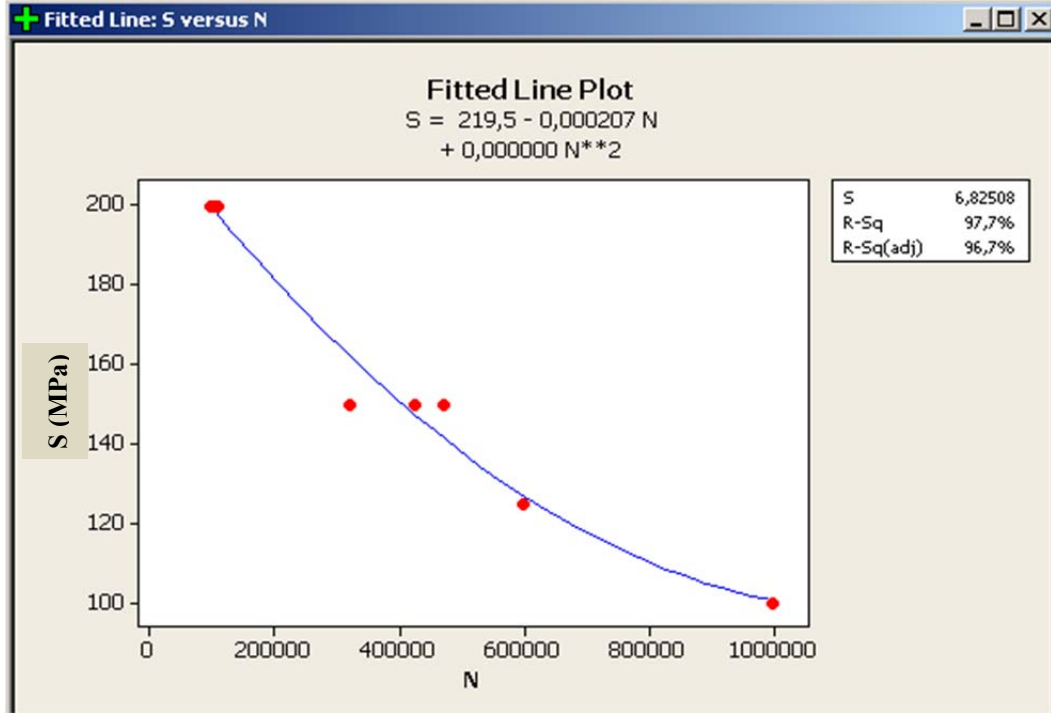
Ana malzeme için hazırlanan numunelere uygulanan gerilme değerleri 180 MPa ile 330 MPa değerleri aralığında seçilmiştir. Ana malzemeyle yapılan deneyler sonucunda kopmaya kadar çevrim sayıları ortalaması sırasıyla  $10^5$  ve  $1,7 \times 10^6$  bulunmuştur (Şekil 6.9). Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış malzeme için hazırlanan numunelere uygulanan gerilme değerleri 70 MPa ile 200 MPa değerleri aralığında seçilmiştir. FSW uygulanan malzemeyle yapılan deneyler sonucunda kopmaya kadar çevrim sayıları ortalaması sırasıyla  $10^5$  ve  $1,5 \times 10^6$  bulunmuştur (Şekil 6.10). Tekrar ısıl işlem görmüş kaynaklı malzeme için hazırlanan numunelere uygulanan gerilme değerleri 100 MPa ile 200 MPa değerleri aralığında seçilmiştir. Tekrar ısıl işlem görmüş malzemeyle yapılan deneyler sonucunda kopmaya kadar çevrim sayıları ortalaması sırasıyla  $10^5$  ve  $1 \times 10^6$  bulunmuştur (Şekil 6.11).



Şekil 6.9. Ana malzemenin S-N diyagramı



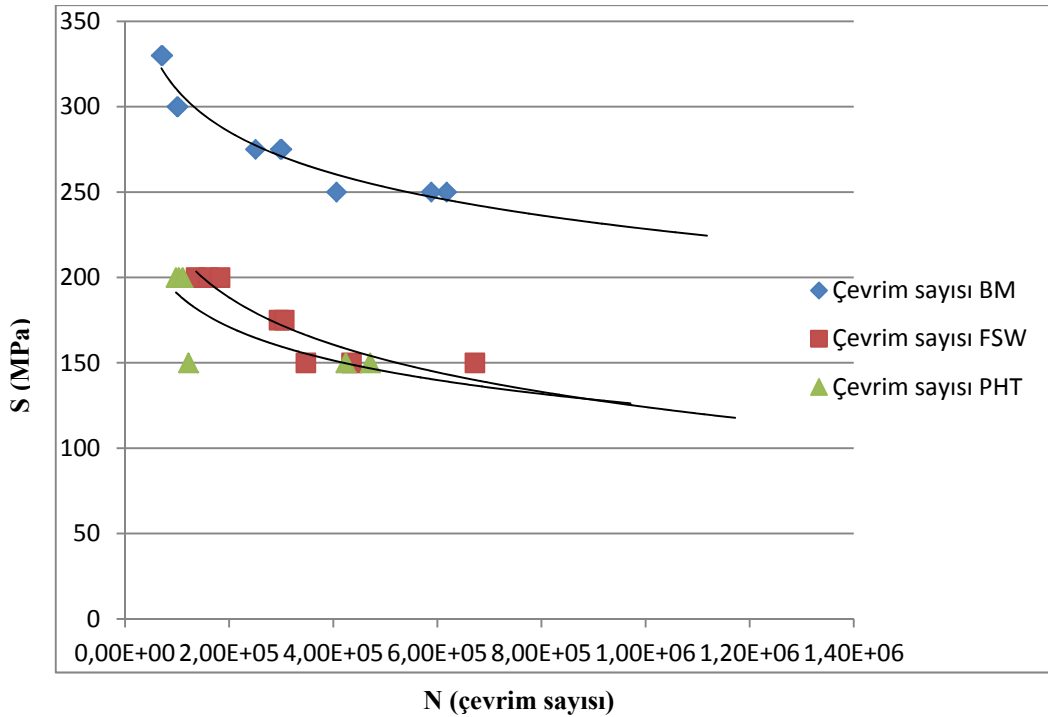
Şekil 6.10. FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramı



Şekil 6.11. Tekrar T6 ısıtılması yapılmış FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramı

Yapılan yorulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan gerilme ömür grafiklerinden ana malzemenin yorulma ömrünün kaynaklı malzemelere nazaran yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.12). Kaynaklı malzemelerde özellikle ısıdan etkilenen bölgede sertlik ve dolayısıyla da mukavemet değerlerindeki düşüş malzemenin yorulma ömrünü de azaltmaktadır. Her ne kadar kaynaklı numunelere yüzey işleme uygulanarak yüzey pürüzlülüğü azaltılsa da kaynak esnasında oluşan soğan halkası izleri tam anlamıyla yok edilememiştir ve bu izler yorulma çatlak başlangıcı için hızlandırıcı etki yapmışlardır.

Ortalama  $10^5$  çevrim sonucu kaynaklı malzemeler ile ana malzeme arasındaki yorulma mukavemeti farkı % 25 mertebelerinde iken  $10^6$  çevrimde bu fark yaklaşık aynı oranda kalmıştır. Tekrar ısıl işlem uygulanmış malzemelerde kaynaklı malzemeye nazaran  $10^5$  mertebelerinde yorulma mukavemeti farkı % 10 iken  $10^6$  mertebelerinde bu fark sifıra inmiştir.



Şekil 6.12. Ana malzeme, FSW uygulanmış malzeme ve tekrar T6 ısıl işlemi yapılmış FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramları

Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde, yorulma deneyi sonuçları, sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin yorulma özelliklerinin ana malzeme kadar iyi olmadığı gözlenmiştir [57,61,65]. Fakat FSW'nin yorulma performansı uçaklarda şu anda kullanılan perçinle birleştirmeye karşılaştırıldığında yorulma ömrünün yüksek olduğu görülmüştür [57,81,85,86]. Buna ilaveten, yüksek dönme ve ilerleme hızları ile FSW'li birleştirmelerin yorulma mukavemeti artmaktadır [57]. Genel olarak birleştirmelerin üst yüzeyinde uç ve omuzun etkisi ile oluşan profil çentik etkisi yaparak yorulma ömrünü azaltmaktadır. Dolayısıyla, kaynağın yorulma performansını geliştirmek için kaynak sonrası yüzey işlenmelidir. Yüzey pürüzlülüğün giderilmesi ile FSW kaynaklı alüminyum alaşımların yorulma ömürleri ana malzeme düzeyine yakın değerlere çekilmiştir [57,61,67,142].

