
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA TAKIM KAYNAK HIZI PARAMETRELERİNİN VE OMUZ TASARIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ALÜMİNYUM 6061 T6 ÖZELLİĞİNDEKİ MALZEME İÇİN İNCELENMESİ

Tolga ARIBAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tolga ARIBAL

05/04/2023

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA TAKIM KAYNAK HIZI PARAMETRELERİNİN VE OMUZ TASARIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ALÜMİNYUM 6061 T6 ÖZELLİĞİNDEKİ MALZEME İÇİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Tolga ARIBAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

ÖZET

Kaynak işlemine etki edebilecek parametrelerin anlaşılması kaynak işleminin iyileştirilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında 5 mm kalınlığına sahip alüminyum 6061-T6 alaşımı plakalar alın kaynağı konfigürasyonunda kaynaklanmıştır. Kaynak işlemi için AISI 4140 çelik malzemeden üretilmiş takımlar kullanılmıştır. Kullanılan takımlar birbirlerinden omuz ucu yüzeyi tasarımıyla ayrışmaktadır. Deneyin birinci bölümünde 800, 1200, 1400, 1600 dev/dk olmak üzere dört farklı takım dönme hızı ve 60, 90 mm/dk olmak üzere iki farklı takım ilerleme hızı düz omuz ucu yüzeyine sahip takımla kullanılarak çalışılmıştır. Deneyin ikinci bölümünde 800 dev/dk dönme hızında 40 mm/dk ilerleme hızıyla düz, dairesel çıkıntılı ve dairesel girintili omuz yüzeyi ucuna sahip takımlarla kaynaklanmıştır. Kaynaklanan plakalardan numuneler çıkarılarak çekme deneyleri ve mikroyapı analizleri yapılarak kaynak parametrelerinin sürtünme karıştırma kaynağında çekme mukavemetine etkisi incelenmiştir. Düz omuz ucu yüzeyine sahip takımla yapılan deneylerde artan dönme ve azalan ilerleme hızlarında çekme mukavemetinde azalış görülmüştür. En yüksek mukavemet 90 mm/dk ilerleme hızında 800 ve 1200 dev/dk dönme hızlarında 183 MPa olarak tespit edilmiştir. Takım omuz ucu yüzeylerinin değerlendirildiği deneylerde ise sabit 40 mm/dk ilerleme ve 800 dev/dk dönme hızı parametrelerinde en yüksek mukavemet dairesel çıkıntılı omuz tasarımı ile 190 MPa olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Sürtünme karıştırma kaynağı, Al6061-T6, kaynaklı birleşimler, çekme mukavemeti
Sayfa Adedi	:	101
Danışman	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

INVESTIGATION OF TOOL WELDING SPEED PARAMETERS AND SHOULDER DESIGN ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM 6061 T6 MATERIAL IN FRICTION STIR WELDING

(M. Sc. Thesis)

Tolga ARIBAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

ABSTRACT

Understanding the parameters which affect the welding is significant in improving the process. In the scope of this thesis work, 5 mm thick aluminum 6061-T6 alloy plates were joined in butt welding conditions. For the welding process, tools manufactured from AISI 4140 steel were used. Tools differentiate from each other with the design of shoulder end surface designs. In the first part of the experiment, four different tool rotational speeds 800, 1200, 1400 and 1600 rpm and two different traverse speeds 60 and 90 mm/min were used with a flat shoulder end surface tool. In the second part of the experiment, flat, raised circular and recessed circular shoulder end surface tool designs were used in 800 RPM rotational speed and 40 mm/min traverse speed condition. Samples from the welded plates were extracted to conduct tensile testing and microstructural analysis to investigate the effects of the welding parameters on tensile strength in the friction stir welding process. The experiment conducted with a flat shoulder end surface tool concluded that increasing rotation speed and decreasing traverse speed decrease tensile strength. Maximum tensile strength with flat shoulder end tool was obtained as 183 MPa with 90 mm/min traverse speed using 800 and 1200 RPM. In the experiment to evaluate the effect of tool shoulder designs, the highest strength was obtained with raised circular shoulder end surface tool as 190 MPa using a constant 40 mm/min traverse speed and 800 rpm rotation speed.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Friction stir welding, Al6061-T6, welded joints, tensile stress
Page Number	:	101
Supervisor	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını gerçekleştirirken görüş ve önerilerinden faydalandığım, her koşulda destekleyici tutum gösteren değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında önemli katkılarından dolayı değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hakan GÜRÜN'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalara verdiği destekten dolayı NEFATEK MAKİNE TEKNOLOJİLERİ şirketine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmaya verdiği destekten dolayı TUSAŞ Talaşlı İmalat Birimi Şefi Sayın Osman Murat BİRCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çaılşmaların gerçekleştirilmesindeki desteğinden dolayı Öğretim Görevlisi Sayın Duran KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her türlü konuda maddi ve manevi olarak yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI 7

2.1. Alüminyumun Genel Özellikleri 7

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması 8

2.2.1. Döküm alüminyum alaşımları 10

2.2.2. Dövme alüminyum alaşımları 10

2.3. Alüminyum Alaşımlarında Temper Gösterimi 11

2.4. 6000 Serisi Alüminyum-Magnezyum-Silisyum Alaşımları 13

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI 15

3.1. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Metalürjisi 16

3.2. Isıl İşlem Görebilen Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Metalürjisi 16

3.3. Isıl İşlem Görmeyen Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Metalürjisi 18

3.4. Alüminyum Alaşımlarında Yaygın Kullanılan Kaynak Yöntemleri 19

3.4.1. Oksi-asetilen kaynağı 19

3.4.2. TIG kaynağı 20

Sayfa

3.4.3. MIG kaynağı 21
3.4.4. Plazma ark kaynağı 22
3.4.5 Elektron ışın kaynağı 22
3.4.6. Lazer kaynağı 23
3.4.7. Elektrik ark kaynağı 24
3.4.8. Direnç kaynağı 25
3.4.9. Difüzyon kaynağı 25
3.4.10. Sürtünme kaynağı 26
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI 27
4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenleri 29
4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımı 30
4.2.1. Sürtünme karıştırma kaynağında takım omuzları 30
4.2.2. Sürtünme karıştırma kaynağında takım pimleri 32
4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mikro Yapısı 36
4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları 39
5. LİTERATÜR TARAMASI 45
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 55
6.1. Deney Öncesi İşlemler 55
6.2. Deneyin Gerçekleştirilmesi 58
6.3. Deney Sonrası İşlemler 62
7. DENEY SONUÇLARI 65
7.1. Görsel İnceleme 65
7.2. Kaynaklı Numunelerin Çekme Özellikleri 68
7.3. Makroyapı İncelemesi 79

Sayfa

7.4. Mikroyapı İncelemesi 81

7.5. Taramalı Elektron Mikroskopu İncelemesi 87

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 93

KAYNAKLAR 95

ÖZGEÇMİŞ 101

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Alüminyumun saflık değerine göre değişen fiziksel özellikleri 8

Çizelge 2.2. Alüminyumda mekanik ve fiziksel özelliklerin alaşım elementleriyle değişimi 9

Çizelge 2.3. Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri 13

Çizelge 2.4. Alüminyum 6061-T6 alaşımının sıcaklığa bağlı çekme özellikleri 14

Çizelge 6.1. Al6061-T6 kimyasal kompozisyonu 55

Çizelge 6.2. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu 56

Çizelge 7.1. Kaynaklı parçadan çıkarılan çekme numune boyutları 68

Çizelge 7.2. Dönme ve ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen çekme deneyi sonuçları 70

Çizelge 7.3. Lokasyona bağlı değişken magnezyum ve silisyum kompozisyonları 90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. a) Isıl etkilenmiş bölge, b) kabalaşan çökelti ve bazı sıvılaşmaların gösterimi 18

Şekil 3.2. Oksi-asetilen kaynağı şematik gösterimi 19

Şekil 3.3. TIG kaynağı şematik gösterimi 20

Şekil 3.4. MIG/MAG kaynağı şematik gösterimi 21

Şekil 3.5. Plazma ark kaynağı şematik gösterimi 22

Şekil 3.6. Elektron ışın kaynağı şematik gösterimi 23

Şekil 3.7. Lazer ışın cihazı şematik gösterimi 24

Şekil 3.8. Difüzyon kaynağı şematik gösterimi 26

Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi aşamaları 28

Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi 29

Şekil 4.3. Literatürde sık karşılaşılan takım omuz tasarımlarının şematik gösterimi 31

Şekil 4.4. Takım omuz alt yüzey tasarımlarına örnekler 32

Şekil 4.5. Literatürde karşılaşılan takım pim tasarımlarının şematik gösterimi 33

Şekil 4.6. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak uçlarına örnekler 34

Şekil 4.7. TWI da tasarlanan sürtünme karıştırma kaynağı takımları 35

Şekil 4.8. Isının tesiri altındaki bölgede tane sınırlarında toplanan çökeltiler 37

Şekil 4.9. TEB bölgesinde tanelerin uzayarak yönlenmesi 37

Şekil 4.10. SKK bölgeleri A) ITAB, B) TEB, C) DKB 38

Şekil 4.11. Al 6061-T6 tipik görüntüsü, 1) DKB, 2) TEB, 3) ITAB, 4) Ana Malzeme 39

Şekil 4.12. a) SKK makinesi, b) kaynak kafası, c) Triflute MX takımı, d) Triflat takımı 40

Şekil 4.13. SKK ile birleştirilen alüminyum ekstrüzyon paneller 41

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.14. Alüminyum gemi panellerinin birleştirilmesinde kullanılan SKK makinesi 41

Şekil 4.15. Sürtünme karıştırma kaynağının Eclipse 500 uçağında uygulaması 42

Şekil 4.16. Havacılıkta SKK kullanımı; türbin kanatları, birleştirmeler, roket yakıt tankı 42

Şekil 4.17. SKK alın ve bindirme kaynağı uygulamaları 43

Şekil 4.18. SKK boru kaynağı uygulaması şematik görüntüsü 43

Şekil 5.1. Dorbane vd. çalışmasında kaynak bölgelerinin optik mikroskop görüntüsü 47

Şekil 5.2. Çalışmadaki farklı ilerleme hızlarında mukavemet-uzamadaki değişim 48

Şekil 5.3. Çalışmadaki farklı dönme hızlarında mukavemet-uzamadaki değişim 48

Şekil 5.4. 1000 dev/dk da görüntüler; ilerleme hızı: a) 75 mm/dk, b) 100 mm/dk 49

Şekil 5.5. a) Ana malzeme, b) 100 mm/dk hızda DKB, c) 150 mm/dk hızda DKB 50

Şekil 5.6. Mugada ve Adepu çalışmalarında kullandıkları takım omuz tasarımları 53

Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan takımların ana boyutları 56

Şekil 6.2. Tasarlanan sürtünme karıştırma kaynağı takımları 57

Şekil 6.3. Başlangıç aşamasında düşünülen fikstür tasarımı 59

Şekil 6.4. SolidCAM programında deney parametlerinin girilmesi 61

Şekil 6.5. SolidCAM programında deneyin simülasyonu 62

Şekil 7.1. Çekme numunesi şematik gösterimi 68

Şekil 7.2. 90mm/dk-800dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (189,26 MPa) 71

Şekil 7.3. 90mm/dk-1400dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (155,36 MPa) 72

Şekil 7.4. 90mm/dk-1600dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (129,38 MPa) 73

Şekil 7.5. 60 mm/dk-800 dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (176,01 MPa) 74

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.6. 60mm/dk-1200dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (174,74 MPa) 75

Şekil 7.7. Düz omuza sahip takımla ölçülen sıcaklık değerleri 76

Şekil 7.8. Dairesel çıkıntılı omuza sahip takımla ölçülen sıcaklık değerleri 77

Şekil 7.9. Düz omuz ucu yüzeyi tasarımı gerilme-uzama grafiği (163,4 MPa) 78

Şekil 7.10. Dairesel girintili omuz ucu yüzeyi tasarımı gerilme-uzama grafiği (174,3 MPa) 78

Şekil 7.11. Dairesel çıkıntılı omuz ucu yüzeyi tasarımı gerilme-uzama grafiği (190,1 MPa) 78

Şekil 7.12. Kaynak merkezi enerji dağılımı spektrometresi sonuçları 91

Şekil 7.13. ITAB enerji dağılımı spektrometresi sonuçları 91

Şekil 7.14.Merkezden uzak bölge enerji dağılımı spektrometresi sonuçları 92

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 6.1. Deneylerde kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı takımları 56

Resim 6.2. Deney plakaların kenar temizleme işlemi 58

Resim 6.3. Sürtünme karıştırma kaynağı deneyinin gerçekleştirildiği cihaz 58

Resim 6.4. Sürtünme karıştırma kaynağı deneyleri sırasında kullanılan fikstürler 60

Resim 6.5. Deney öncesi testleri- Dönme hızı: 1600 dev/dk-
ilerleme hızı: 100 mm/dk 60

Resim 6.6. Sürtünme karıştırma kaynağı deneyi öncesi gerçekleştirilen
parametre kontrolü 61

Resim 6.7. Kaynaklı plakaların yüzey temizliği sonrası resimleri 62

Resim 6.8. Numunelerin çıkarılması için kullanılan su jeti tezgahı 63

Resim 7.1. 90 mm/dk ilerleme hızında 800-1600 dev/dk dönme hızlarının deneyi 65

Resim 7.2. 90 mm/dk ilerleme hızında 1200-1400 dev/dk dönme hızlarının deneyi 66

Resim 7.3. 60 mm/dk ilerleme hızında 800-1600 dev/dk dönme hızlarının deneyi 66

Resim 7.4. 60 mm/dk ilerleme hızında 1200-1400 dev/dk dönme hızlarının deneyi 67

Resim 7.5. Üst yüzey a) düz, b) dairesel çıkıntılı, c) dairesel girintili
omuz yüzeyli takım 67

Resim 7.6. Çekme deneylerinin gerçekleştirildiği cihaz 69

Resim 7.7. En yüksek mukavemet elde edilen numunelerin kopma yerleri 70

Resim 7.8. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında termal kamera ile sıcaklık takibi ... 76

Resim 7.9. 60 mm/dk – 800 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynağa ait
optik görüntü 79

Resim 7.10. 90 mm/dk – 1600 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynağa ait
optik görüntü 80

Resim 7.11. 90 mm/dk – 800 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynağa ait
optik görüntü 81

Resim 7.12. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü (500 mikrometre) 82

Resim **Sayfa**

Resim 7.13. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü-1 (200 mikrometre) 82

Resim 7.14. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü-2 (200 mikrometre) 83

Resim 7.15. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü (50 mikrometre) 83

Resim 7.16. 90 mm/dk-800 dev/dk hızında ait optik görüntü (500 mikrometre) 84

Resim 7.17. 90 mm/dk hızında a) 800 dev/dk, b)1600 dev/dk dönme hızlarında optik görüntüler (200 mikrometre) 85

Resim 7.18. 800 dev/dk hızında a) 90 mm/dk, b) 60 mm/dk ilerleme hızlarında optik görüntüler (100 mikrometre) 85

Resim 7.19. 40 mm/dk – 800 dev/dk hızında düz ve dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımlarla yapılan kaynaklara ait makro görüntüler 86

Resim 7.20. 800 dev/dk dönme hızında 40 mm/dk ilerleme hızında dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımla yapılan kaynağa ait optik görüntü (200 mikrometre) 86

Resim 7.21. 800 dev/dk dönme hızında a) 90 mm/dk düz omuzlu, b) 40 mm/dk dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımlara ait optik görüntüler (200 mikrometre) 87

Resim 7.22. 800 dev/dk dönme hızında a) 90 mm/dk düz omuzlu, b) 40 mm/dk dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımlara ait optik görüntüler (100 mikrometre) 87

Resim 7.23. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynakta ITAB bölgesindeki kabalaşma 88

Resim 7.24. a) Kaynak merkezinden uzak, b) kaynak merkezine ait SEM görüntüsü (100 mikrometre) 89

Resim 7.25. Isının tesiri altındaki bilgeye ait SEM görüntüsü (100 mikrometre) 89

Resim 7.26. EDS analizi için numune üzerinde çalışılan lokasyonların gösterimi 90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
°	Derece
dk	Dakika
dev	Devir
kN	Kilo Newton
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
s	Saniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DKB	Dinamik Olarak Kristalleşen Bölge
EDS	Enerji Dağılımı Spektrometresi
HB	Brinell Sertliği
HV	Vickers Sertliği
ITAB	Isının Tesiri Altındaki Bölge
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
TWI	The Welding Institute

1. GİRİŞ

Alüminyum, hafiflik, şekillendirilebilirlik, spesifik mukavemet ve korozyon direnci gibi kendine özgü nitelikleri sayesinde ön plana çıkan bir malzemedir. Birçok alüminyum alaşımı düşük sıcaklıklarda bile dayanımlarını ve sünekliklerini muhafaza edebilme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle alüminyum ve alaşımları hafiflik kriterinin olduğu uygulamalar için ekonomik bir alternatif olarak görülmektedir [1].

Kaynaklama işlemi, alüminyum alaşımları açısından önde gelen bir birleştirme tekniğidir. Alüminyum alaşımlarında kaynak yöntemi olarak literatürde gaz metal ark, gaz tungsten ark ve sürtünme karıştırma kaynağı yaygın olarak görülse de direnç nokta kaynağı ve lazer kaynağının da kullanımı mevcuttur [2].

Füzyon kaynağında iş parçası gaz alevi veya elektrik arkı ile eritilmektedir. Gaz alevi kullanımı ısıl etkilenmiş bölgenin geniş olmasına sebep olup alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Oksit tabakasının kırılımı ve kaynak havuzunun korunması amacıyla gaz alevi genelde akı ile birlikte uygulanır. Ancak akı kullanımı çevreden nemi emmesi nedeniyle alüminyumun aşınmasına neden olur. Ark kaynağında ise tüketilebilir elektrot ile işparçası arasında elektrik arkı oluşumuyla ısı üretilir. Metal ark kaynağı (korumalı veya manuel) tekniği bu anlamda bilinen en eski tekniklerden olmasına karşın gaz kaynağında da görüldüğü üzere akı sıkışmasından dolayı korozyon ve gözeneklilik başlıca sorunlardandır [2].

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yeni nesil yeşil bir kaynak tekniği olarak görülmektedir. Konuyla ilgili ilk deneysel çalışma The Welding Institute (TWI) tarafından 1991 yılında gerçekleştirilmiştir [3]. Dönen bir takım birbirlerine bağlanmış plakalara daldırılarak sürtünme oluşturur. Bu sürtünme malzemenin erimeden lokal olarak ısınmasını sağlar ve plastisize eder. Takım omuzu plastikleşmiş malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını sağlar. Dönen takım yumuşatılmış malzemeyi kendi çevresinde transfer eder ve iş parçasını karıştırarak hareket eder. Plastikleşen malzeme takım omuzu tarafından baskılanarak yüzeyden dışarı malzeme akışı önlenir [4]. Üretilen ısı ve pimin karıştırma hareketi malzemeyi katı halde iken kaynaklamak için yeterli olur. SKK yeniden kristalleşme mekanizması ile alaşımlarda tane boyutunun inceltilmesi için de kullanılmaktadır [5]. SKK

işleminde metalürjik aşamalar ön ısıtma, ilk deformasyon, ekstrüzyon, dövme ve soğuma şeklinde sıralanır [6].

Sürtünme karıştırma kaynağının alüminyum kaynağında kullanımının başlıca avantajları şunlardır [7]:

1- Katı hal kaynağı olarak ana alüminyum alaşımlarında kullanılabilmektedir ve alüminyum füzyon kaynaklarında görülen sıcak çatlama, gözeneklilik ve element kaybı gibi problemleri azatılması açısından önemlidir.
2- Özel bir kaynak becerisi gerektirmez ve işlem sırasında müdahale gereksinimi çok enderdir.
3- Koruyucu gaz veya dolgu teline ihtiyaç yoktur.
4- Kaynak işlemi, düşük kalitedeki kenar hazırlama durumunda plaka kalınlığının % 20'sine kadar olan boşluklara karşı toleranslıdır. Fakat dolgu malzemesi kullanılmadığı için kesit kalınlığında düşüş görülmektedir.
5- SKK füzyon kaynağı olmadığı için katılaşma ve soğutma ile ilgili termal büzüşmeler önemli ölçüde azalır.
6- Alın, bindirme ve punta kaynak geometrilerinde kullanılabilir.
7- Ultraviyole veya elektromanyetik radyasyon riski bulunmamaktadır.

SKK geleneksel kaynak yöntemlerine göre kaynak bölgesinde çekme mukavemeti, yorulma, sertlik, tokluk ve süneklik gibi özelliklerde iyileşme sunmaktadır. Bu sayede havacılık, deniz, demiryolu faaliyetlerinde kullanımı mevcuttur [3]. SKK nın titanyum alaşımları, nikel alaşımları ve çelikler üzerinde kullanımının geliştirilmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır ve bu malzemelere uygulanabillir olduğu belirtilse de bu malzemelerin kaynağının yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi nedeniyle takım malzemelerinin performans ve ömürleri ile ilgili araştırmaların gerekliliği bildirilmektedir. Ayrıca SKK konusunda farklı alüminyum alaşımlarının birbirlerine kaynağı ve alüminyum alaşımlarının magnezyum, metal matrisli kompozit, çelik ve bakır gibi farklı metal malzemelere kaynaklanabilirliğine yönelik araştırmalar bulunmaktadır. SKK bakır ve magnezyum alaşımları için de iyi bir şekilde geliştirilmiş olsa da alüminyum alaşımlarına daha çok odaklanılmıştır [7].

Sürtünme karıştırma kaynağının konvansiyonel füzyon kaynaklarına kıyasla avantajları alüminyum alaşımlarının ağırlıklı kullanıldığı endüstriler için bildirilmektedir. Alüminyum

yapılar için SKK kullanımı çatlak ve gözenekliliğin eliminasyonu, dolgu malzemesi ve maliyetli kaynak hazırlığı ihtiyacının ortadan kaldırılması gibi avantajlar sunmaktadır [8].