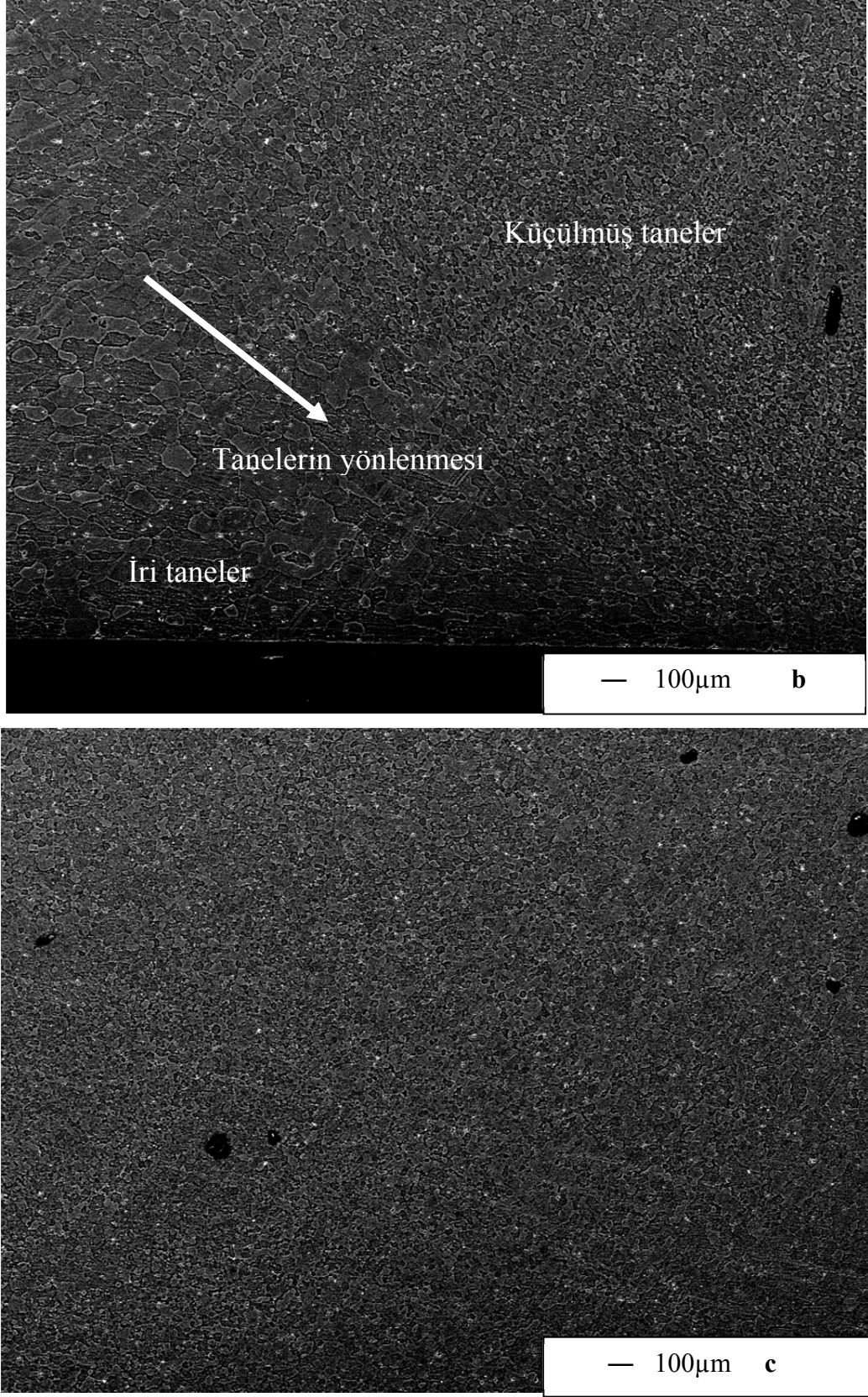
## 6.6. Mikroyapı İncelemeleri

### 6.6.1 Optik mikroskop

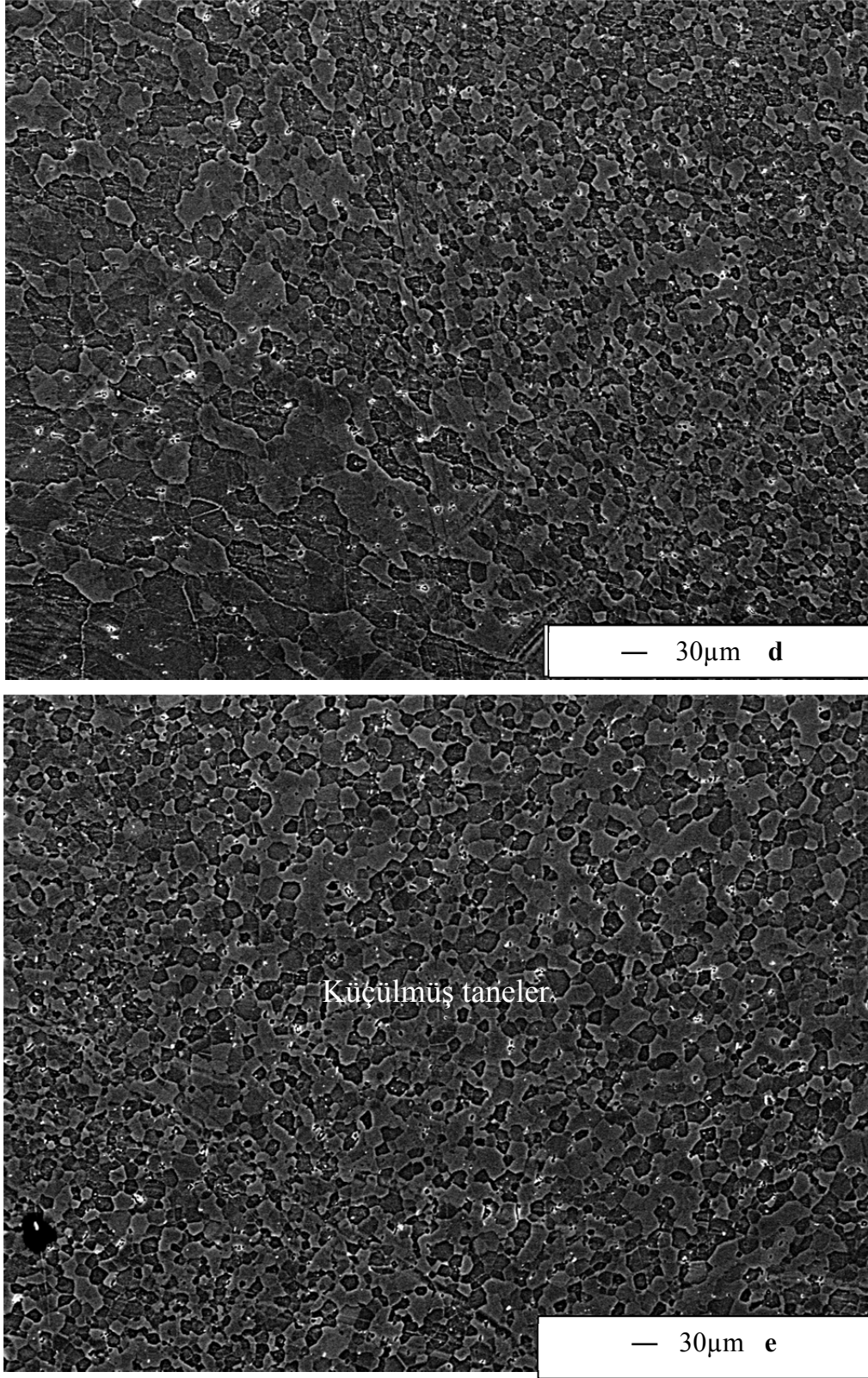
Kaynakla birleştirme işlemi malzeme mikroyapısını etkilemektedir. Bu nedenle etkilenen bölgeler incelenmiştir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de kaynaklı malzemenin makroyapısı ve mikroyapısı görülmektedir. Şekil 6.13'de kaynak bölgesi dağlamadan sonra belirgin olarak görülmektedir. Kaynak bölgesinin şekli, kaynak parametrelerine ve ana malzemenin cinsine bağlıdır [16-19]. Kaynak bölgesi V şeklindedir ve üst tarafa doğru genişlemektedir. Bu genişlemenin sebebi omuzun malzeme yüzeyi ile olan yakın temasıdır.

Şekil 6.13'de kaynaklı bölgenin yan kesit görüntüsü görülmektedir. Şekil üzerinde , (a) ana malzemenin, (b), (d) termo-mekanik etkilenen bölgeden, (c), (e) ısıdan etkilenen bölgeden alınmış görüntülerdir. Şekil 6.13.a'dan da görüleceği üzere ana malzeme eş eksenli tanelere sahip yeniden kristalleşmiş mikroyapı ile belirlenmektedir. Kaynaktan etkilenmemiş ana malzemenin mikro yapı görüntüsünde tanelerin ve görünür fazların hadde doğrultusunda paralel uzamış olduğu gözlenmiştir. Çökelti partikülleri çok net görülmektedir. Şekil 6.13.b ve Şekil 6.13.d'de yani termo-mekanik bölgede ise tanelerin küçülmeye başladığı ve yönlendirmelerin olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.13.c ve Şekil 6.13.e'de ise kaynak





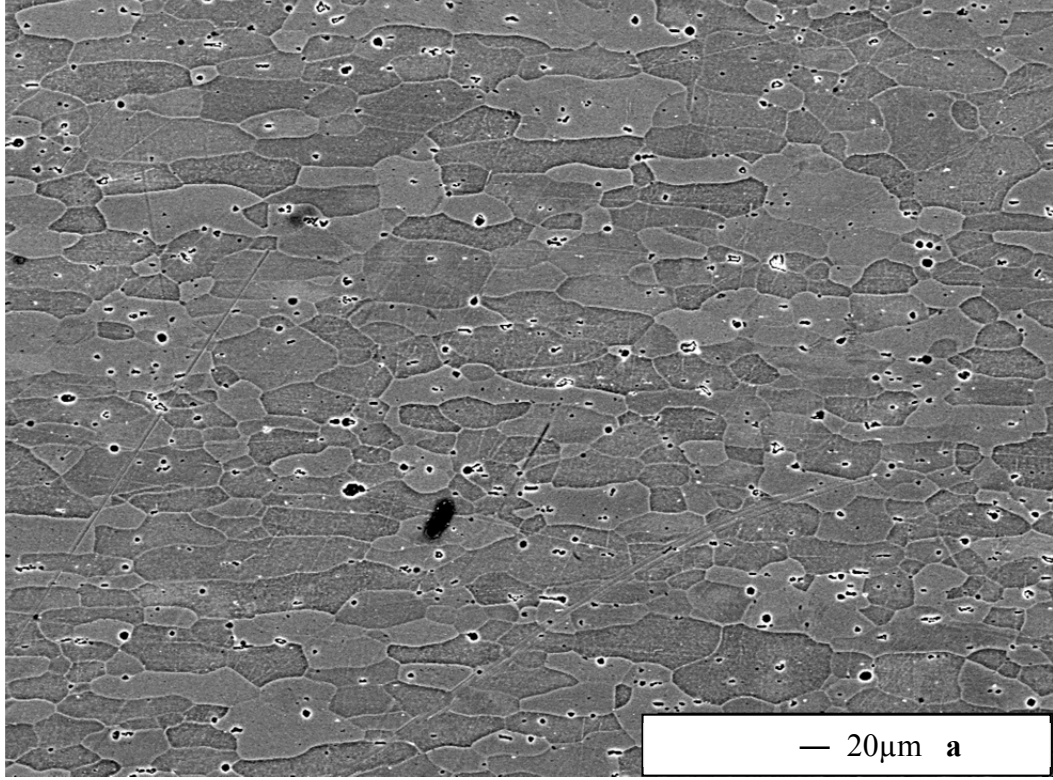
Şekil 6.14. AA6013-T6 FSW mikro görüntüler, (b) termo-mekanik etkilenen bölge, (c) kaynak bölgesi



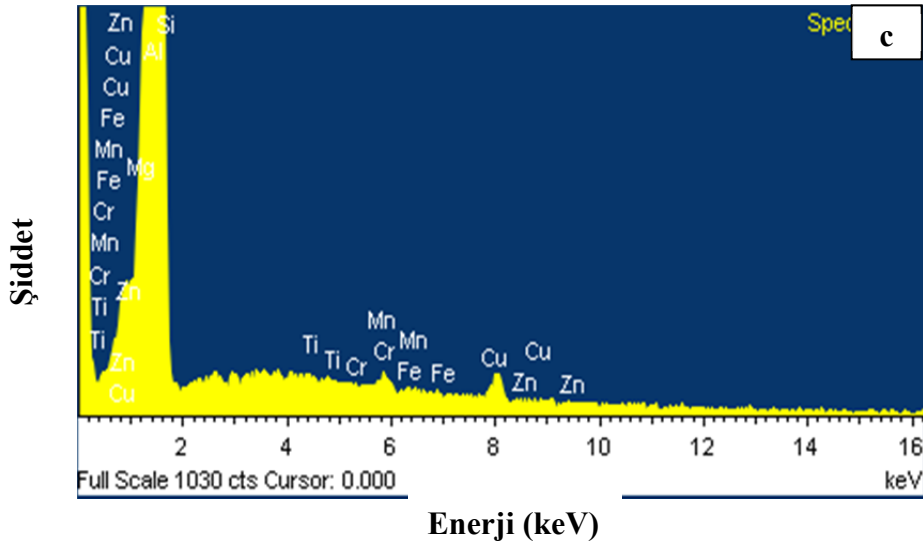
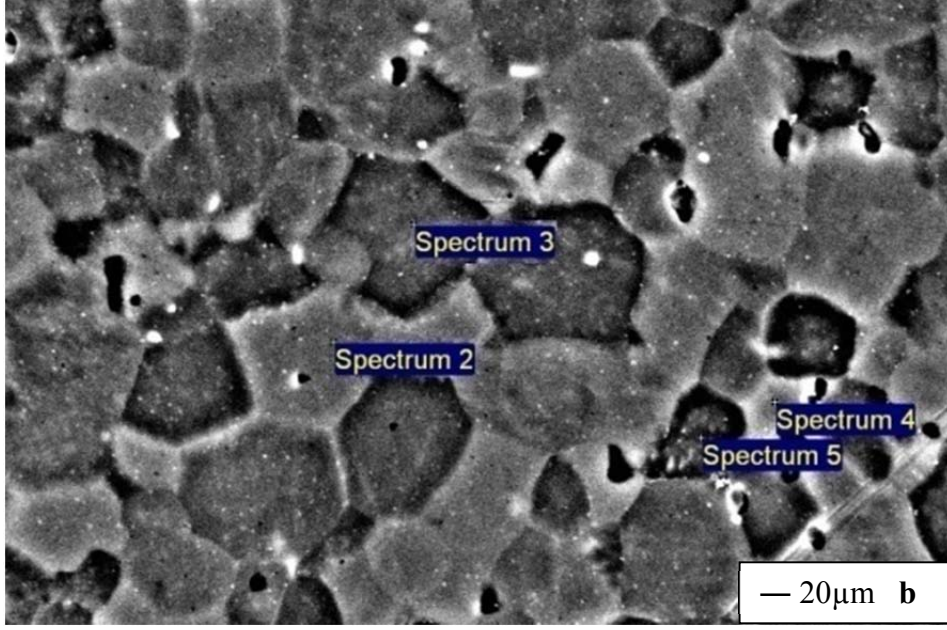
Şekil 6.14. AA6013-T6 FSW mikro görüntüler (d) termo-mekanik etkilenen bölge, (e) kaynak bölgesi

### 6.6.2. Kırılma yüzeylerinin incelenmesi

T6 ısıtım işlemi uygulanmış Al 6013 malzemesinin mikroyapısal değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 6.15’de ana malzemenin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.15.a’da görüleceği üzere ana malzeme eş eksenli tanelere sahip yeniden kristalleşmiş mikroyapı ile belirlenmektedir. EDX ölçümleri, Şekil 6.15.b’nin değişik noktalarından alınmıştır. Bu EDX sonuçlarında kimyasal bileşimler yaklaşık olarak birbirleri ile aynıdır ve noktalardan örnek olarak Şekil 6.15.c ve 6.16’da gösterilmiştir. Elde edilen EDX sonuçları  $Mg_2Si$ ’nin baskın çökelti olduğunu göstermektedir.

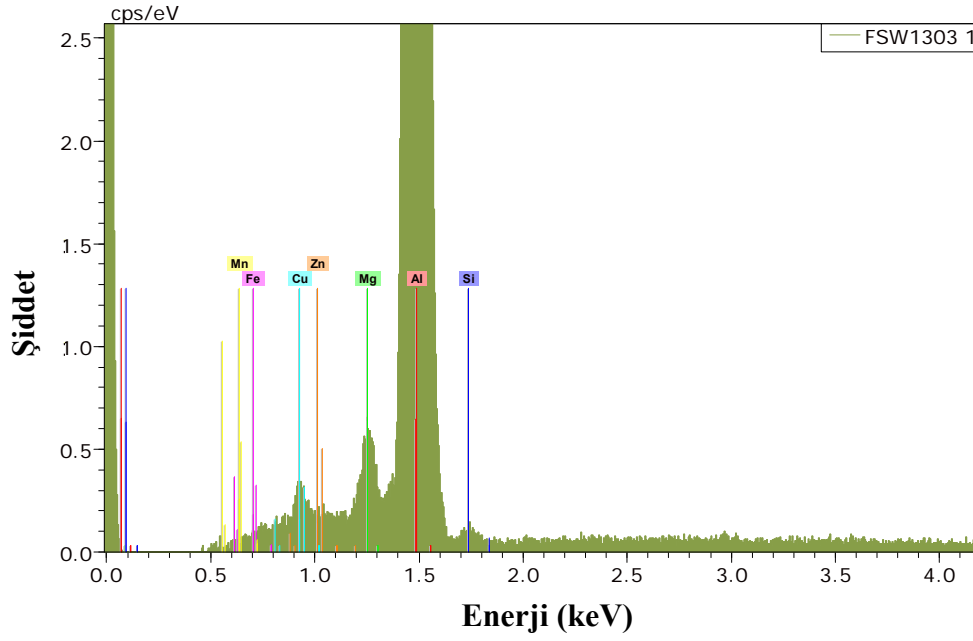
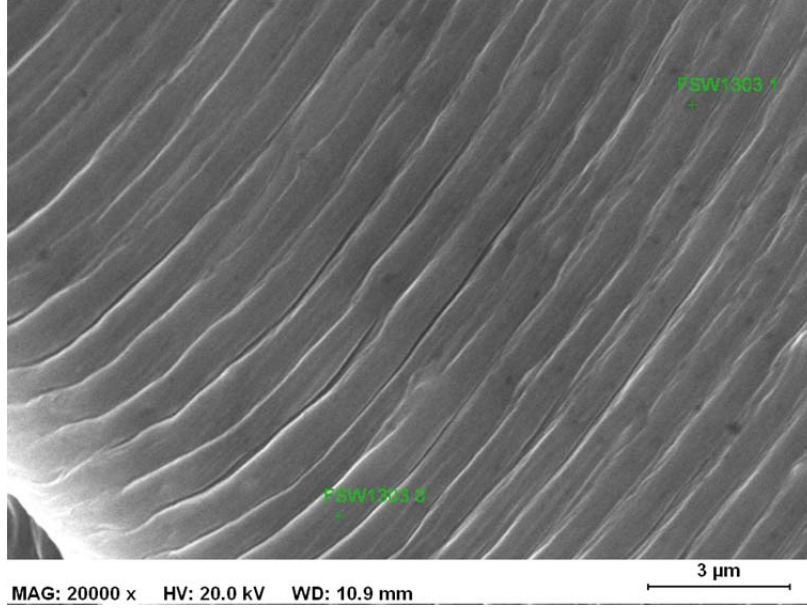