Alüminyum 6061-T6 metalik malzeme sınıfında hafif malzemelerden biri olarak bilinmektedir. Alüminyum 6061-T6 ağırlıktan kazanç, yüksek dayanım ve işlenebilirlik gibi özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrisinde kullanılır. Özellikle ulaşım endüstrisi için Alüminyum 6061-T6 ve sürtünme karıştırma kaynağı önemli malzeme/birleştirme işlemi olarak görülmektedir [9].

Problem durumu / Konunun tanımı

Sürtünme karıştırma kaynağı işleminde kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere önemli etkisi bulunmaktadır. Takımın dönme hızı ve ilerleme hızı kaynak işleminde çekme özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Bu parametrelerin değişimi işparçasına etkiyen ısı girdisini farklılaştırmaktadır. Isı girdisinin optimum halde tutulması önemlidir. Sürtünme karıştırma kaynağında önemli parametrelerden takım çalışma hızının doğru belirlenebilmesi kaynak hatalarının azaltılması ve mekanik özellikleri geliştirmek adına kritiktir.

Sürtünme karıştırma kaynağında ısının % 70'i takımın omuz kısmı tarafından geri kalanı ise takım pimi tarafından üretilir [5]. Kaliteli bir sürtünme karıştırma kaynağı bağlantısı bağ oluşumu ile ilgilidir. Bağ oluşumu da takım tarafından sürtünme yoluyla üretilen ısı ve kesme deformasyonu ile ilişkilidir. Bundan dolayı SKK da takım tasarımı oldukça kritiktir. Takımın ilk olarak fonksiyonu omuz kısmı altında yeterli ısı ve plastik deformasyon sağlayarak işparçalarının birleşmesini gerçekleştirmektir. Bu işlemde sürtünme mekanizması ısı oluşumunun önemli bölümünün üretilmesini sağlaması nedeniyle çok önemlidir ve sürtünme katsayısındaki değişimler arayüzdeki temas alanının boyutunun farklılaşmasına yol açması nedeniyle sıcaklık ve kaynak kuvvetlerini etkiler. Sürtünme ile ısı oluşumu hem omuz hem de pim geometrisine bağlıdır. Üst yüzeydeki malzeme akışı ise büyük oranla omuz tarafından etkilenmektedir [10]. Standart bir SKK takımında olduğu gibi düz bir omuz tasarımı yerine farklı geometrik unsurların omuz tasarımında kullanılması literatür araştırmasında da görüldüğü üzere kaynaklanan parçalarda daha iyi mekanik özellikler sunmaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağında takım hız parametrelerinin ve takım omuz tasarımının işlemin verimliğine önemli etkisi olduğu anlaşılmaktadır ve bu doğrultuda gerçekleştirilecek çalışmaların literatürü zenginleştireceği ve ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Araştırmanın amacı

Yapılan tez çalışmasında, endüstrilerde kullanımı gün geçtikçe artan yeni nesil kaynak teknolojilerinden sürtünme karıştırma kaynağında takım dönme ve ilerleme hızlarının ve takım omuz tasarımının işleme etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında havacılık da dahil olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılan Alüminyum 6061-T6 alaşımı işparçası malzemesi olarak seçilmiştir. Kaynak işleminde kullanılmak üzere düz, girintili ve çıkıntılı omuz geometrilerine sahip takımlar tasarlanıp, üretilmiştir ve alüminyum 6061-T6 plakaları birbirlerine kaynaklamak üzere kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde düz omuz ucu yüzeyi olan takım tasarımıyla iki farklı takım ilerleme hızında dört farklı takım dönme hızı test edilerek bu parametrelerin çekme mukavemetine olan etkisinin anlaşılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde omuz bölümünde girintili ve çıkıntılı dairesel unsurlar içeren takımlar ile herhangi bir unsurun bulunmadığı düz omuza sahip takımla yapılan kaynağın çekme mukavemetini nasıl etkilediğinin tespiti amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi

Bu çalışma sürtünme karıştırma kaynağında takım dönme hızı, takım ilerleme hızı ve takım omuz ucu yüzeyi tasarımının çekme mukavemetine etkisinin anlaşılması açısından literatürü zenginleştireceği düşünülmektedir. Takım omuzları malzeme deformasyonunu arttıracak ve dolayısıyla işparçasının daha iyi karışmasını sağlayacak özellikler bulundurabilir. Bu özelliklere örnek olarak helozonlar, eş merkezli daireler, çıkıntılar verilebilir. Bu unsurlar omuz geometrisine işlenir [11]. Literatürde farklı takım omuz tasarımlarının SKK işlemine etkilerini inceleyen kısıtlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışma ile birlikte gelecekte yapılacak araştırmalarda özgün takım omuz tasarımlarıyla birlikte takım dönme ve takım

ilerleme hızlarının optimize edilmesiyle daha iyi mekanik özellikler edilebileceğinin farkındalığını oluşturabilmek önemli görülmüştür.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum reaktif olması sebebiyle doğada metalik şekilde değil bileşik halde bulunur. Bileşik olarak en önemlisi boksittir. Alüminyumun ekstraksiyon işlemi iki fazdan meydana gelir. Bunlardan ilki alüminyum oksitin (Al_2O_3, alümina) cevherden ayırımıdır [12]. Alümina ise boksit [(Al, Fe)2O32H2O] ya da belirli killerden [Al2O3.2SiO2] oluşturulur. Boksit silaka ağırlıklı element olduğunda beyazımsı, demir oksit ağırlıklı element olduğunda kırmızımsı görünen silika veya demir bazlı kil benzeri oksitdir [2]. İkinci faz ise kriyolit (Na_3AlF_6) içinde alüminanın 950°C-1000°C arası koşullarda elektrolitik indirgenmesidir. Bu işlemle % 5-10 mertebesinde içerisinde Si ve Fe gibi safsızlık bulunduran bir alüminyum elde edilir ve ek işlemlerle saflığa yakınlaşabilen metale ulaşılır [12].

Alüminyumun yoğunluğu 2,7 g/cm^3 olup çeliğin yoğunluğunun (7,83 g/cm^3) yaklaşık olarak üçte biri kadar seviyesinde olmakla birlikte magnezyumla (1,74 g/cm^3) karşılaştırıldığında ise fazladır. Ancak magnezyum hegzagonal sıkı paket simetrik olmayan ve sınırlı sayıda kayma sistemine sahip yapıdadır. Alüminyumun magnezyuma göre daha fazla kullanım alanı bulması alternatif kayma sistemlerine sahip yüzey merkezli kübik kristal yapısı sayesinde yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyeti ile açıklanabilir. Alüminyumun erime noktası 660°C dir ve bu anlamda magnezyuma (650°C) benzemektedir [1].

Alüminyum alaşımının özellikleri saflığına göre değişmektedir. Alüminyum özel kullanımlar için yaklaşık % 99,99995 saflık derecesine kadar saflaştırılabilmektedir. Saflık derecesine bağlı olarak alüminyumun fiziksel özelliklerinin nasıl değiştiği Çizelge 2.1'de verilmiştir [13].

Çizelge 2.1. Alüminyumun saflık değerine göre değişen fiziksel özellikleri

	Saflık Değeri, %				
Özellik	99,999	99,990	99,800	99,500	99,000
Erime Noktası, °C	-	660,2	-	-	657
Kaynama Noktası, °C	-	2480	-	-	-
Gizli Ergime Isısı, cal/g	-	94,6	-	-	93
Spesifik Isı, cal/g (100°C)	-	0,2226	-	-	0,2297
Yoğunluk, g/cm^3 (20°C)	2,7	2,7	2,71	2,71	-
Elektriksel Direnç, μΩ-cm (20°C)	2,63	2,68	2,74	2,8	2,87
Direncin Sıcaklık Katsayısı	-	0,0042	0,0042	0,0041	0,0040
Termal Genleşme Katsayısı x10^6 (20-100 °C)	-	23,86	23,5	23,5	23,5
Isıl İletkenlik (100°C)	-	0,57	0,56	0,55	0,54
Reflektivite, %	-	90	89	86	-
Elastisite Modülü, N/mm^2	-	68258	-	-	68948

Saflık derecesine göre mekanik özelliklerde değişiklik göstermektedir. Alüminyum yüksek saflıkta daha yumuşak ve plastik yapıda olup mukavemeti daha azdır. Alüminyumda saflık arttığında alaşımın sertliğinde düşüş olmaktadır. % 99,2 saflıkta sertlik 24-54 HB iken % 99,8 saflıkta sertlik değeri 19-41 HB arasındadır.

Alüminyumda çekme mukavemeti saflık derecesi yükseldikçe azalmaktadır. Kopma esnasındaki kesit yüzeyi azalması yüksek saflıkta maksimumdur ve bu malzemenin daha sünek bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Yüksek saflıktaki soğuk haddeleme yöntemiyle elde edilen alüminyumda çekme mukavemeti 110-130 N/mm^2 dir. Eğer tavlama işlemine maruz kalmış ise 35-60 N/mm^2 arasındadır. Uzama miktarı % 5,5 seviyesinden % 40-50 seviyelerine kadar mümkündür [14].

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Ürün formu olarak alüminyum dövme ve dökme olarak bulunmaktadır. Sıcak/soğuk haddelenmiş sac, levha, çubuk, tel ve folyo dövme formlardır. Dövme yöntemi hızlı ve ekonomik olarak form üretilmesini sağlar. Döküm yöntemi olarak ise en çok bildirilen dört yöntem kum döküm, kayıp mum döküm, kalıcı çelik kalıba döküm ve pres dökümdür. Alüminyum alaşım ürünleri dövme ve dökme olarak iki kategoriye ayrılması mümkündür. Bu iki kategoride kimyasal bileşime ve tempere göre ek olarak alaşım sınıflarına ayrılabilir. Temper ataması alaşımdaki soğuk işlem miktarını veya ısıl işlemini belirtir [12]. Çoğu

alaşım faz çözünürlüğüne göre ısıl işleme tepki verirler. Bu işlemler çözündürme ısıl işlemi, soğutma tavlaması, çökelterek sertleştirme veya yaşlandırma sertleşmesidir. Dövme ve döküm alaşımlarda bu gruplar ısıl işlem görebilir şeklinde ifade edilmektedir [15]. Döküm alaşımları daha fazla oranlarda alaşım elementi içerdiğinden dolayı bu heterojen yapıya (ikinci faz partiküllerine) neden olmaktadır. İkinci faz partikülleri genellikle çentik oluşturarak yük koşulu altında çatlağa dönüşür. Bu yüzden çoğu döküm parçası uzama, dayanım ve özellikle de yorulma açısından zayıf bulunur. Dövme alaşımları ise görece daha yüksek dayanım gösterir [2].

Alüminyum içinde bulundurduğu alaşım elementine göre farklı mekanik ve fiziksel özellikler gösterebilmektedir. Çizelge 2.2'de alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik ve fiziksel özelliklerine olan etkisi gösterilmiştir [14].

Çizelge 2.2. Alüminyumda mekanik ve fiziksel özelliklerin alaşım elementleriyle değişimi

Özellikler	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Co	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma Mukavemeti	++	+	+	++	+	+	+			--
Elastiki Sınır	++	+	--	+	--					
Sertlik	++		--	--	+			+	+	
Isıya Dayanıklılık	++		++		+				+	
Kaynak Kabiliyeti	--	++	+	--	--		+	+		+
Talaş Kaldırma ile İşlenebilirlik	++	--	+	+	+		++	+	++	+
Elastikiyet Modülü	+	++	--	+	+	++		+	--	
Döküm Kabiliyeti	+	++	--	+			+	--	--	
Süneklik	--	----	+				+		----	
Korozyon Direnci	--	+	++	+				--	----	++
Anodizasyona Elverişsizlik	--	+	++	+				--		
++ **:** çok iyi			+ **:** iyi			--: ortanın altında		----: zararlı		

2.2.1. Döküm alüminyum alaşımları

Döküm alüminyum alaşımları üç basamaklı bir sistem ve takiben ondalık değer ile gösterilir. Ondalık basamaktaki 0 döküm parçaları, 1 ve 2 rakamlarıysa ergitilecek ingot alaşımları ifade eder. Aşağıda döküm sınıfları tanımlanmıştır [15].

- 1xx.x: Kontrollü alaşımsız (saf) bileşimlerdir.
- 2xx.x: Başlıca alaşım elementinin bakır olduğu alaşımlardır.
- 3xx.x: Başlıca alaşım elementinin silikon olduğu alaşımlardır. Bakır ve magnezyum gibi alaşım elementleri de belirtilebilir. Bu sınıf, üretilen tüm dökümlerin yaklaşık % 90 gibi büyük bir bölümünü kapsar.
- 4xx.x: Başlıca alaşım elementinin silikon olduğu alaşımlardır.
- 5xx.x: Başlıca alaşım elementinin magnezyum olduğu alaşımlardır.
- 6xx.x: Kullanılmamaktadır.
- 7xx.x: Başlıca alaşım elementinin çinko olduğu alaşımlardır. Bakır ve magnezyum gibi alaşım elementleri de belirtilebilir.
- 8xx.x: Başlıca alaşım elementinin kalay olduğu alaşımlardır.
- 9xx.x: Kullanılmamaktadır.

2xx, 3xx ve 7xx sınıfı ısıl işlem görebilen döküm alaşımlarıdır [15].

2.2.2. Dövme alüminyum alaşımları

Dövme alaşımlar dört basamaklı bir sistemle tanımlanmaktadır [15].

- 1xxx: Kimya ve elektrik endüstrilerinde kullanılan saf (alaşımsız) bileşimdir.
- 2xxx: Bakırın ana alaşım elementi olarak bulunduğu alaşımlardır. 2xxx serisi uçaklarda yüksek mukavemet (455 MPa akma mukavemeti mertebesinde) uygulamalarında kendine yer bulmaktadır.
- 3xxx: Ana alaşım elementi olarak mangenez bulunduran alaşımlardır. Mimari uygulamalarda genel amaçlı alaşım olarak değerlendirilir.
- 4xxx: Ana alaşım elementinin silikon olduğu kaynak çubuklarında ve lehim sacında uygulama alanı olan alaşımlardır.

- 5xxx: Magnezyum başlıca alaşım elementidir. Deniz endüstrisinde kullanım alanı mevcuttur.
- 6xxx: Magnezyum ve silikonun ana alaşım elementleri olan alaşımlardır.
- 7xxx: Başlıca alaşım elementinin çinko olduğu alaşımlardır. Uçak yapısallarında kullanımı ile bilinir. 7000 serisi en güçlü alüminyum alaşımıdır ve 500 MPa üzeri akma dayanımı mümkündür.
- 8xxx: Çeşitli bileşimlerin karakterize edildiği alaşımlar olarak bilinir. Kalay, lityum ve/veya demir bulundurabilir.
- 9xxx: Gelecek kullanımlar için ayrılmıştır.

2xxx, 6xxx, 7xxx, ve bazı 8xxx alaşımları ısıl işlem görebilen dövme alaşımlardandır [15].

2.3. Alüminyum Alaşımlarında Temper Gösterimi

Mekanik özellikleri kimyasal bileşimlerin yanında alaşımlardaki tavlama, soğuk işlenme, çökeltme sertleştirilmesi gibi durumlar da belirler. Bu sebeble alaşımların uğradığı gerinim sertleşmesi veya ısıl işlem koşulunu belirten bir son ekler sistemi tanımlanmıştır. Beş basit gösterim mevcuttur [12].

- F – Fabrikasyon: Dövme ürünler için gerinim sertleşmesi veya ısıl işlem miktarının kontrolünün olmadığı durum için kullanılır.
- Tavlanmış: En düşük dayanımı elde etmek amacıyla tavlanmış ürünler içindir. Son ek kullanılarak spesifik bir ısıl işlem belirtilebilir.
- H – Sertleştirilmiş: İstenilen mekanik özelliklere ulaşmak için gerçekleştirilen ısıl işlem ve soğuk işleme miktarını belirtmek içindir. H harfinden sonra en az iki rakam daha kullanılır.
- W – Isıl işleme uğramış çözelti: Çözelti ısıl işlemi sonrası oda sıcaklığında çökelti sertleşen alaşımlara uygulanır. Bunu, doğal yaşlanma süreci izler.
- T – Isıl işleme uğramış: Kararlı bir durum elde etmek için yaşlandırılan alaşımları ifade eder. Spesifik ısıl işlemi ifade etmek için T bir veya daha fazla sayı ile kullanılır [12].

H harfinden sonraki basamak için tanımlamalar şu şekildedir :

- H1: Sadece gerinimle sertleştirilmiştir.
- H2: Gerinimle sertleştirilmiş ve kısmi olarak tavlanmıştır. Gereğinden fazla sertleştirilen ve daha sonra yumuşatma amacıyla düşük sıcaklıkta tavlanan alaşımlara uygulanır.
- H3: Gerinimle sertleştirilip ve stabilize edildişmiştir. Stabilizasyon, üretim esnasında ya da sonrasında düşük sıcaklıkta uygulanan ısıl işlemdir. Böylelikle süneklik geliştirilir ve zamanla yumuşayan gerinimle sertleştirilmiş alaşımların özellikleri stabilize edilir.
- H4: Gerinimle sertleştirilmiş ve boyanmıştır.

H den sonra gelen ikinci sayı alaşımdaki gerinim sertleşme miktarını belirtir. Üçüncü sayının kullanımı zorunlu olmamakla birlikte ikinci sayının belirttiği temperin eldesi amacıyla özel kontrol gerekliliğinde ya da alaşımın farklı bir karakteristiği etkilendiğinde kullanılmaktadır.

T tanımlamaları, yaşlandırma işlemine uğramış alaşımlarda kullanılır. T den sonraki sayı temel ısıl işlemi belirtir :

- T1: Yüksek sıcaklık şekillendirme işleminden soğutularak doğal olarak yaşlandırılmıştır.
- T2: Yüksek sıcaklık şekillendirme işleminden soğutularak soğuk işlenmiş ve doğal olarak yaşlandırılmıştır.
- T3: Çözündürme ısıl işlemine uğramış, soğuk işlenmiş ve doğal olarak yaşlandırılmıştır.
- T4: Çözündürme ısıl işlemine uğramış ve doğal olarak yaşlandırılmıştır.
- T5: Yüksek sıcaklık şekillendirme işleminden soğutularak yapay olarak yaşlandırılmıştır.
- T6: Çözündürme ısıl işlemine uğramış ve yapay olarak yaşlandırılmıştır.
- T7: Çözündürme ısıl işlemine uğramış ve aşırı yaşlandırılmış veya stabilize edilmiştir.
- T8: Çözündürme ısıl işlemine uğramış, soğuk işlenmiş ve yapay olarak yaşlandırılmıştır.
- T9: Çözündürme ısıl işlemine uğramış, yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiştir [12].

2.4. 6000 Serisi Alüminyum-Magnezyum-Silisyum Alaşımları

6000 serisi alüminyum alaşımlarında magnezyum silisit Mg_2Si sertleştirici bileşen olarak bulunur. Alaşım içeriğinde % 1 den az miktarda silikon ve magnezyum bulunur. Ayrıca az oranda manganez, bakır, çinko ve krom ile alaşımlandırılması mümkündür. Alaşımlar kaynak metali çatlamasına karşı hassiyet gösterirler. Ancak çatlama 4043 gibi yüksek silikon bulunduran dolgu metalleri veya 5356 gibi yüksek oranda magnezyum içeren alaşımların kullanımıyla engellenebilir.

6000 serisi alaşımlar ısıl işlem görebilirler. Yapı ve mekanik özellikleri kaynak koşullarına yüksek derecede bağlılık gösterir ve özelliklerdeki değişimler komplekstir. Bu alaşımlarda dolgu metali kullanmadan kaynaklama işlemi kaynak metali sıcak çatlama problemi sebebiyle nadirdir [12].

Bu tez çalışmasında endüstrinin birçok alanında sıklıkla tercih edilen alüminyum 6061-T6 alaşımı kullanılmıştır. Çizelge 2.3'de Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri verilmiştir [16].

Çizelge 2.3. Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Değerler
Sertlik, Vickers	107
Maksimum çekme mukavemeti	310 MPa
Akma sınırındaki gerilme	276 MPa
Kopmada uzama, 1/16 in. (1,6 mm) Kalınlık	% 12
Kopmada uzama, 1/2 in. (12,7 mm) Çap	% 17
Elastisite Modülü	68,9 GPa
Poisson Oranı	0,33
Yorulma mukavemeti	96,5 MPa
Kırılma tokluğu	29 MPa-m½
Kesme modülü	26 GPa
Kesme mukavemeti	207 MPa

Çizelge 2.4'de Alüminyum 6061-T6 alaşımının sıcaklığa bağlı çekme özellikleri verilmiştir [1].

Çizelge 2.4. Alüminyum 6061-T6 alaşımının sıcaklığa bağlı çekme özellikleri

Sıcaklık, °C	Çekme Mukavemeti, MPa	Akma Mukavemeti, MPa	Uzama %
-196	414	324	22
-80	338	290	18
-28	324	283	17
24	310	276	17
100	290	262	18
149	234	214	20
204	131	103	28
260	51	34	60
316	32	19	85
371	24	12	95

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

Alüminyum alaşımları kaynaklanabilirliği zor malzemelerdir. Alüminyum alaşımları ergitme yöntemler ve difüzyon kaynağı gibi yaygın kaynak tekniklerinde bir takım sorunlar gösterir. Vakum ortamında gerçekleşen elektron ışın kaynağı hariç porozite oluşması, çatlaklar ve dayanımdaki düşüş bu sorunlara örnektir. Difüzyon kaynağı da alüminyum alaşımlarında yüzey oksit tabakası nedeniyle ekonomik anlamda verimli değildir [17].