Şekil 6.15.a Ana malzemenin SEM görüntüsü



Element	Ağırlık%	Atom%
Mg K	0.88	0.98
Al K	96.58	97.43
Si K	0.85	0.82
Ti K	0.07	0.04
Mn K	0.34	0.17
Fe K	0.22	0.11
Cu K	1.07	0.46
Totals	100.00	

Şekil 6.15. (b) Ana malzemenin SEM görüntüsü (c) AA6013-T6 için EDX sonuçları

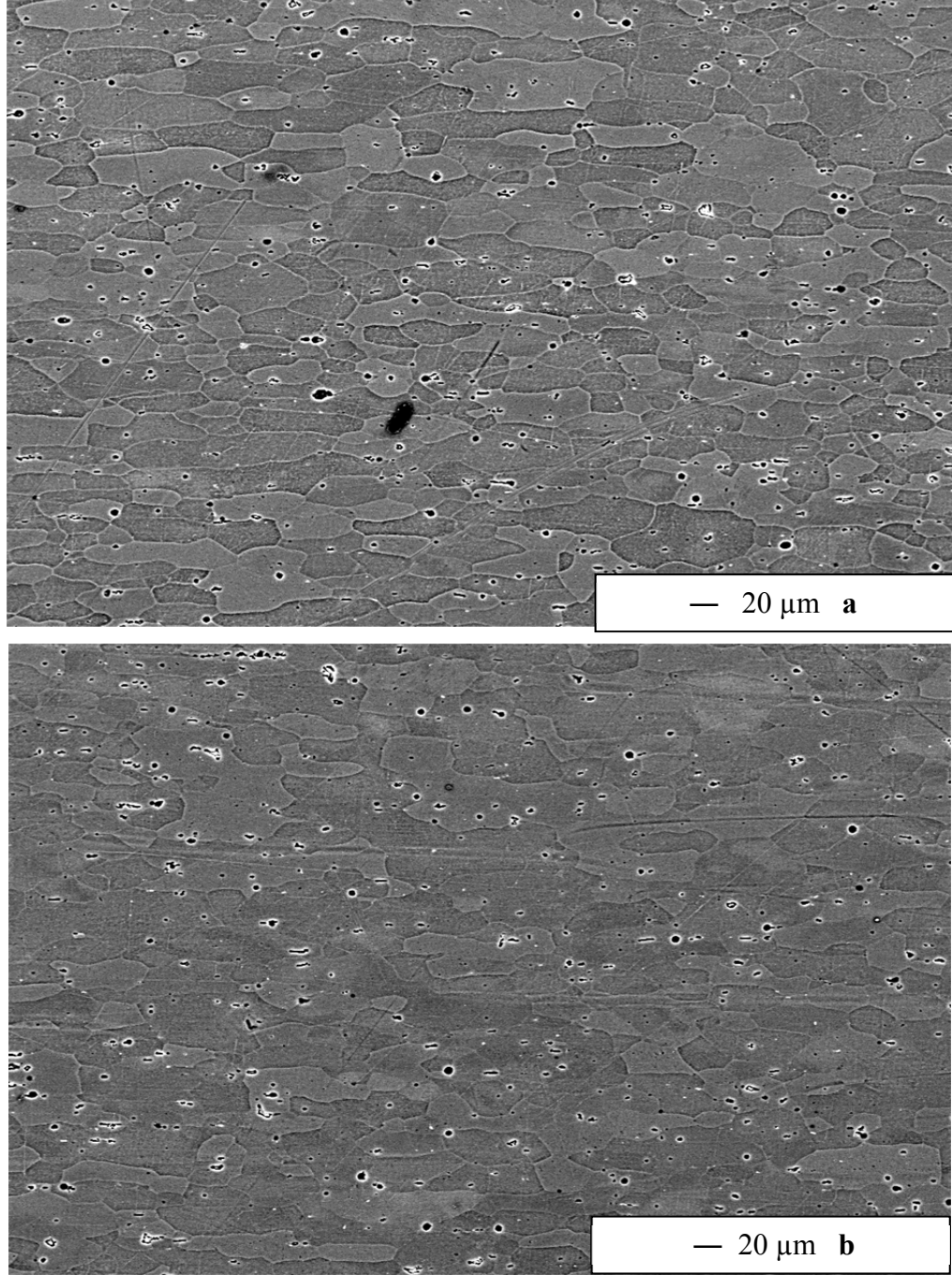


Spectrum: FSW1303 1

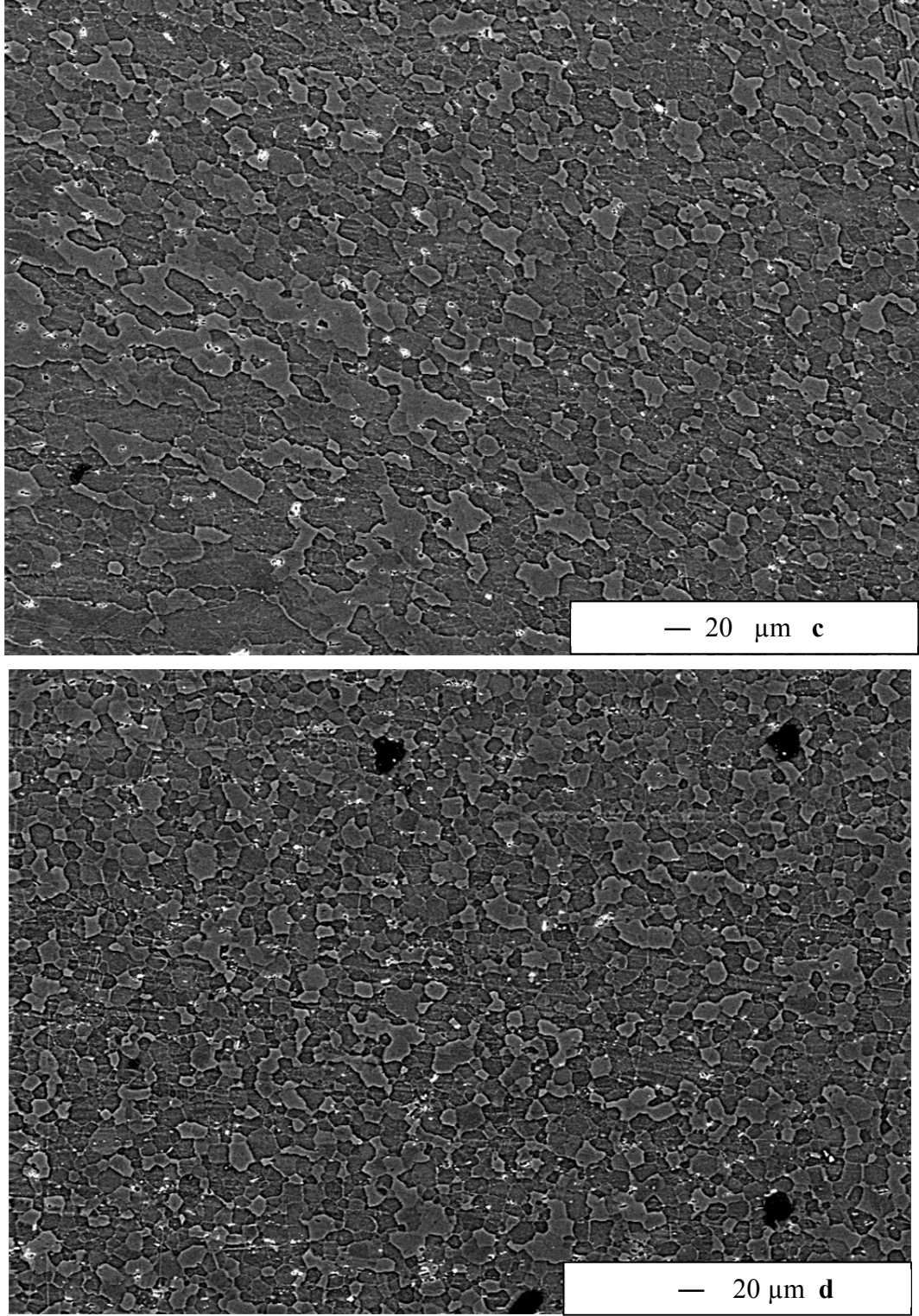
Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oxide	Oxid. C [wt.-%]	Error [%]
Silicon	K-series	0.49	0.45	0.43	SiO <sub>2</sub>	0.51	0.1
Aluminium	K-series	104.99	95.73	96.89	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96.59	5.0
Zinc	K-series	0.67	0.61	0.26	ZnO	0.41	0.1
Copper	K-series	1.19	1.09	0.47	CuO	0.73	0.1
Iron	K-series	0.32	0.29	0.14	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.1
Manganese	K-series	0.43	0.39	0.19	MnO	0.27	0.1
Magnesium	K-series	1.58	1.44	1.62	MgO	1.28	0.1
Total:		109.67	100.00	100.00			

Şekil 6.16. AA6013-T6 için farklı noktalardan EDX sonuçları

Kaynak yapılan bir parçada oluşan dört bölge etkilenmeyen bölge, ısıdan etkilenen bölge (Heat Affected Zone, HAZ), termo–mekanik etkilenen bölge (Thermo-Mecanically Affected Zone, TMAZ) ve kaynak dikişi (kaynak izi) Şekil 6.17’de gösterilmiştir.



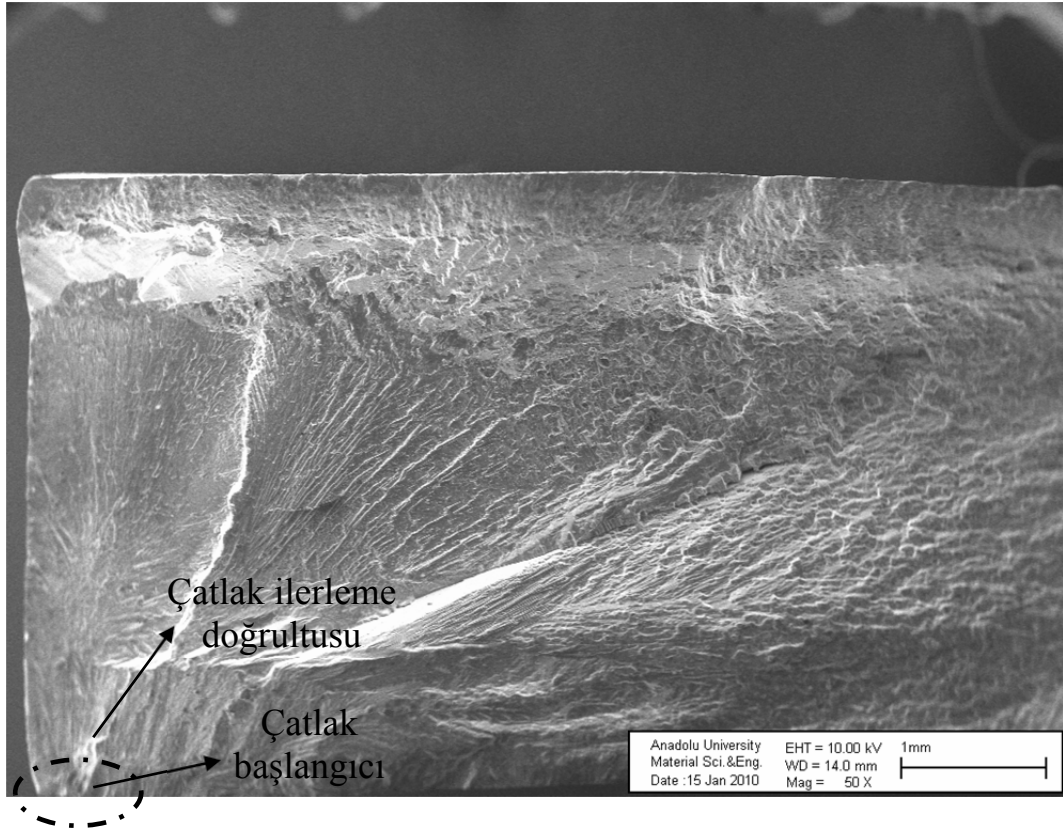
Şekil 6.17. FSW kaynaklı 6013-T6 levhasının SEM görüntüleri: (a) ana malzeme, (b) ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ)



Şekil 6.17. FSW kaynaklı 6013-T6 levhasının SEM görüntüleri: (c) termo-mekanik etkilenmiş bölge (TMAZ), ve (d) kaynak merkezi.

İncelenilen SEM görüntülerinden çatlağın yorulma çatlağıyla başladığı, kalan kesitin daraldığı ve üzerine gelen yükü taşıyamadığı ve ardından da malzemenin sünek kırıldığı gözlenmiştir.

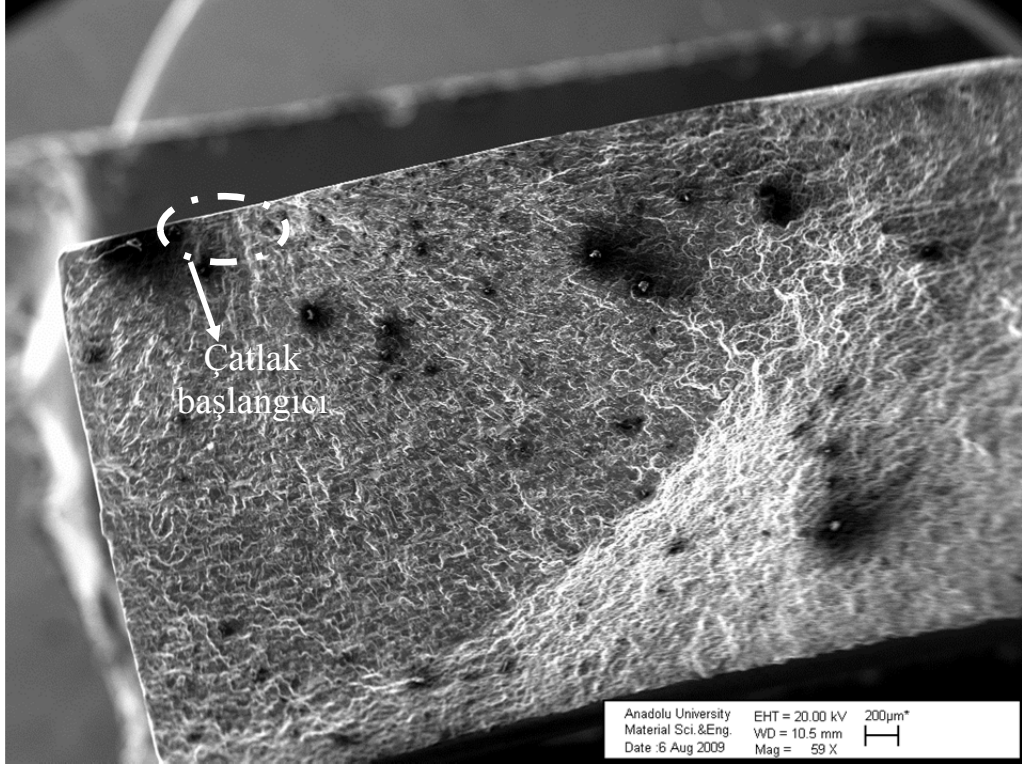
Ön çentik açılmayan numunelerde çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin gerilmenin yüksek olduğu köşelerde meydana geldiği düşük büyütme genel resimlerde görülmektedir. Şekil 6.18’de çatlağın köşeden başlayıp yapı içerisinde ilerlemesi gösterilmektedir.



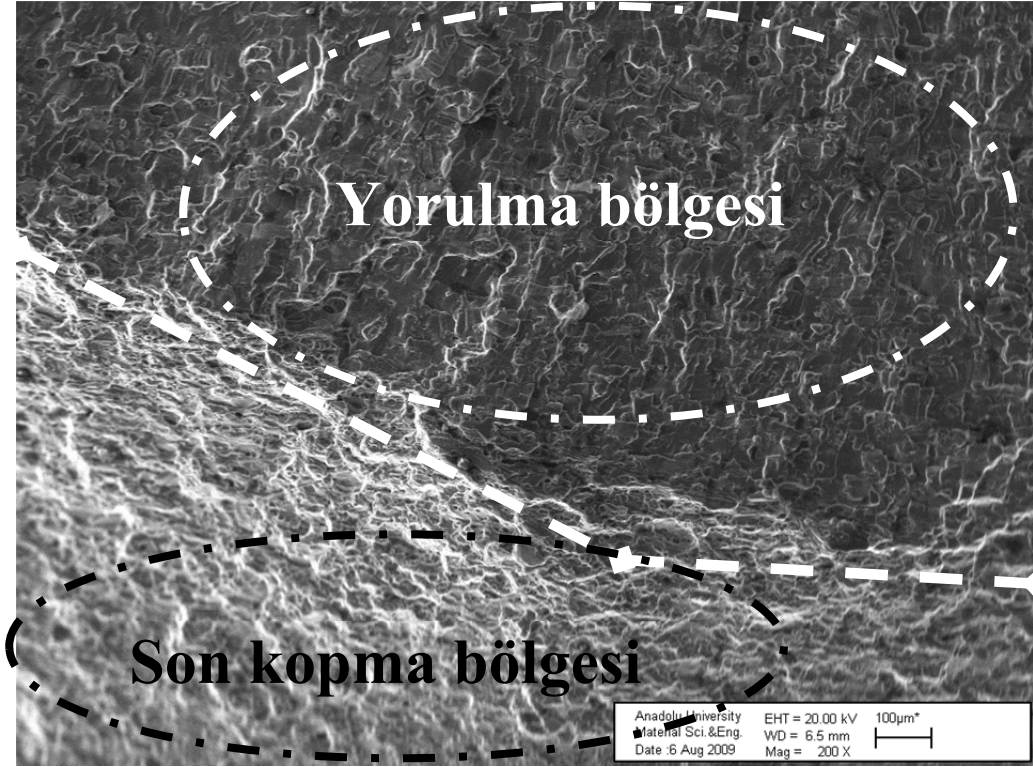
Şekil 6.18. Köşelerde meydana gelen çatlak başlangıcı ve çatlağın ilerleme doğrultusu

Şekil 6.19 incelendiğinde yorulmanın ilerlediği düzlemin gerilme eksenine dik ve sünek son kopma bölgesinin de aynı eksene yaklaşık 45°'lik açıyla konumlandığı görülmektedir. Çekme gerilmesi altındaki sünek metallerde beklenen kırılma düzlemi de gerilme eksenine 45°'dir. Şekil 6.19'de oluşan çatlak cephesinin dairesel formda ilerlediği görülmektedir.

Şekil 6.20'de yorulma ve son kopma bölgeleri arasındaki sınır daha ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.

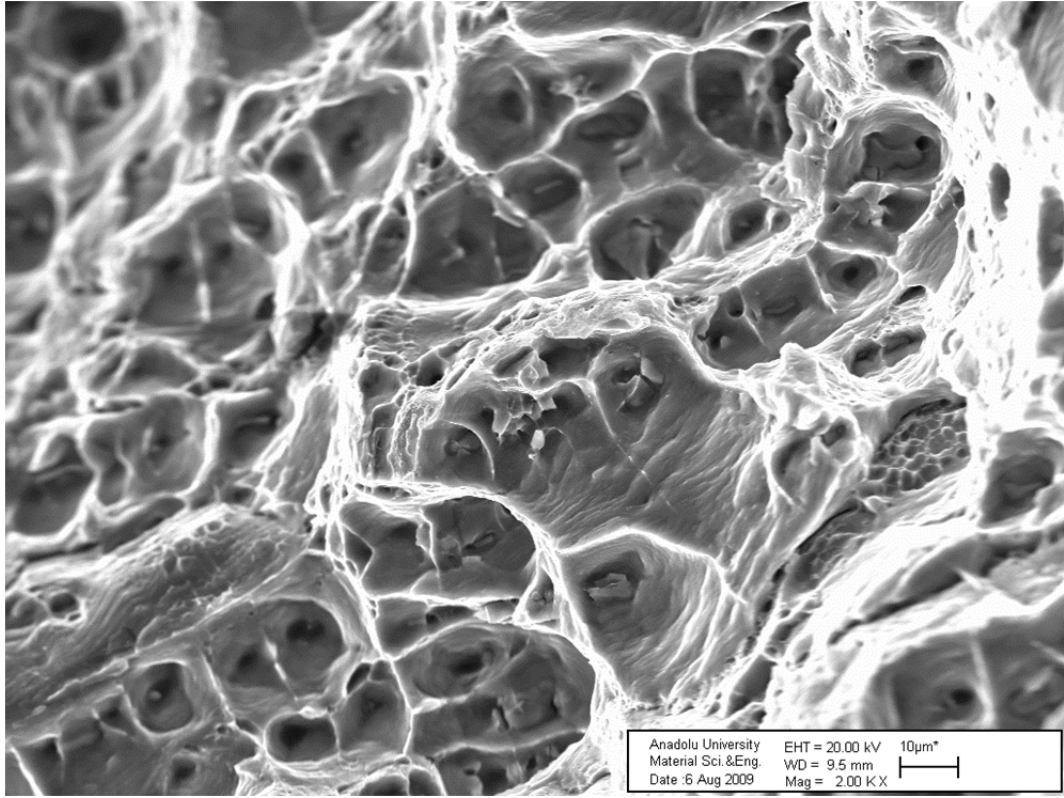


Şekil 6.19. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin köşelerde meydana gelmesi



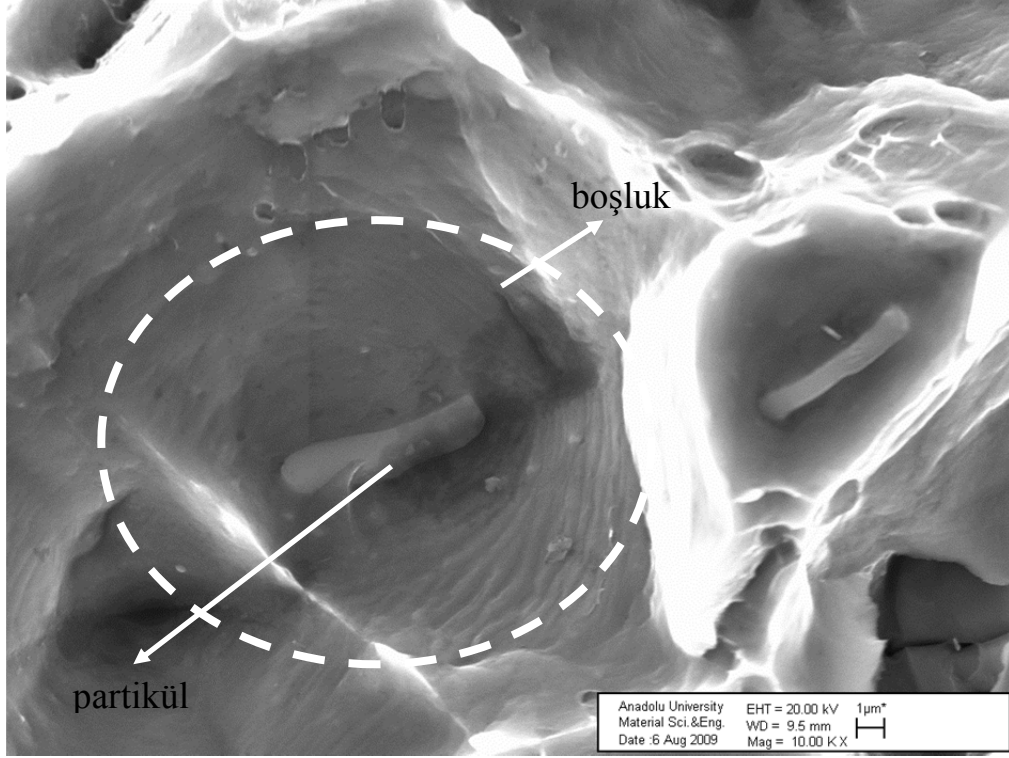
Şekil 6.20. Son kopma ve yorulma bölgelerinin gösterimi

Yorulmanın yaklaşık eşit aralıklarla ilerlemesi malzemenin homojen mukavemete sahip bir mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda yorulma adımlarının belirgin şekilde görülebilir olması alüminyum malzemenin sünek davranış göstermesinin bir sonucudur. Son kopma bölgeleri incelendiğinde kırılmaların ağırlıklı olarak eş eksenli derin çukurcuklar (equiaxed dimples) içermesi malzemenin yukarıda değinilen sünek davranışını destekler niteliktedir. Yine aynı bölgede bazı çukurcukların merkezlerinde görülen parçacıklar alaşımın içinde yer alan ve malzemeye mukavemet kazandıran sert fazlardır. Sünek kırılma esnasında bu fazlar boşluk merkezleri olarak görev almıştır (Şekil 6.21).