Gaz ark kaynak işlemleriyle en kolay birleştirilen alaşımlar ısıl işlem görmeyen 1000, 3000, 5000 sınıfı ve 6000 sınıfındaki ısıl işlem görmeyen şekillendirilebilen alaşımlarıdır. 4000 sınıfı ve ısıl işlem görebilen 2000 sınıfı da özel tekniklerin uygulanmasını gerektirebilecek koşullar altında arkla kaynak edilebilirler ancak süneklikte düşüş görülebilir. Yüksek dayanımlı 7000 sınıfından ısıl işlem görebilen 7075, 7079 ve 7178 alaşımları kaynak edilebilse de bu kaynaklar gevrek oluşumlar gösterebileceğinden kaynaklanmaları önerilmez. 7005 ve 7039 alaşımları ise kaynaklanabilirlik için geliştirildiklerinden bunların kaynağı daha iyi netice verir [14].

Alüminyumun kaynaklanabilirliğinde önemli etkenler aşağıda açıklanmıştır.

- İnatçı Oksit Tabakası: Alüminyumun havayla teması sonucu yüzeyde hızlıca alüminyum oksit tabakası meydana gelir. Füzyon yöntemiyle kaynaklamada hatasız bağlantılar elde edebilmek için bu tabakanın talaşlı imalat, eğeleme, tel fırçalama, kazıma veya kimyasal temizleme gibi yöntemlerle yok edilmesi gerekmektedir. Oksitler temizlenmediği durumda kaynakta kalabilir, süneklikte düşüşe ve kaynak çatlaması gibi problemlere yol açabilir. Kaynak esnasında birleşim yeri yeniden oksitlenmeyi engelleyebilmek adına argon, helyum, hidrojen gibi gazlarla ya da akı ile korunması gereklidir.
- Isıl İletkenlik: Fiziksel özellik olarak kaynaklanabilirlik üzerinde en büyük etkiye ısıl iletkenlik sahiptir. Alüminyum alaşımlarında ısıl iletkenlik düşük karbonlu çeliğin dört katı düzeyinde ancak bakırın yaklaşık yarısı kadardır. Örnek vermek gerekirse sıcaklığı eşit miktarda yükseltebilmek için alüminyum alaşımlarında ısı çeliğe göre dört kat daha hızlı bir şekilde sağlanması lazımdır. Ayrıca bu yüksek ısıl iletkenlik erimiş kaynak havuzunun katılaşmasına kolaylaştırıcı yönde etki eder.

- Termal Genleşme Katsayısı: Alüminyumun termal genleşme katsayısı çelik ile kıyaslandığında iki katı seviyededir. Bu durum kaynak işlemi sonunda büzülmenin engellenmesinden dolayı çatlak oluşumuna neden olabilir ve ısı girdisinin en az seviyede tutulmasını gerektirir.
- Elektriksel İletkenlik: Füzyon kaynağında elektriksel iletkenlik az öneme sahipken metalin kaynak akımına karşı dirençle ısı üretildiği direnç kaynağı işlemi uygulanacak parçalarda oldukça önemlidir. Alüminyum çelikle kıyaslandığında daha iletkendir. Dolayısıyla aynı ısıtmayı elde etmek için daha fazla akıma ihtiyaç vardır.

Tüm bunlara ek olarak erime karakteristiği de alüminyumun kaynaklanabilirliğine etki eden faktörlendir [1].

3.1. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Metalürjisi

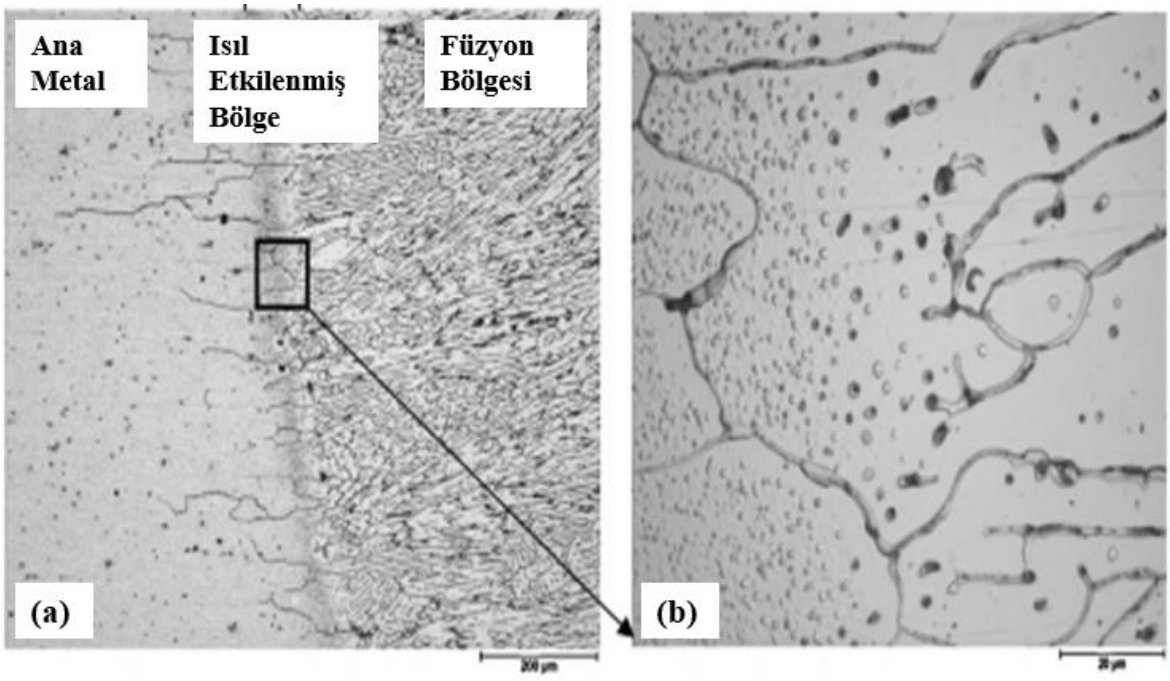
Güçlendirme mekanizmalarına göre alüminyum alaşımları ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem görmeyen şeklinde iki gruptan oluşur. Bunların kaynak metalürjisi farklılıklar göstermektedir. Isıl işlem görmeyen grupta çökeltiye neden olan elementlerin yokluğu kaynaklanabilirlik açısından olumludur. Çünkü çökelme sertleşmesinde gerekli alaşım eklemeleri kaynak esnasında sıcak çatlama veya sıvılaşmaya neden olmaktadır. Isıl işlem görmeyen alaşımlarda çökelti kabalaşması veya çözünmesi tehlikesi bulunmadığından daha iyi bağlantılar elde edilir. Isıl işlem görebilen gruptaki alaşımlar kaynak çatlaması durumuna karşı duyarlılık gösterir. Ancak bu sorun uygun dolgu kullanımı, alaşım seçimi gibi yöntemlerle çözülebilmektedir [1].

3.2. Isıl İşlem Görebilen Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Metalürjisi

Bu sınıftaki alaşımların büyük bölümü konvansiyonel ark kaynağı teknikleri, direnç nokta kaynağı, dikiş kaynağı ve lazer ışın ve elektron ışın kaynağı gibi işlemlerle kaynaklanabilmektedir. Ancak tüm alüminyum alaşımlarında da karşılaşılabilen bazı hususlara dikkat edilmelidir [1].

- Alüminyum üzerindeki oksit tabakası en az seviyede tutulmadığı sürece kaynağı olumsuz etkiler.

- Alüminyum alaşımları sıvı haldeyken hidrojen için yüksek çözünürlüktedir. Eğer ergitme sırasında kaynak havuzunda hidrojen tutulursa katılaşmada hidrojen çözünürlülüğündeki azalma nedeniyle kabarcık oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle dikkat edilmediği takdirde gözenek oluşumu gözlenir.
- Isıl işlem görebilen gruptaki alüminyum alaşımlarında fazla miktarda alaşım eklemesi sebebiyle kaynak çatlağı hassasiyeti bulunur. Kaynak çatlaması katılaşma ve sıvılaşma çatlaması olarak iki sınıfa ayrılır. Katılaşma çatlaması füzyon bölgesi içinde oluşurken sıvılaşma çatlaması füzyon bölgesine bitişik bölgede oluşur ancak kolayca tespit edilemeyebilir. Katılaşma çatlaması yüksek akım ve düşük kaynak hızları gibi ısı girdisinin yüksek olduğu durumlarda görülebilir.
- Çökelme ile sertleşebilen alaşımlarda füzyon bölgesine bitişik olarak kısmen erimiş bölge bulunur. Bu bölgenin oluşma nedeni kaynak esnasında düşük erime noktasına sahip ötektik fazların veya bileşenlerin tane sınırlarında erimesi ya da sıvılaşmasıdır. Bu durum çökelmeyle sertleşebilen alaşımlarda ötektik fazları oluşturabilen alaşım eklemeleri nedeniyle gözlenir. Kaynak esnasında sıvılaşan fazlar yırtılmalara neden olabilir. Dolgu alaşımının bileşimi sıvılaşan bölgede çatlak meydana gelip gelmemesi açısından son derece kritiktir. Dolgu alaşımları düşük katılaşma sıcaklığına sahip olursa sıvılaşma çatlaklarına karşı daha az hassasiyet görülür.
- Alüminyum kaynağı için çatlamaları önlemenin ilk metodu dolgu alaşımı eklemeleriyle kaynak metali bileşiminin kontrolünün sağlanmasıdır.
- Isıl etkilenmiş bölge füzyon bölgesine bitişik olarak bulunur ve metal özellikleri bu bölgede oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle bozulur. Bozulmanın nedeni yüksek sıcaklık kaynaklı mikroyapıdaki değişimlerdir. Isıl işlem görebilen alüminyum alaşımlarında ısıl etkilenmiş bölge çökeltilerin büyümesi veya çözünmesiyle fark edilebilir. 2000 serisi alaşımlarda çözünme görülürken, 6000 serisi alaşımlarda ana değişim çökeltilerin büyümesidir. Şekil 3.1'de ısıl etkilenmiş bölgedeki çökeltilerin büyümesine örnek olarak lazer kaynağı yapılmış Al 6056 alaşımının görüntüsü verilmiştir [1].