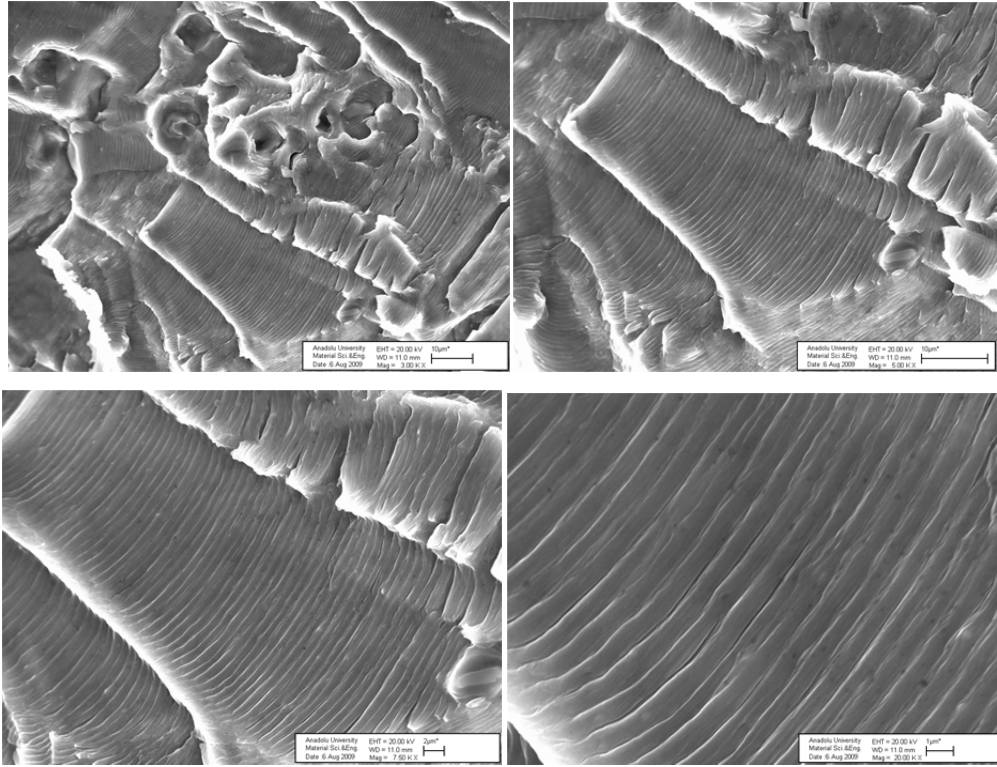


Şekil 6.21. Sünek kırılma gösteren numunenin gösterimi

Yapı içinde oluşan boşluklar ve partiküller Şekil 6.22’de gösterilmektedir. Şekil 6.23’de ise aynı noktadan farklı büyütme oranları alınarak, yorulma adımları belirgin şekilde gösterilmektedir.



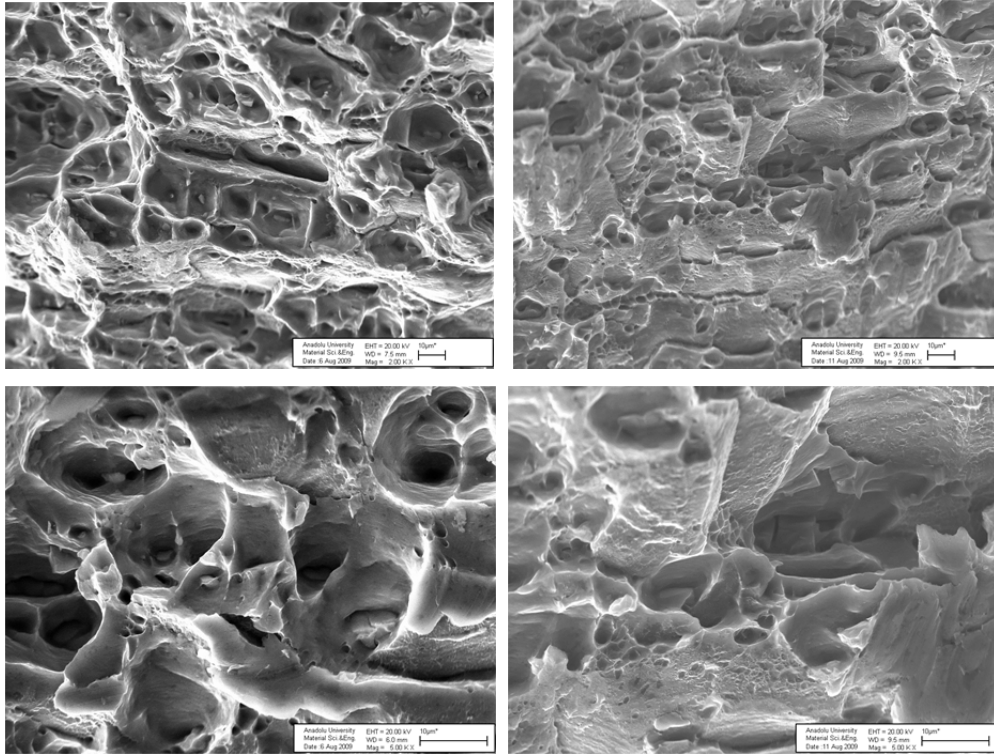
Şekil 6.22. Yapı içinde oluşan boşluklar ve partiküllerin gösterimi



Şekil 6.23. Yorulma adımlarının belirgin şekilde görülmesi

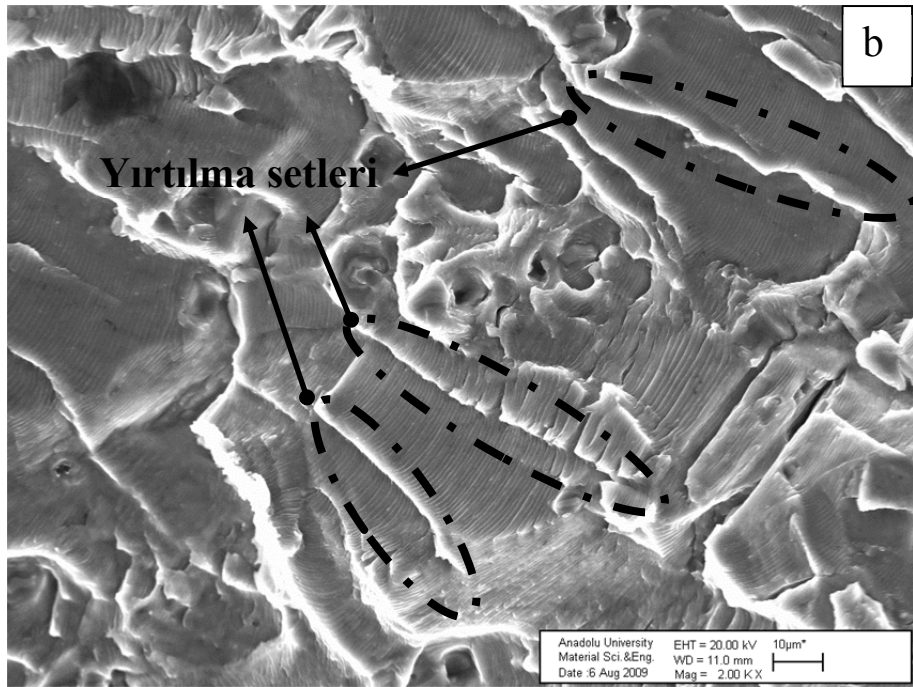
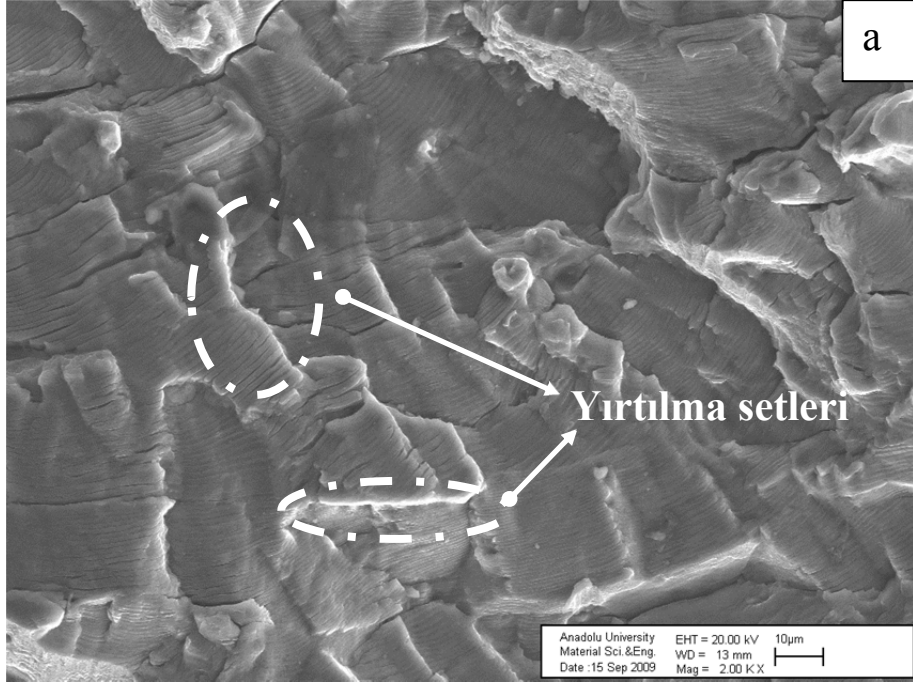
Tüm kırılma görüntüleri çukurlu kırılma yüzeylerini göstermektedir ve bu da FSW süreciyle ilişkili olan mikroyapısal değişikliklere rağmen, tüm bölgelerde sünek tane içi kırılmanın hakim olduğunu göstermektedir. Sünek tane içi kırılma esnasında, boşlukların birleştiği anda kırılmanın oluşumuyla birlikte, boşluklar iri (kaba) taneli metallere arası partiküllerde oluşurlar. Sünek tane içi kırılmayla ilgili önemli parametreler; metallere arası partiküllerin büyüklüğü, uzaklığı ve hacimsel oranlarıdır. Bu boşlukların büyümesi ayrıca, FSW prosesinin neden olduğu sertlik değişikliklerinden etkilenen malzemenin plastik deformasyonu sağlayabilme yeteneğinden de etkilenecektir.

Sünek malzemelerin çekme yüklemesi altında kırılması esnasında gözenekler genelde boyun vermeden önce oluşur. Bununla birlikte eğer boyun verme göreceli daha erken safhalarda oluşursa, gözenek oluşumu daha belirgin olup bunun sonucunda daha iri ve uzamış çukurcuklar görülecektir. Boyun vermenin bu şekilde erken safhalarda oluşması malzemede sünekliğin bir ölçüsü olduğundan daha iri belirgin çukurcuklar içeren kırılma yüzeyleri malzemenin daha sünek olduğunu göstermektedir.



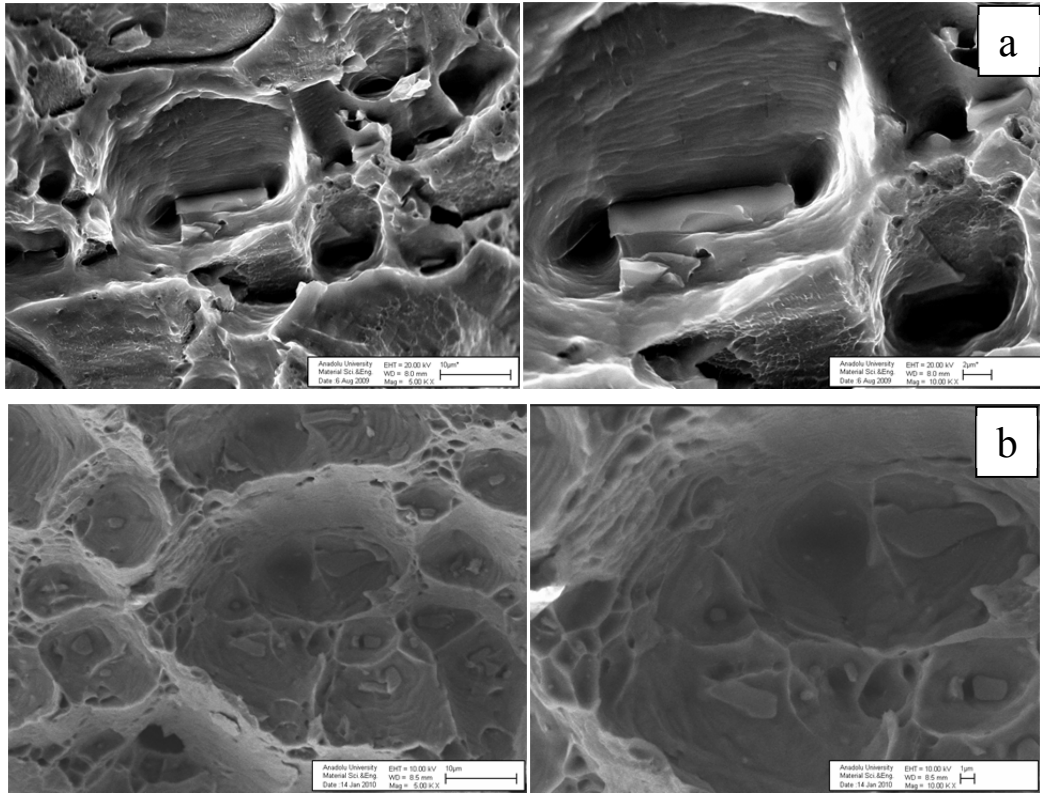
Şekil 6.24. İri belirgin çukurcukların gösterimi

Şekil 6.25.a ve Şekil 6.25.b görüntülerinde ana çatlak ilerleme yönü aynı olmakla birlikte küçük açisal farklılıklarla ilerleyen çok sayıda yorulma çatlağının birleşmesiyle oluşan yırtılma setleri (tear ridge pathern) görülmektedir.