Şekil 3.1. a) Isıl etkilenmiş bölge, b) kabalaşan çökelti ve bazı sıvılaşmaların gösterimi

3.3. Isıl İşlem Görmeyen Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Metalürjisi

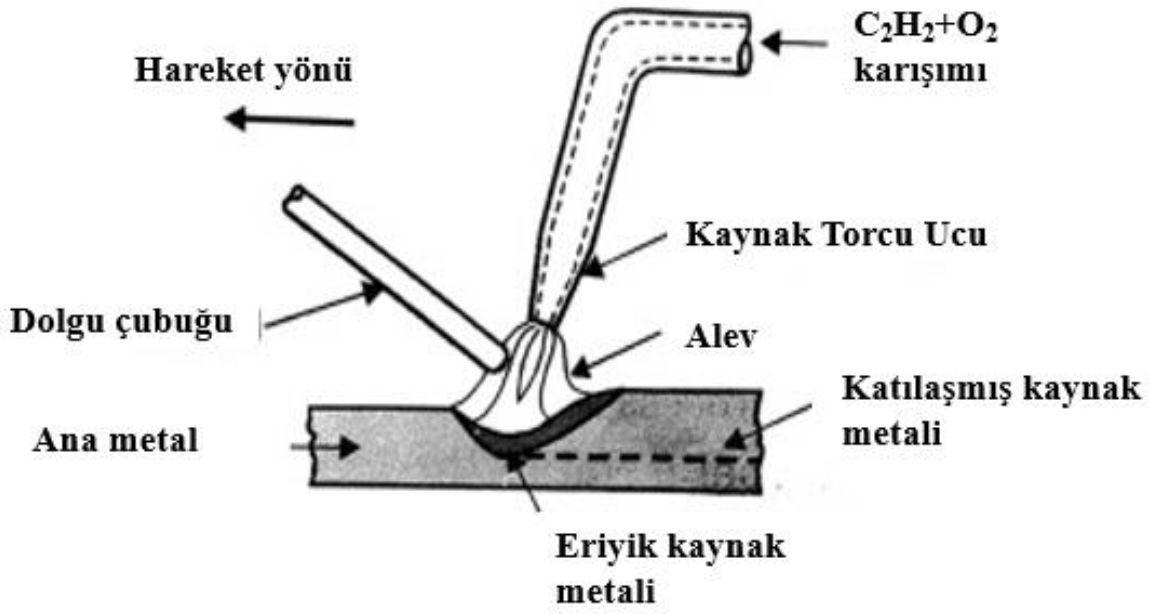
Kaynak gözenekliliği problemi diğer alüminyum alaşımlarında olduğu gibi bu gruptada hassasiyet oluşturur. Kaynak esnasındaki hidrojen tutulmasının önüne geçilerek bu problemden kaçınılabilmektedir. Kaynakta dolgu teli hidrojen kontaminasyonu açısından ana neden olarak tespit edilmektedir. Özellikle 5000 serisi dolgu alaşımları, gözenekliliğe yol açabilecek yüzey oksitlerinin hidrasyonuna karşı duyarlıdır.

Isıl işlem görmeyen gruptaki alaşımların kaynağında ısıl etkilenmiş bölgede mikroyapıda bozunma oluşur. Isıl işlem görebilen alaşımlar gibi güçlendirici çökeltileri çözünen veya kabalaşan şekilde bir oluşum yerine ısıl etkilenmiş bölgede hasar geri kazanım, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi ile limitlidir. Bu sayede ısıl etkilenmiş bölgedeki dayanımdaki kayıp ısıl işlem görebilen alaşımlar kadar fazla değildir. Isıl işlem görmeyen alaşımlarda kaynak metali yapının en zayıf yeri olup gerilim altında hasara uğrayacak bölümdür. Isıl işlem görebilen alaşımlarda ise bu durum ısıl etkilenmiş bölge için geçerlidir [1].

3.4. Alüminyum Alaşımlarında Yaygın Kullanılan Kaynak Yöntemleri

3.4.1. Oksi-asetilen kaynağı

Oksi-asetilen gaz kaynağında genel olarak asetilen, hidrojen, propan ve bütan gibi gazların oksijenle karıştırılması sonucu yanma gerçekleşir ve oluşan ısı parçaları kaynaklamak için kullanılmaktadır. Bu kaynak işlemi için gereken yüksek sıcaklık için içeriğinde oksijen ve asetilen gazı bulunduran karışım kullanılır. Bu teknik çeşitli parçaların kesim işleminde de uygulanır. Oksi-asetilen kaynağında kaynak havuzunun korunmasını sağlamak amacıyla argon gibi koruyucu gaz ile çalışılır ve parçaların birleştirmesi için dolgu çubuğu kullanılması gerekir. Bu işlemde torç hareketi ve dolgu çubuğu kontrolü manuel olarak ayarlanır. Kaynak torcu gazların gerekli hacimde karıştırılıp uç kısmında da karışımın yandığı bir alettir. Bu alet oksijen ve asetilen gazı için iki silindir bulundurur ve gazların karışımı nozul ucunda sağlanır. Kıvılcım aracılığıyla alev üretilmektedir. Oluşan konsantre alevin kaynak sırasında parçanın yüzeyi ve dolgu metalini eritmesi sağlanır. Şekil 3.2'de oksi-asetilen kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir [18].



Şekil 3.2. Oksi-asetilen kaynağı şematik gösterimi

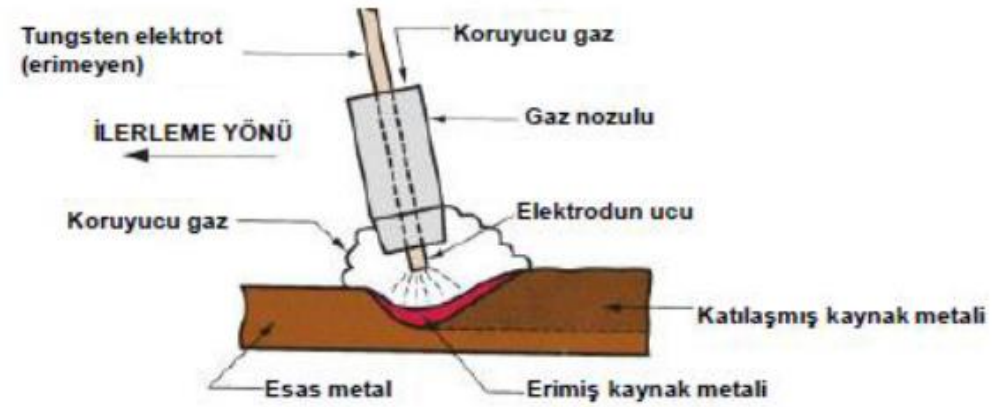
Atmosfer ortamında alüminyum üzerinde meydana gelen oksit tabakası kaynak çubuğundan ergitilen damlanın nüfuziyetini engellediğinden bu tabakanın ortadan kaldırılması gereklidir. Al_2O_3 kaynak içinde bulunursa parçanın korozyon direnci ve dayanımı düşer. Saf

alüminyumun kaynaklanmasında kaynak çubuğu etrafının dekapanla kaplanması gerekliyken alüminyum alaşımlarında kaynak yüzeyinin alt ve üst bölümlerinin de kaplanması gerekmektedir. İnce taneli bir yapı elde etmek amacıyla alüminyum ve alaşımlarında kaynak teli kompozisyonu ana metale benzer ya da aynı olmalıdır. Alüminyum alaşımlarında katılaşma aralığı büyük malzemelerin kaynağı küçük olanlara göre zordur. Alaşımda bulunan elementlerin yüzde oranının artması kaynağı zor hale getirmektedir. Bunun istisnası ise belirli sıcaklıkta ergiyip katılaşan ötektik alaşımlardır [14].

Oksi asetilen kaynağı kalın parçaların çok pasolu kaynağında kullanılabilmesi, kullanılması basit ve ucuz ekipmanları, dikişlerin sıcak çekiçlenebilme özelliği gibi avantajlar sunmaktadır. Ancak yöntemin pahalı kaynak sonrası işlemler gerektirmesi, dikişin her iki yanında ısının tesiri altındaki bölgede, ıslah edilmiş veya sertleştirilmiş metal alaşımlarında dayanımı düşük bölgelere neden olması gibi dezavantajları mevcuttur [19].

3.4.2. TIG kaynağı

TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanmasında ekonomik ve uygulama açısından basit olması gibi özelliklerinden dolayı genelde tercih edilen bir yöntemdir. TIG tekniğiyle kaynaklamada gereken ısı tungten elektrot ve kaynak parçası arasında oluşan ark tarafından oluşturulur. Kaynaklanan alan elektrodun çevresindeki nozuldan iletilen gaz sayesinde korunmaktadır [20]. Şekil 3.3'de TIG kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir [21].

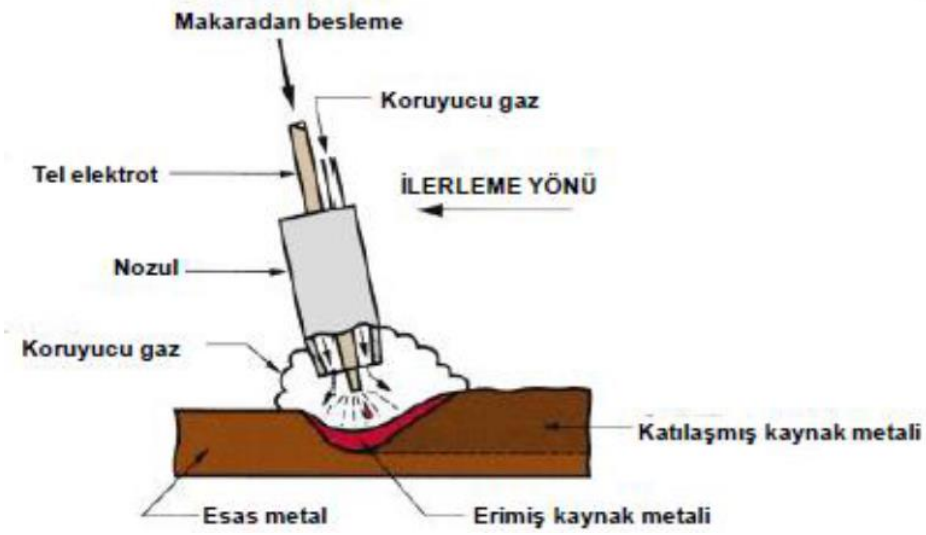


Şekil 3.3. TIG kaynağı şematik gösterimi

TIG kaynak yöntemi doğru akım düz ve ters kutuplama veya alternatif akımla gerçekleştirilebilir [14]. Bu teknik alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde yaygın bir kullanıma sahip olup 1000, 4000, 5000 serisi alüminyum alaşımlarında kullanımı görülmektedir [22]. İnce kesite sahip alüminyumda ilave metal olmadan kullanılabilse de, ısıl işlem görebilen 6061-T6 gibi alaşımlarda çatlama olabilmektedir [14].

3.4.3. MIG kaynağı

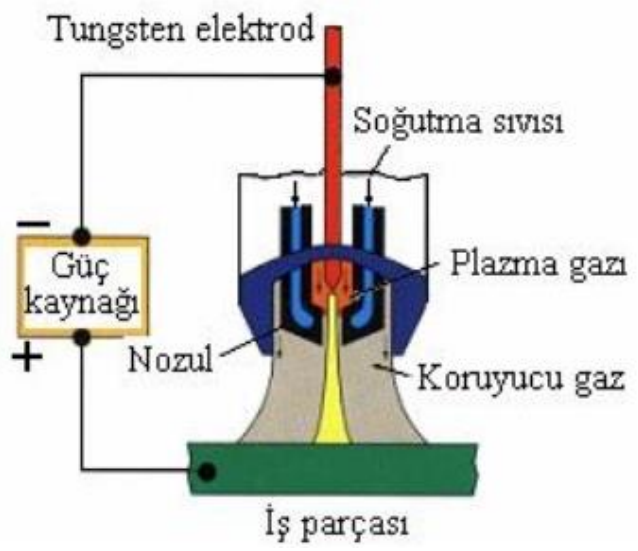
MIG (Metal Inert Gas) kaynağı dolgu metalinin koruyucu gaz altında kaynak havuzuna gönderildiği ark kaynak tekniğidir. Bu kaynaklama yöntemi iyi penetrasyon özellikleri, yüksek verimlilik, yüksek metal biriktirme sağlaması, yüksek kaynak hızı, cüruf olmaması ve otomatik uygulanabilmesi gibi avantajlar sağladığından demir ve demir dışı metallerde sık bir şekilde kullanılır. MIG/MAG kaynağı ile çok ince ve kalın demir ve demir dışı metal ve alaşımları birleştirilebilmektedir [23]. Ergitme kaynağı olarak alüminyum ve alaşımlarında çoğu uygulama MIG tekniğiyle yapılmaktadır. 1,6 mm ye kadar inceliğe sahip alüminyum bu yöntemle kaynaklanabilmektedir. Bu teknikte ısı tesiri altında kalan bölge oksi-asetilen ve elektrik ark kaynağı gibi tekniklerden daha dar olup kaynak hızı daha fazladır [14]. Şekil 3.4'de MIG/MAG kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir [21].