Şekil 6.25. (a)(b) Yırtılma setleri gösterimi

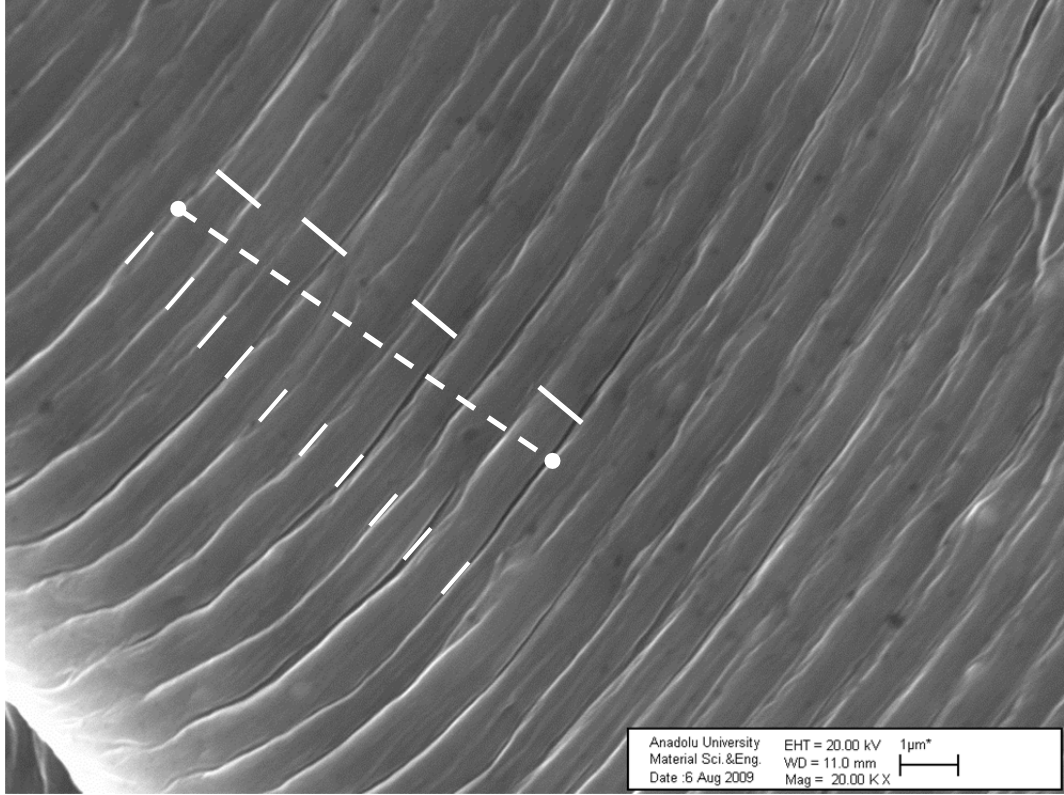
Kaynak yapılmış ve tekrardan ısıl işlem uygulanmış iki numunenin yaklaşık aynı bölgelerinden ve aynı büyütme oranında Şekil 6.26.a ve Şekil 6.26.b görüntüleri alınmıştır. Kaynak yapılmış malzemede çukurlar derin ve büyük, tekrardan ısıl işlem yapılmış malzemede ise çukurlar küçük ve sıgıdır (derin değildir). Dolayısıyla ilk malzememiz sünek ve düşük sertlikte, diğeri ise ilkinin göre gevrek ve yüksek sertliktedir.



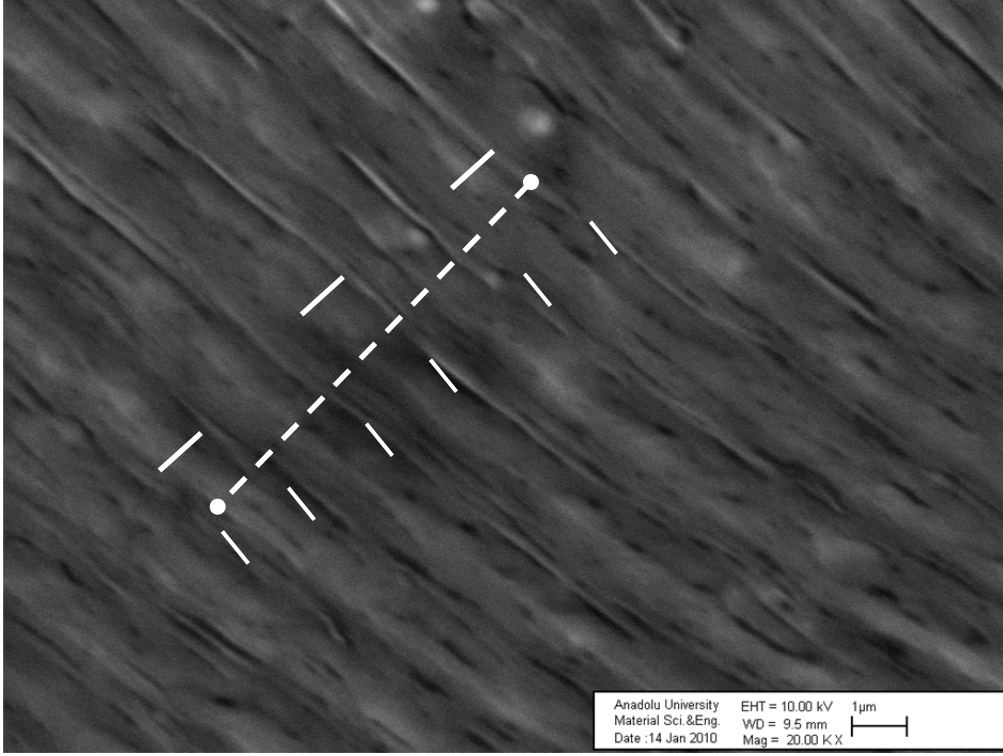
**Şekil 6.26. (a)** Kaynaklı malzemede çukurların gösterimi, **(b)** tekrar ısıl işlem uygulanmış malzemede çukurların gösterimi

Yorulma adımları yorulma çatlak ilerlemesi hakkında fikir verir. Yorulma adımları kullanılarak çatlak ilerleme yönü ve çatlak ilerleme hızı hakkında bilgi edinilir. Aynı büyütmelerde ve kırılma yüzeylerinin yaklaşık aynı noktalarından kaynaklı malzeme (Şekil 6.27), tekrar ısıl işlem uygulanmış kaynaklı malzeme (Şekil 6.28) ve ana malzeme (Şekil 6.29) için yorulma adımı sayımı (striation count) yapılmıştır. Ayrıca FSW de yorulma adımları eşit aralıklı ve düzenli, tekrar

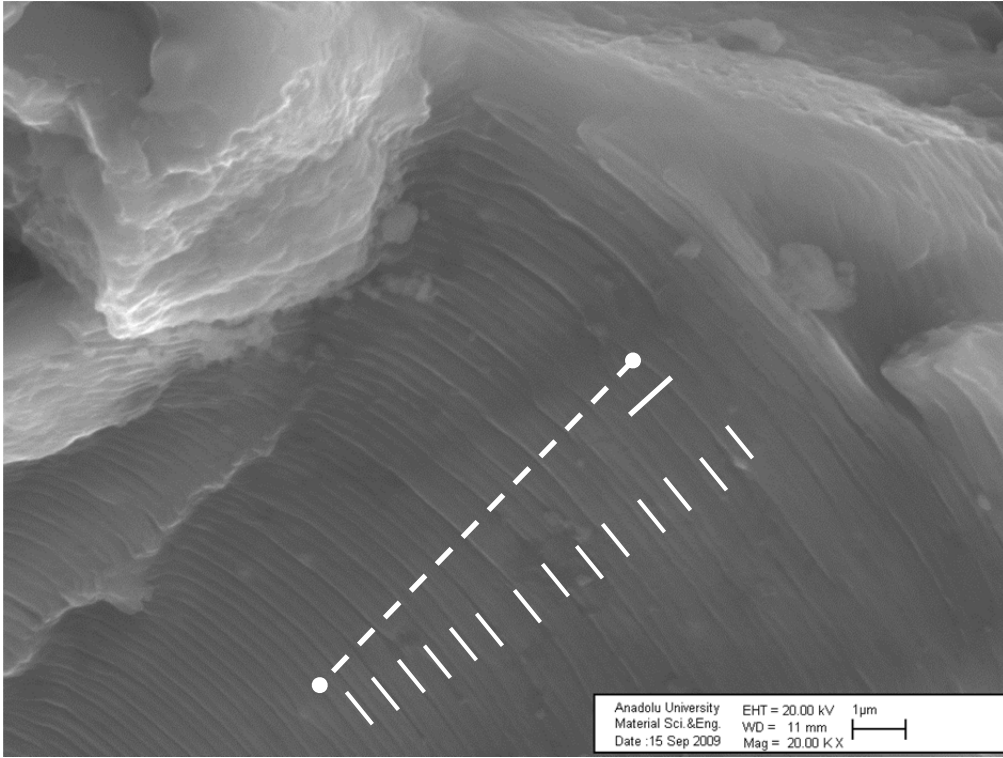
ıslıl işlem uygulanmış malzemede ise daha dűzensiz ve aralıkların eřit olmadığı gűzlenmiřtir. En geniş yorulma adımları tekrar ıslıl işlem yapılmış malzemede gűzlenmiřtir. FSW'li malzeme için yorulma adımı aralığı 1 $\mu$ m, ana malzeme için 0,7  $\mu$ m ve tekrar ıslıl işlem uygulanmış malzeme için 1,4  $\mu$ m'dur. Yorulma atlağı daha hızlı bir şekilde ilerlemiştir. Elde edilen sonuçlara gűre yorulma çatlağı hızı tekrar ıslıl işlem gűrműř numunede daha hızlı bir şekilde ilerlemiştir.



řekil 6.27. Kaynaklı malzemede yorulma adımlarının gűsterimi



Şekil 6.28. Tekrar ısıtıl işlem uygulanmış malzemedeki yorulma adımlarının gösterimi



Şekil 6.29. Ana malzemedeki yorulma adımlarının gösterimi

## 7. GENEL SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanmış 3,6 mm kalınlığındaki 6013-T6 alüminyum alaşımın mekanik özellikleri, sabit genlikli yük altındaki yorulma davranışları ve yorulma sonucu oluşan kırık yüzeylerin gösterdiği farklılıklar incelenmiştir. Isıl işlemin etkilerini görebilmek amacıyla bir grup kaynaklı numuneye ısıl işlem uygulanmıştır. Testler ve incelemeler sırasıyla ana malzeme, kaynaklı malzeme ve tekrar ısıl işlem görmüş malzemelere uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre kaynak işleminin hatasız ve verimli olması, sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin 6013 serisi alüminyum alaşımlarında başarı ile uygulanabileceğini göstermiştir. Kaynak işlemi esnasında uygun kaynak parametrelerinin seçilmesi, uygun uç-omuz aparatlarının kullanılması ve kaynak yapılacak levhaların frezeyle uygun şekilde bağlanması kaynak işleminin hatasız ve verimli olmasını sağlamıştır.

Kaynak işlemi sonrası numuneler freze ile çıkarıldıktan sonra, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması için zımpara ile yüzey işlemi uygulanması malzemelerin yorulma ömrünü arttırmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında oluşan soğan halkası izlerinin özellikle yorulma hasarı başlangıcı için çentik etkisi yaratmaları, uygun bir yüzey işleme tekniği kullanılarak azaltılabilmektedir [65,67].

Mekanik testlere geçmeden yapılan hasarsız kontrol yöntemleri kaynaklı yapının herhangi bir süreksizlik ya da hata içermediğini ortaya koymuştur. Fakat uygulanan testler tek başlarına yeterli güvenilirlik sağlamadıkları için farklı teknikler kullanılarak sonuçlar desteklenmiştir. Sırasıyla levhaya gözle kontrol, sıvı penetrant kontrol yöntemi, ultrasonik kontrol yöntemi, girdap akımları kontrol yöntemi ve iletkenlik testleri uygulanmıştır. Literatürde incelenilen çalışmalarda [41-43] FSW ile birleştirilen yapılarda özellikle ultrasonik kontrol yönteminin kullanıldığı gözlenmiştir.

Kaynaklı numunelerde kaynak bölgesinde ısıdan etkilenen bölgede sertlik dolayısıyla da mukavemet düşmektedir. Bu durum, mukavemet açısından

ısıdan etkilenmiş bölgenin çekme testlerinde en zayıf bölge olmasına neden olmuştur ve kopmalar bu bölgede oluşmuştur.

Yorulma deneyleri sonunda kaynaklı malzeme ve tekrar ısıl işlem uygulanmış malzemelerin ana malzeme kadar yorulma dayanımına sahip olmadıkları ortaya konmuştur.

Mikroyapı görüntülerinde sürtünme karıştırma kaynağında oluşan bölgeler; ana malzeme, ısıdan etkilenen bölge, termo-mekanik ısıdan etkilenen bölge ve kaynak merkezi olarak görülmektedir. Bölgelerde tane yönelmeleri, tane boyutları arasındaki farklar ortaya konulmuştur.

Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntülerde ana ve kaynaklı malzemelerde sünek kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Ön çentik açılmayan numunelerde çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin gerilmenin yüksek olduğu köşelerde meydana geldiği gösterilmiştir. Kırılma yüzeylerinde yorulma ve son kopma bölgeleri net olarak belirtilmiştir. Görüntülerde ayrıca yorulmanın ilerlediği düzlemin gerilme eksenine dik ve sünek son kopma bölgesinin de aynı eksene 45°'lik açıyla konumlandığı gösterilmiştir.

Isıdan etkilenmiş bölge (HAZ) sıcaklığa maruz kaldığı için, çökelti partiküllerinin büyümeye devam ettiği aşırı yaşlanma ya da kabalaşma gösterdiği gözlenmiştir. Bu büyüme partiküller arasındaki mesafenin artmasına bu nedenle de dislokasyonların bir engele çarpmadan daha fazla ilerlemesine dolayısıyla da mukavemet azalmasına sebep olmuştur. Kaynaklı malzemenin en zayıf ve en az sertliğe sahip bölgesidir. Uygulanılan çekme testlerinde kopma hep bu bölgede gerçekleşmiştir. İncelenilen daha önce yapılmış çalışmalarda da çekme test sonuçlarında aynı bölgede kopma olduğu görülmüştür [30,56,81,82].

Çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi, hareket edebilen dislokasyonların yolu üzerinde küçük ve sert partiküllerin oluşmasını sağlamaktadır. Çökelti partikülleri dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzeme mukavemetinin artmasını sağlar [56,70]. Çökeltme sertleştirilmesi ısıl işlemi uygulanmasıyla malzemenin sertlik ve mekanik dayanımında artma, sünekliğinde azalma olmuştur.

FSW ile birleştirilmiş malzemelerin, servis şartları altındaki hasar mekanizmaları tam olarak anlaşılırsa daha güvenilir ömür tahminleri yapılabilir. Bu sayede de FSW tekniğinin potansiyelinden daha fazla yararlanılabilir. Yeni nesil uçaklarda, FSW uçak tasarımının bir parçası olduğunda üreticiler güvenilir ömür belirlemeler sayesinde uçak malzeme ve performanslarını daha da geliştirebilirler. Daha ekonomik, daha hızlı ve daha hafif bir kaynak tekniği, oldukça çetin bir rekabetin yaşandığı havayolu taşımacılığı pazarındaki işletmelerin dikkatini çekecektir.

Uçak yapılarının, bileşenlerinin emniyetli ve mukavemetli olarak hizmet verebilmeleri, uygun birleştirme yöntemlerinin uygulanabilmesi ile mümkün olmaktadır. Gelişen uçak tasarım ve üretim teknolojileri, birleştirme prosedürlerinin de bu gelişime uyumlu olarak değişmesini gerektirmektedir. Uçak parçalarında FSW tekniğinin yaygın kullanım alanına sahip olabilmesi, kaynak teknolojilerindeki gelişmelerin izlenmesi ve uygulanması, bu nedenle büyük bir önem taşımaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı bu alanda uygulanması ile maliyet verimliliği de sağlanmaktadır. Ayrıca FSW tekniğinin uygulama sürelerini kısaltılması özelliği de üretici ve işletici firmalar tarafından vazgeçilemez bir gereksinimdir.

## KAYNAKÇA

- [1] Messler, R.W., *Joining of advanced materials*, Reed Publishing Inc., USA, 1993.
- [2] Lancaster, J.F., *Metallurgy of welding*, 4th Ed., Allen and Unwin, UK, 1987.
- [3] Brandon, D. ve Kaplan W.D., *Joining processes: an introduction*, John Willey and Sons, UK, 1997.
- [4] Hayes C., *The ABC's of nondestructive weld examination*, Welding Journal May 1997, The American Welding Society, USA, 1997.
- [5] Anık, S., Anık, E.S. ve Vural, M., *1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı cilt I*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1993.
- [6] Dalkılıç, S., *Jet motorlarında parça yenileme işlemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2001.
- [7] Kınıkoğlu, N.G., *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Ekim 2001, İstanbul.
- [8] Taban, E. ve Kaluç, E., "Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Standart Gösterimleri," *MakineTek*. P.178, İstanbul, Mart 2005.
- [9] Özarpa, C., *Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [10] Yurdakul, M., Özbay, O. ve İç, Y.T., "Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi," *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, **17**, No: 2, 1-23, 2002.
- [11] [http://www.mat.ethz.ch/news\\_events/archive/materialsday/matday01/pdf/TempusMD.pdf](http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/TempusMD.pdf), Ocak 2008.
- [12] Lloyd, D.J., "Aluminium alloys used in automotive skin sheet," *Advances in Industrial Materials*, The Metallurgical Society of CIM, 1998.
- [13] Miao, W.F. ve Laughlin, D.E., "A differential scanning calorimetry study of aluminium alloy 6111 with different pre-aging treatments," *Journal of Materials Science Letters*, **19**, 201-203, 2000.
- [14] Murayama, M. ve Hono, K., "Pre-precipitate clusters and precipitation processes in Al-Mg-Si alloys," *Acta Materials*, **47**, 1537-1548, 1999.

- [15] Chakrabati, D.J. ve Laughlin, D.E., “Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si alloys with Cu additions,” *Progress in Materials Science*, **49**, 389-410, 2004.
- [16] Prado, R.A, Murr, L.E., Shindo, D.J ve Soto, K.F, “Tool wear in the friction-stir welding of aluminium alloy 6016+20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: a preliminary study,” *Scripta Materialia*, **45**, 75-80, 2001.
- [17] Thomas, W.M., Norris, I. M., Smith, I.J. ve Staines, D.G., “Reversal stir welding-feasibility study,” *4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [18] Harris, D. ve Norman, A.F., “Properties of friction stir welded joints: a review of the literature,” Draft version, 2003.
- [19] Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P. ve Dawes C.J. (TWI), *Improvements relating to friction stir welding*, European Patent Specification EP0615480B1, 1992.
- [20] Threadgill P., *Friction stir welds in Aluminium alloy – preliminary microstructure assessment*, TWI Bulletin, TWI, Abington, UK, 1997.
- [21] Dr.Ing. Staniek G., Dr.Ing. Hillger W. ve Dr.Ing. Dalle Donne C., “Ultrasonic testing on friction stir welded aluminium alloys, Testing on friction stir welds,” 2003.
- [22] Christner, B., McCoury, J. ve Higgins, SÇ, “Development and testing of friction stir welding (FSW) as a joining method for primary aircraft structure,” *4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [23] Christner, B., Hansen, M., Skinner, M. ve Sylva, G., “Friction stir welding system development for thin-gauge aerospace structures,” *4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [24] Shepherd, G.E., “The evaluation of friction stir welded joints on Airbus aircraft wing structure,” *4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.

- [25] Lohwasser, D., “Friction stir welding of aerospace alloys,” *4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [26] Talwar, R., Lederich, R., Bolser, D. ve Garcia, A., “An innovative, low cost, friction stir welded cargo handling solution for the C-217 globemaster III for reducing manufacturing cost and logistics support,” *4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [27] Eclipse Aviation main page, Temmuz 2007.  
[http://www.eclipseaviation.com/eclipse\\_500/gallery/images.html](http://www.eclipseaviation.com/eclipse_500/gallery/images.html)
- [28] Rhodes, C.G., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.A. ve Bampton, C.C., “Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium,” *Scripta Materialia*, **36**, No:1, 69-751, 1997.
- [29] Liu, G., Murr, L.E., Niou, C.S., McClure, J.C. ve Vega, F.R., “Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminium,” *Scripta Materialia*, **37**, No: 3, 355-361, 1997.
- [30] Liu, H.J., et al., “Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 2017-T351 aluminium alloy,” *Journal of Materials Processing Technology*, **142**, No: 3, 692-696, 2003.
- [31] Dubourg, L. ve Dacheux, P., “Design and properties of FSW tools: a literature review,” Saint-Sauveur, Nr Montreal, Canada, 10-13 October 2006.
- [32] Thomas, W.M., Johnson, K.I. ve Wiesner, C.S., “Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies,” *Advanced Engineering Materials*, **5**, No: 7, 485-490, 2003.
- [33] Schmidt, H.N.B., Dickerson, T.L. ve Hattel, J.H., “Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3,” *Acta Materialia*, **54**, 1199-1209, 2006.
- [34] Schneider, J.A. ve Nunes, Jr. A.C., “Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, **35B**, 777-783, 2004.
- [35] Heurtier, P., Desrayaud, C. ve Montheillet, F., *Materials Science Forum*, **396-402**, 1537-1542, 2002.

- [36] Heurtier, P., Jones, M.J., Desrayaud, C., Driver, J.H., Montheillet, F. ve Allehaux, D., *Journal of Materials Processing Technology*, **171**, 348-357, 2006.
- [37] Elangovan, K. ve Balasubramanian, V., “Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy,” *Materials and Design*, In Press, Corrected Proof, 2007.
- [38] Burford, D.A., Tweedy, B.M. ve Widener, C.A., “Influence of shoulder configuration and geometric features on FSW track properties,” *6th International Symposium on Friction Stir Welding*, Saint-Sauveur, Nr Montréal, Canada, October 10-13, 2006.
- [39] Hatsukade, Y., Takahashi, T., Yasui, T., Tsubaki, M., Fukumono, M. ve Tanaka, S., “Study on non-destructive inspection using HTS-SQUID for friction stir welding between dissimilar metals,” *Physica C: Superconductivity*, 2007.
- [40] Leal, R.M. ve Loureiro, A., “Effect of overlapping friction stir welding passes in the quality of welds of aluminium alloys,” *Materials & Design*, 2007.
- [41] Zhou, C., Xinqi Y. ve Luan G., “Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminium alloys,” *Materials Science and Engineering A*, **418**, 155-160, 2006.
- [42] Dickerson, T.L. ve Przydatek, J., “Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws,” *International Journal of Fatigue*, 2003.
- [43] Rosado, L.S., Santos, T.G., Piedade, M., Ramos, P.M. ve Vilaça, P., “Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals,” *Measurement*, **43**, 1021-1030, 2010.
- [44] Suresh, S., *Fatigue of materials*, Cambridge University Press, New York, USA, 1991.
- [45] Kinikoğlu, N.G., *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, İstanbul, Literatür Yayınları, 290-294, Ekim 2001.

- [46] Czyryca, J.E., *Fatigue crack initiation*, Metals handbook Volume 8, 9th ed., Mechanical Testing (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA, 363-376, 1978.
- [47] Carlson, R.L. ve Kardomateas, G. A., *An introduction to fatigue in metals and composites*, Chapman and Hall, UK, 1996.
- [48] Kayali, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F., *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, Türkiye, 1984.
- [49] Tetik, D., *2024-T3 Alüminyum alaşımının simüle edilmiş uçuş yükleri altında yorulma davranışı*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 1999.
- [50] Schijve, J., *Fatigue crack growth under variable amplitude loading*, Metals Handbook Volume 19, Fatigue and Fracture, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, USA, 110-131, 1998.
- [51] Antolovich, S. D. ve Saxena, A., *Fatigue failures*, Metals Handbook; 9th edition Volume 11: Failure analysis and prevention, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA, 102-135, 1986.
- [52] Pascoe, K. J., *An introduction to the properties of engineering materials*, ELBS, UK, 1978.
- [53] Ellyin, F., *Fatigue damage, crack growth and life prediction*, Chapman & Hall, London, 1997.
- [54] Dieter, G. E., *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill Book Co., London, 1988.
- [55] Banantine, J. A. ve Comer, J. J., *Fundamentals of metal fatigue analysis*, Prentice-Hall Inc., USA, 1990.
- [56] Elangovan, K. ve V. Balasubramanian, “Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminium alloy joints,” *Materials Characterization*, **59**, No: 9: 1168-1177, 2008.
- [57] *Friction Stir Welding and Processing* (Ed: Mishra, R.S. ve Mahoney, M.W.), ASM International, 2007.
- [58] Jata, K., Mahoney, M.W., Mishra, R.S. ve Lienert, T.J., *Friction stir welding and processing III*, TMS publication, 2005.

- [59] Prater, T., *Friction stir welding of metal matrix composites: the joining of AL 6061/SiC/17.5p using diamond coated tools*, VDM, 2009.
- [60] Fersini, D. ve A. Pirondi, “Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminium alloy single-lap joint,” *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, No: 3-4, 790-803, 2008.
- [61] Ali, A., An, X., Rodopoulos, C.A., Brown, M.W., O’Hara, P., Levers, A. ve Gardiner, S, “The effect of controlled shot peening on the fatigue behaviour of 2024-T3 aluminium friction stir welds,” *International Journal of Fatigue*, **29**, 1531-1545, 2007.
- [62] Nielsen, K.L., “Ductile damage development in friction stir welded aluminium (AA2024) joints,” *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 2795-2811, 2008.
- [63] Scialpi, A., De Giorgi, M., De Filipis, L.A.C., Nobile, R. ve Panella, F.W., “Mechanical analysis of ultra-thin friction stir welding joined sheets with dissimilar and similar materials,” *Materials & Design*, **29**, 928-936, 2008.
- [64] Nishihara, T. ve Nagasaka, Y., “Development of micro FSW,” *5<sup>th</sup> International Friction Stir Welding Symposium*, Metz, Fransa, 14-16 September, 2004.
- [65] Braun, R., Biallas, G. Donne, C.D. ve Staniek, G., “Characterisation of mechanical properties and corrosion performance of friction stir welded AA6013 sheet,” *Materials for Transportation Industry EUROMAT’99*, **1**, (Ed: Winkler, P. ) 150-155, 2000.
- [66] Moreira, P.M.G.P, de Jesus, A.M.P., Riberio, A.S. ve de Castro, P.M.S.T., “Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082-T6 and 6061-T6 aluminium allays: a comparison,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **50**, 81-91, 2008.
- [67] Hatamleh, O., “A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA2195 joints,” *International Journal of Fatigue*, **31**, 974-988, 2009.
- [68] Pouget, G. ve Reynolds, A.P., “ Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds,” *International Journal of Fatigue*, **30**, 436-472, 2008.