Şekil 3.4. MIG/MAG kaynağı şematik gösterimi

3.4.4. Plazma ark kaynağı

Plazma ark kaynağı yöntemi yüksek sıcaklığa ulaşarak iyonize olan ve elektriği ileten plazma gazı aracılığıyla gerçekleşir. Elektrik arkının tungten elektrotdan parçaya transfer edilerek arkın oluştuğu bir tekniktir. Parçanın ergitilmesi arkı meydana getiren plazma ısısı ile sağlanır. Tungsten elektrot ve parça arasında oluşan ark nedeniyle TIG kaynağına benzese de elektrodun torçdaki konumu, arkın iletim şekli ve kaynak mekanizması açısından farklıdır. Şekil 3.5'de plazma ark yönteminin şematik resmi verilmiştir [24]. Son zamanlarda, plazma ark kaynağı alüminyum ve alaşımlarında derin nüfuziyet ve daha az açısal çarpılma sağlayan ısı girdisi sayesinde ve aynı zamanda az paso ile kaynak ağzının doldurulabilmesi gibi avantajlarından ötürü TIG kaynak tekniğine göre daha çok uygulanmaya başlamıştır [14].

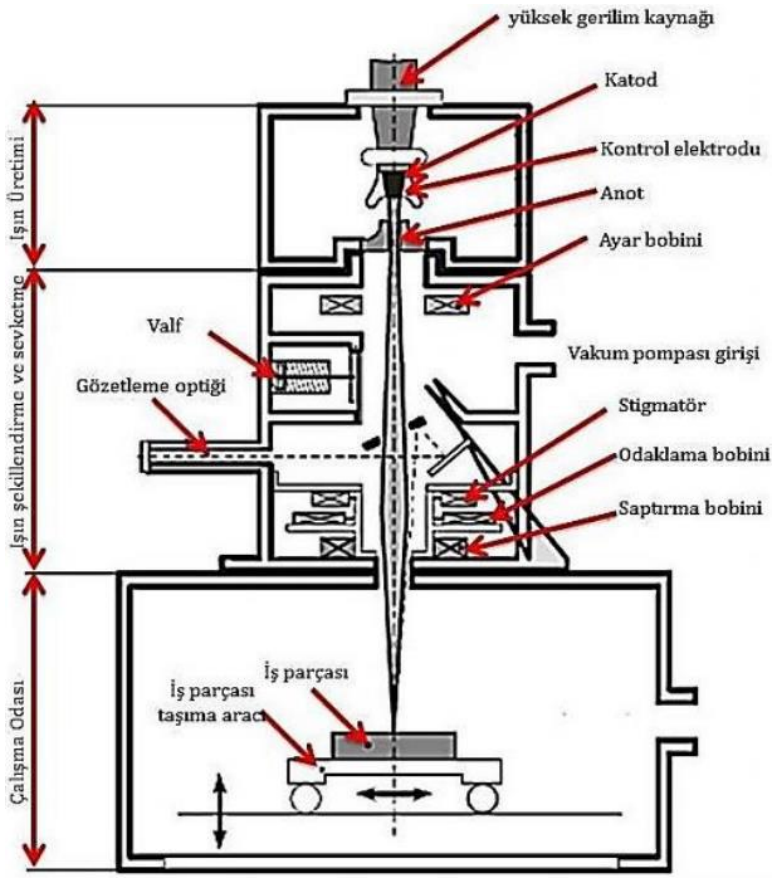


Şekil 3.5. Plazma ark kaynağı şematik gösterimi

3.4.5 Elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynağı malzemeye yüksek hız ve yoğunlukta yönlendirilen elektronların kinetik enerjisinin darbe etkisiyle ısı dönüştürüldüğü bir ergitme kaynak yöntemidir. Bu yöntemde kaynak verimi iyi olup ve en az düzeyde çarpılma sağlanabilir [14].

Elektron ışın kaynağı makinesi ışın üreteci, işleme mekanizması ve çalışma odası olmak üzere üç ana kısımdan oluşur. Bu kısımlar Şekil 3.6'da gösterilmiştir [22]. Alüminyum alaşımlarının büyük bölümü bu yöntemle kaynaklanabilse de 6061, 2004 ve 7075 gibi ısıl işlem görebilen birtakım alaşımlarda çatlama görülebilir [14].



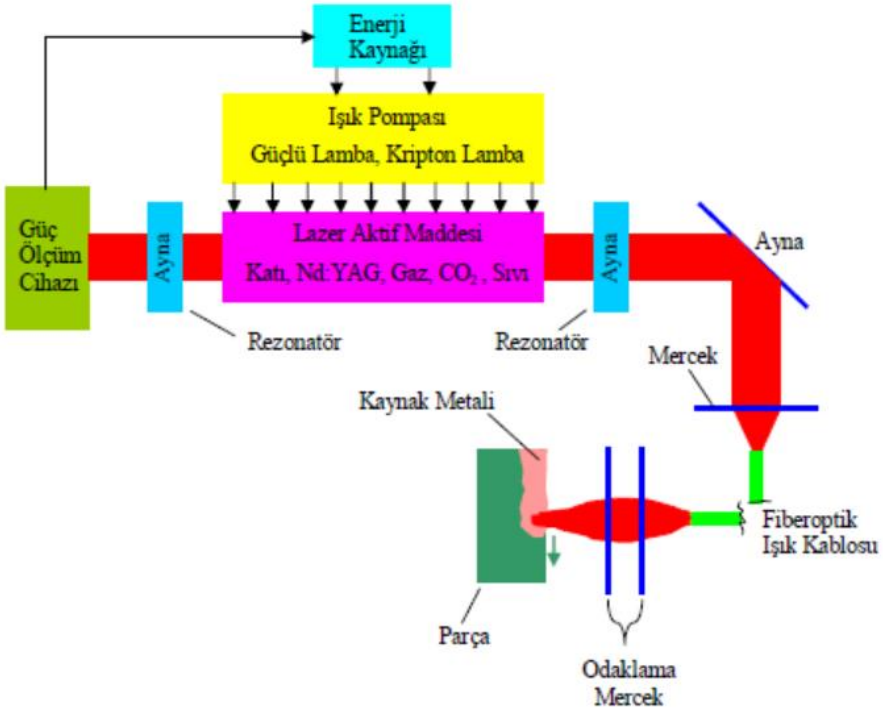
Şekil 3.6. Elektron ışın kaynağı şematik gösterimi

3.4.6. Lazer kaynağı

Lazer kaynağı yüksek enerjili ışın kullanımıyla kaynaklama tekniğidir. Bu teknikte enerji ışık dalgalarının konsantrasyonu ile elde edilir. Lazer ışın üretecinden ayrılan konsantre enerji kaynak edilecek yere odaklandırılarak bölgenin ergitilmesi sağlanır. Yüksek kaynak ilerleme hızı, kaynak dikişinin ve ısıl olarak etkilenen bölgenin dar olması gibi özellikleriyle ön plana çıkan bir yöntemdir. Yöntemin bazı dezavantajları ise kalın parçaların birleştirilmesindeki sorunlar (kaynak nüfuziyet derinliğinin 0,1-8 mm), sertleştirilebilir malzemelerde sert kaynak dikişi, yüksek yansıtma özelliği olan malzemelerde ilave önlemler alınmasıdır [25]. Alüminyum alaşımlarının yüksek ısıl iletkenliği sayesinde kaynak tekniği

olarak önemli bir yere sahip olsa da alüminyumun lazer kaynağında görülen zorluklardan biri olarak ışığı iyi şekilde yansıtması bildirilmektedir [14].

Lazer kaynağında kullanılan lazerler katı hal lazer ve gaz lazer sistemleri olarak iki sınıfa ayrılır. Lazer kaynağı işleminde lazer gücü, odaklama mesafesi, kaynak hızı ve koruyucu gaz sürece etki eden önemli faktörlerdendir. Şekil 3.7'de lazer ışın cihazının şematik resmi verilmiştir [25].



Şekil 3.7. Lazer ışın cihazı şematik gösterimi

3.4.7. Elektrik ark kaynağı

Elektrik ark kaynağı yönteminde uygun elektrik akımı kaynak makinesi aracılığıyla sağlanmaktadır. 4000 serisi alüminyum alaşımlarda elektrotla elektrik ark kaynağı diğer tekniklere göre sunduğu avantajlar sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [22]. Bu kaynak yönteminin alüminyum alaşımlarında şu avantajları bulunmaktadır :

- Oksi-asetilen kaynağı ile karşılaştırıldığında kaynak süresi azdır.
- Bölgesel ısınma oluştuğundan deformasyon riski düşüktür.
- İç köşe ve bindirme kaynaklarına uygundur.

- Tek geçiş ile daha kalın kaynak dikişi sağlanır.

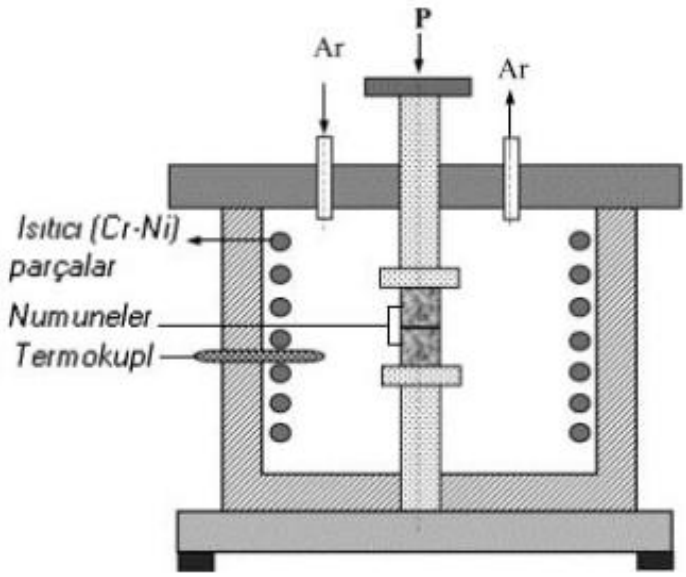
Ancak ana malzeme ile kaynak dikiş iç yapısının hızlı soğuma nedeniyle farklılık göstermesi ,elektrotların yanlış kullanılmasına bağlı gözenek oluşumu ve ince sacların kaynaklanamaması yöntemin dezavantajlarındandır [14].