- [69] Leal, R.M. ve A. Loureiro, “Effect of overlapping friction stir welding passes in the quality of welds of aluminium alloys,” *Materials and Design*, **29**, No: 5, 982-991, 2008.
- [70] Ericsson, M ve Sandström, R., “ Fatigue of friction stir welded AlMgSi-Alloy 6082,” *Materials Science Forum*, **331-337**, 1787-1792, 2000.
- [71] Borrego, L.P., Costa, J.M., Silva, S. ve Ferreira, J.M., “Microstructure dependent fatigue crack growth in aged hardened aluminium alloys,” *International Journal of Fatigue*, **26**, 1321-1331, 2004.
- [72] Borrego, L.P., Costa, J.M., Silva, S. ve Ferreira, J.M., “Fatigue crack growth in thin aluminium alloy sheets under loading sequences with periodic overloads,” *Thin-Walled Structures*, **43**, 772-788, 2005.
- [73] Moreira, P.M.G.P, Figueiredo, M.A.V. ve de Castro, P.M.S.T., “Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **48**, 169-177, 2007.
- [74] Moreira, P.M.G.P, de Oliveira, F.M.F. ve de Castro, P.M.S.T., “Fatigue behaviour of notched specimens of friction stir welded aluminium alloy 6063-T6,” *Journal of Materials Processing Technology*, **207**, 283-292, 2008.
- [75] Lin, P.C., Pan, J. ve Pan, T. “Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets Part 1: welds made by a concave tool,” *International Journal of Fatigue*, **30**, 74-89, 2008.
- [76] Newman, J.A. ve Dowling N.E., “A crack growth approach to life prediction of spot-welded lap joints,” *Fatigue Eng. Mater Struct*, **21**, 1123-1132, 1998.
- [77] Wang D.A., Lin, P.C. ve Pan, J., “Geometric functions of stress intensity factor solutions for spot welds in lap-shear specimens,” *Int. J. Solids Struct*, **42**, 6299-6318, 2005.
- [78] Wang, D.A. ve Pan, J., “A computational study of local stress intensity factor solutions for kinked cracks near spot welds in lap-shear specimens,” *Int. J. Solids Struct*, **42**, 6277-6298, 2005.

- [79] Rodrigues, D.M., Loureiro, A., Leitaó, C., Leal, R.M., Chaparro, B.M. ve Vilaça, P., “Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds,” *Materials and Design*, 2008.
- [80] Tesch, A., Pippan, R., Trautmann, K.H. ve Döker, H., “Short cracks initiated in Al6013-T6 with the focused ion beam (FIB)-technology,” *International Journal of Fatigue*, **29**, 1803-1811, 2007.
- [81] Derry, C.G. ve Robson, J.D., “Characterization and modelling of toughness in 6013-T6 aerospace aluminium alloy friction stir welds,” *Materials Science and Engineering*, **A490**, 328-334, 2008.
- [82] Heinz, B. ve Skrotzki, B., “Characterization of a friction-stir-welded aluminium alloy 6013,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, **33B**, 489-498, 2002.
- [83] Troeger, L.P. ve Starke, Jr. E.A., “Microstructural and mechanical characterization of a superplastic 6xxx aluminium alloy,” *Materials Science and Engineering*, **A277**, 102-113, 2000.
- [84] Uzun, H., Donne, C.D., Argagnotto, A., Ghidini T. ve Gambaro, C., “Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel,” *Materials and Design*, **26**, 41-46, 2005.
- [85] Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, Benedictus, R. ve Miller, W.S., “Recent development in an aluminium alloys for aerospace applications,” *Materials Science and Engineering*, **A280**, 102-107, 2000.
- [86] John, R., Jata, K.V. ve Sadananda, K., “Residual stress effect on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys,” *International Journal of Fatigue*, **25**, 939-948, 2003.
- [87] Hassan, Kh.,A.A., Norman, A.F., Price, D.A. ve Prangnell, P.B., “Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment,” *Acta Materials*, **51**, 1923-1936, 2003.
- [88] Lomolino, S., Tovo, R. ve dos Santos, J., “On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys,” *International Journal of Fatigue*, **27**, 305-316, 2005.

- [89] Pirondi, A., Collini, L. ve Fersini, D., “Fracture and fatigue crack growth behaviour of PMMC friction stir welded butt joints,” *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 4333-4342, 2008.
- [90] Pirondi, A. ve Collini, L., “Analysis of crack propagation resistance of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate-reinforced composite friction stir welded butt joints,” *International Journal of Fatigue*, **31**, 111-121, 2009.
- [91] Donne, C.D., Biallas, G., Ghidini, T. ve Raimbeaux, G., “Effect of weld imperfections and residual stresses on the fatigue crack propagation in friction stir welded joints,” *2nd International Conference on Friction Stir Welding*, Gothenburg, 26-28 June 2000.
- [92] Fersini, D. ve Pirondi A., “Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints,” *Engineering Fracture Mechanics*, **74**, 468-480, 2007.
- [93] Kermanidis, Al.Th., Petroyiannis, P.V. ve Pantelakis, Sp.G., “Fatigue and damage tolerance behaviour of corroded 2024 T351 aircraft aluminium alloy,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **43**, 121-132, 2005.
- [94] Ali, A., Brown, M.W. ve Rodopoulos, C.A., “Modelling of crack coalescence in 2024-T351 Al alloy friction stir welded joints,” *International Journal of Fatigue*, **30**, 2030-2043, 2008.
- [95] Nanninga, N., White, C., Furu, T., Anderson, O. ve Dickson, R., “Effect of orientation and extrusion welds on the fatigue life of an Al-Mg-Si-Mn alloy,” *International Journal of Fatigue*, **30**, 1569-1578, 2008.
- [96] Varlı, A.E. ve Gürbüz, R., “Fatigue crack growth behaviour of 6013 aluminium alloy at different ageing conditions in two orientations,” *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, **30**, 381-386, 2006.
- [97] Cabibbo, M., McQueen, H.J., Evangelista, E, Spigarelli, S., Di Paola, M. ve Falchero, A., “Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate,” *Materials Science and Engineering A*, **460-461**, 86-94, 2007.
- [98] Munse, W.H., *Fatigue of weldments-tests, design and service*, In: *Fatigue testing of weldments*, (Ed: Hoepfner, D.W.), ASTM Spec Tech Publ., 89-112, 1978.

- [99] Fratini, L. ve Zuccarello, B., “An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints,” *Int. J. Mach. Tool Manu.*, **46**, 611-619, 2006.
- [100] Braun, R., “Investigations on the long-term stability of 6013-T6 sheet,” *Materials Characterization*, **56**, 85-95, 2006.
- [101] Buha, J., Lumley, R.N. ve Crosky, A.G., “Microstructural development and mechanical properties of interrupted aged Al-Mg-Si-Cu alloy,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, **37A**, 3119-3130, 2006.
- [102] Carbonini, P., Monetta, T., Mitton, D.B., Belluci, F., Mastronardi, P. ve Scatteia, B. “Degradation behaviour of 6013-T6, 2024-T3 alloys and pure aluminium in different aqueous media,” *Journal of Applied Electrochemistry*, **27**, 1135-1142, 1997.
- [103] Braun, R., Donne, C.D. ve Staniek, G., “Laser beam welding and friction stir welding of 6013-T6 aluminium alloy sheet,” *Mat.-wiss u. Werkstofftech*, **31**, 1017-1026, 2000.
- [104] Kermanidis, Al.Th., Stamatelos, D.G., Labeas, G.N. ve Pantelakis, Sp.G., “Tensile behaviour of corroded and hydrogen embrittled 2024 T351 aluminium alloy specimen,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **45**, 148-158, 2006.
- [105] Shahri, M.M. ve Snadström, R., “Fatigue analysis of friction stir welded aluminium profile using critical distance,” *International Journal of Fatigue*, **32**, 302-309, 2010.
- [106] Cao, X. Ve Jahazi, M., “Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy,” *Materials and Design*, **32**, 1-11, 2011.
- [107] Hangai, Y., Utsunomiya, T. Ve Hasegawa, M., “Effect of tool rotating rate on foaming properties of porous aluminium fabricated by using friction stir processing,” *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 288-292, 2010.
- [108] Jana, S., Mishra, R.S., Baumann, J.A. ve Grant, G., “Effect of process parameters on abnormal grain growth during friction stir processing of a cast Al alloy,” *Materials Science and Engineering A*, **528**, 189-199, 2010.

- [109]Taban, E., Gould, J.E. ve Lippold J.C., “Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminium and AISI 1018 steel: properties and microstructural characterization,” *Materials and Design*, **31**, 2305-2311, 2010.
- [110]Lakshminarayanan, A.K. ve Balasubramanian, V., “An assessment of microstructure, hardness, tensile and impact strength of friction stir welded ferritic stainless steel joints,” *Materials and Design*, **31**, 4592-4600, 2010.
- [111]Malafaia, A.M.S., Milan, M.T., Oliveira, M.F. ve Spinelli, D., “Fatigue behaviour of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy,” *Procedia Engineering*, **2**, 1815-1821, 2010.
- [112]Padmanaban, G. ve Balasubramanian, V., “Fatigue performance of pulsed currents gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints,” *Materials and Design*, **31**, 3724-3732, 2010.
- [113]Robson, J.D., Cui, S. ve Chen, Z.W., “Incipient melting during friction stir processing of AZ91 magnesium castings,” *Materials Science and Engineering A*, **527**, 7299-7304, 2010.
- [114]Ataoglu, H., *Sürtünme karıştırma kaynaklı aluminium alaşımlarının iç yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 2002.
- [115]Özdemir, M., *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile aluminium malzemelerin kaynaklanabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [116]Eren, T., *AA6063-T6 borularının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2005.
- [117]Bilal, A., *AA2024-T3 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [118]Doğan, S., *AA5754-H22 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.

- [119]Dilek, M., *Mechanical properties of different aluminum alloys joined by friction stir welding*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
- [120]Serindağ, H.T., *Pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı ve mekanik özelliklerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 2006.
- [121]Şelale, S., *Polietilen malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006.
- [122]Özkan, S., *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda haddeme (burnishing) ile yüzeylerin işlenmesi, haddemenin yüzey pürüzlülüğü ve sertleşmeye etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [123]Malta, D., *Alüminyum alaşımı ve pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle bindirme kaynağı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 2006.
- [124]Bozu, M., *Sürtünme karıştırma kaynağında farklı kaynak parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [125]Güçlüer, S., *Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı yapılmış Al-5086 H32 levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 2007.
- [126]Çakır, M., *Toz metal alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [127]Sayer, S., *AA 6063 (AlMgSi0.5) tipi alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenlerinin, bağlantının dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007.

- [128]Tanrıöver, L., *AA5052/2024 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
- [129]Kaptan, K., *Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirmelerinde farklı karıştırıcı uç formlarının birleştirme kalitesine etkilerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [130]Aydın, H., *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve korozyon davranışlarının incelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2008.
- [131]Öcalır, Ş., *Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum alaşımı birleştirmelerde optimum parametrelerin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2009.
- [132]Kafalı, H., *AA 2024 Al alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) kaynak parametrelerinin birleşmeye etkilerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [133]Bulut, R., *Magnezyum AZ31 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2009
- [134]Kahraman, B., *Otomotiv endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımı sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi*, Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009.
- [135]Coşkun, M.H., *Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF7114 ve DP600 çelik sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009.
- [136]Ağca, E., *Doğrusal olmayan takım yoluyla alüminyum alaşımlı sac malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi ve kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin irdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.

- [137] Yıldıırım, M.T., *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 3000 serisi alüminyum alaşımların yorulma davranışının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2010.
- [138] Guo, X., *A study of friction stir welding on 6061-T6 aluminum alloy*, Master of Science Thesis, The University of Texas, El Paso, 1999.
- [139] Leathers, J.W., *Analysis of friction stir welded 6061 aluminum using an X-ray microbeam Laue technique*, Master of Science Thesis, The University of Texas, El Paso, 2005.
- [140] Akula, D.R., *Characterization of mechanical properties and study of microstructures of friction stir welded joints fabricated from similar and dissimilar alloys of aluminum*, Master Of Science Thesis, University of Missouri, Columbia, 2007.
- [141] Davis, W.C., *Deformation effects related to pin-tool geometry during friction-stir welding of aluminum alloy 6061*, Master of Science Thesis, The University of Texas, El Paso, 2005.
- [142] Hatamleh, O., *Effects of laser and shot peening on friction stir welding*, PhD. Thesis, University of South Carolina, 2006.
- [143] Widener, C.A., *Evaluation of post-weld heat treatments for corrosion protection in friction stir welded 2024 and 7075 aluminum alloys*, PhD. Thesis, Wichita State University, 2005.
- [144] Lin, P.C., *Failure mode, fracture and fatigue analyses of resistance spot welds and spot friction welds*, PhD. Thesis, The university of Michigan, 2006.
- [145] Shukla, A.K., *Friction stir welding of thin-sheet, age-hardenable aluminium alloys: a study of process/structure/property relationships*, PhD. Thesis, Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 2007.
- [146] Edwards, P.D., *Friction stir welding of Ti-6Al-4V sheet and plate for aerospace structures*, PhD. Thesis, University of Washington, 2010.
- [147] Yalavartthy, H., *Friction stir welding process and material microstructure evolution modeling in 2000 and 5000 series of aluminum alloy*, Master of Science Thesis, Clemson University, 2009.

- [148]Khaled, T., *An outsider looks at friction stir welding*, Report, No: ANM-112N-05-06, 2005.
- [149]Gerlich, A.P., *Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of aluminium alloys*, PhD. Thesis, University of Toronto, 2007.
- [150]Liechty, B.C., *Material flow behavior in friction stir welding*, PhD. Thesis, Brigham Young University, 2008.
- [151]Avila, R.E., *Measurement and analysis of applied power, forces and material response in friction stir welding of aluminum alloy 6061*, PhD. Thesis, The University of Texas, El Paso, 2006.
- [152]Cahrit, I., *Microstructural and superplastic characteristics of friction stir processed aluminum alloys*, PhD. Thesis, University of Missouri, 2004.
- [153]Ke Chen, B.E., *The origin of coarse grain structure in friction-stir welded AA5083 after heat treatment*, PhD. Thesis, Ohio State University, 2009.
- [154]Soundararajan, V., *Thermo-mechanical and microstructural issues in joining similar and dissimilar metals by friction stir welding*, PhD. Thesis, Southern Methodist University, 2006.
- [155]Wade, M., *Weld parameter and post weld heat treatment effects on 6xxx series friction stir weld properties*, Master of Science Thesis, University of South Carolina, 2009.