3.4.8. Direnç kaynağı

Direnç kaynağı hem ısının hem de basıncın kullanımını gerektiren bir ergitme kaynak tekniğidir. İşlemin en basit hali nokta kaynak yöntemi olup basınç plakaların iki elektrot arasına sıkıştırılmasıyla sağlanır. Elektrotlar arasından akım geçirilmesiyle akıma karşı gösterilen dirençle ısı oluşumu meydana getirilir ve plakalar arasında kaynak işlemi gerçekleştirilir. Oluşan ısı akıma, akımın geçme süresine ve ara yüzey direncine göre değişir. Direnç, elektrotlar tarafından uygulanan basınca, elektrotların boyut, şekil, malzemesine ve ana malzemenin direncine, yüzey durumuna bağlıdır [12].

3.4.9. Difüzyon kaynağı

Difüzyon kaynağı yöntemi parçaların ergime sıcaklığının altında ve plastik akmaya neden olmayacak basınç koşulunda katı hal difüzyonu aracılığıyla parçalar arasındaki metalürjik bağ oluşumuna dayanan bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu teknik EC, 2EC, 1100, 1170, 6063, 6061, 2219, 7075 alaşımları gibi birçok alüminyum alaşımlarında kullanılabilir. Maksimum kaynak dayanımı ve bağlantı kolaylığı Ag, Cu, Ag-28 Cu ve Al folyo difüzyon yardımcısının kullanımı ile sağlanır. Şekil 3.8’de difüzyon kaynağının şematik resmi verilmiştir [14].



Şekil 3.8. Difüzyon kaynağı şematik gösterimi

3.4.10. Sürtünme kaynağı

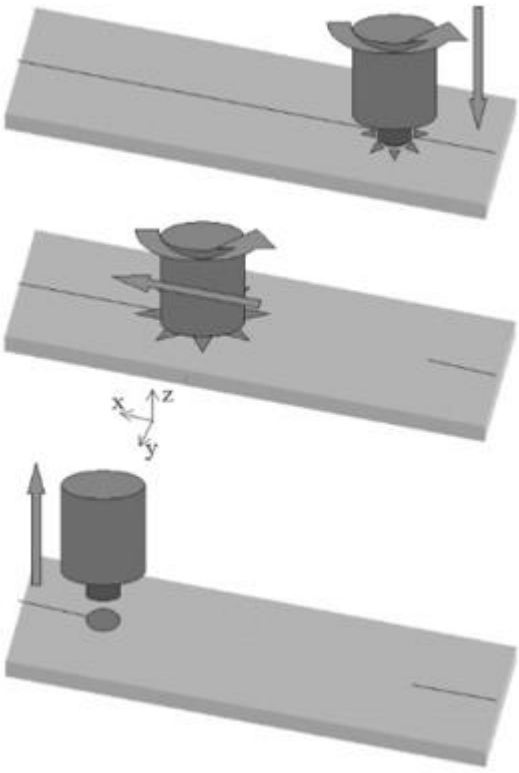
Sürtünme kaynağı, sürtünme ile mekanik enerjinin termal enerjiye çevrimi sayesinde oluşan ısıyla parçaların yüzeylerinin kaynaklandığı bir katı hal birleştirme yöntemidir. Kaynak sırasında sürtünen yüzeyler basınç altında bulunur. Sürtünme fazı olarak isimlendirilen bu aşama yüzeyde plastik şekil verme sıcaklığı elde edilene kadar devam eder. Genel olarak sürtünme fazı sonrasında basınç yükseltilerek ara yüzeydeki ısınmış metalin yığılması sağlanır ve bu sayede kaynak yeri termomekanik işleme maruz bırakılmış olur. Alüminyum–çelik, alüminyum–bakır, alüminyum-seramik gibi malzemeler, bu teknikle kaynaklanabilir [26].

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Sürtünme karıştırma kaynağı, İngilterede The Welding Institute (TWI) tarafından 1991 yılında patenti alınmıştır. Bu kaynak yöntemi ilk olarak kaynaklanması zor, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarına uygulanmıştır. Ancak sonrasında birçok malzemede kullanılmıştır. Bu yöntem, konvansiyonel tekniklerle kaynaklanabilirliği düşük olan alüminyum alaşımları gibi malzemelerin birleştirilebilmesine olanak vermektedir. Ayrıca SKK alüminyum, kurşun, magnezyum, çelik, titanyum, çinko, bakır gibi malzemelerin ve metal matrisli kompozitlerin kaynak edilebilmelerini mümkün kılmaktadır [27].

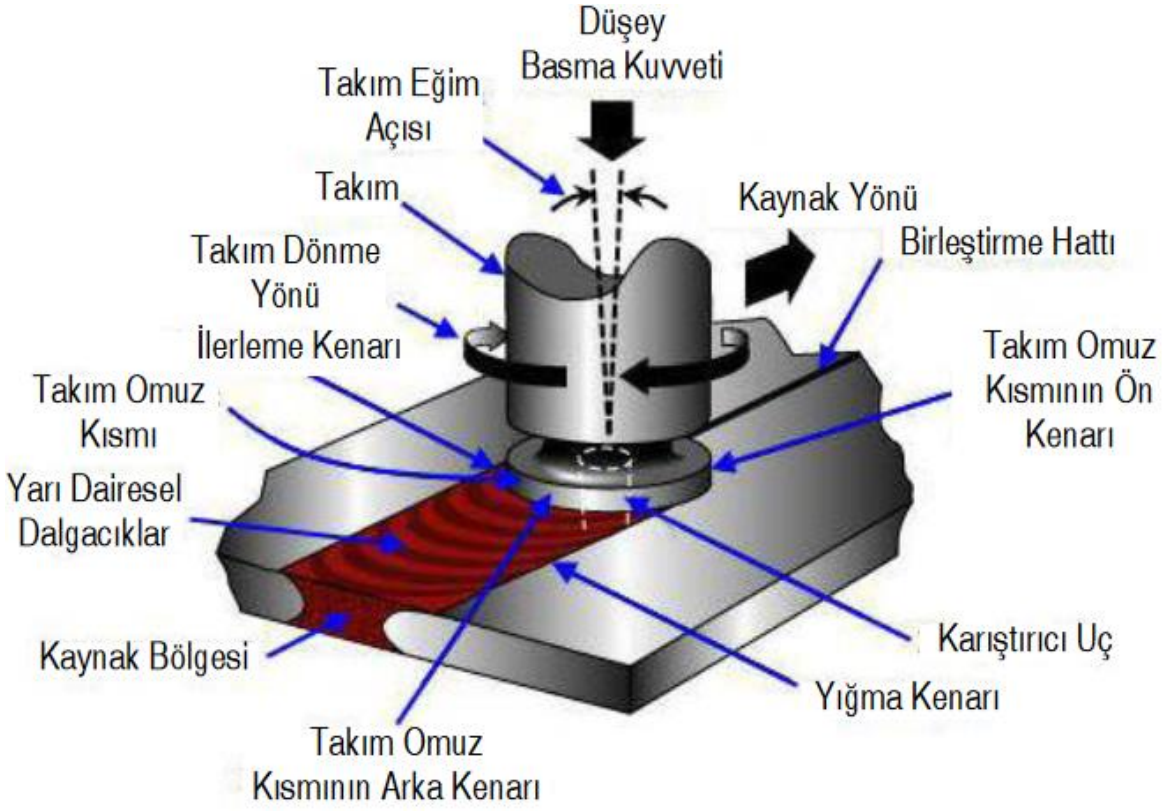
Sürtünme karıştrma kaynağında omuz ve delme işlemi yapmaya uygun karıştırıcı pimden (karıştırıcı uç) oluşan takım belli bir devire ulaştırılarak işparçasına daldırılması sağlanır ve sonrasında kaynak hattı boyunca ilerler. Pim ile malzemenin teması sonucunda temas bölgesinde sürtünmeden kaynaklı ısı açığa çıkar ve malzemede oluşan plastik değişim malzemenin akışını mümkün hale getirir. Sürtünme ısısından dolayı pim etrafı ile omuz iş parçası arayüzünde malzeme yumuşar ve pim çevresindeki yumuşamış malzemenin arka tarafa doğru karıştırılması sağlanır. Karışan malzemenin hidrostatik basınç altında soğuması ve katılaşmasıyla kaynaklama işlemi gerçekleşir [28].

SKK tekniği takımın dalması, beklemesi ve kaynaklaması şeklinde üç aşamada gerçekleşir. Dalma aşamasında, takım belirli dönme hızında getirilerek gerekli dalma derinliğine ulaşması sağlanır. Bekleme aşamasında ise amaç takımın sürtünme yoluyla ısı üretmesi ve çevresini yumuşatmasıdır. Bu doğrultuda takım belirli bir süre bekletilir. Son aşamada ise takım kaynak hattı boyunca ilerletilir. SKK da kaynağın kalitesi işleme parametrelerine ve takımın geometrisine önemli ölçüde bağlıdır [29]. Şekil 4.1'de işleme ait aşamalar gösterilmiştir [30].



Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi aşamaları

Takımın dönüşünün ilerleme yönüyle aynı yönde hareket ettiği taraf ilerleyen taraf, takımın dönüşünün ilerleme yönüne zıt olduğu taraf geri çekilen taraf (yığılan) olarak isimlendirilir. Sürtünme karıştırma kaynağı takımın eylemi altında kısıtlanmış bir ekstrüzyon işlemi olarak sayılabilir. Ekstrüde olan malzeme takımın arkasında bir katı faz birleştirme oluşturmak üzere yığılır. Deformasyona uğrayan malzemenin ekstrüde olması biçimi göz önünde bulundurulduğunda işlem asimetriktir [7]. Bu asimetri malzemenin iki tarafında ısı transferi, malzeme akışı ve özellikleri açısından farklılık oluşturur. Örneğin, yaşlandırma sertleşmesine uğramış alüminyum alaşımlarında sertlik ısıl etkilenmiş bölgede geri çekilen tarafta daha düşük olma eğilimindedir. Bu nedenle çekmede kopmalar buradan meydana gelir [31]. Bu teknik ekstrüzyon, haddeleme, dövme gibi işlemlere göre daha yüksek gerinimler üretir [7]. Şekil 4.2'de sürtünme karıştırma kaynağının şematik görüntüsü verilmiştir [17].



Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi

Takımın ürettiği ısı takım çevresindeki malzemeyi katı halden yumuşak plastik benzeri bir duruma dönüştürür. İşlemdeki maksimum sıcaklık malzemeye, takım tasarımına ve çalışma koşullarına bağlı olarak kelvin cinsinden erime sıcaklığının 0,8 katı veya alüminyum alaşımları için 0,95 katına yaklaşabilmektedir [32].

4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenleri

Kaynak ilerleme hızı, takım dönme hızı, dikey basınç, takım eğilme açısı ve takımın tasarımı, sürtünme karıştırma kaynağında değişkenlerdir. Isının oluşumu, sıcaklık alanı, soğutma hızı, kuvvet, tork ve güç bu parametrelerle ilgilidir. SKK işleminde sıcaklık artan dönme hızıyla artar ve artan ilerleme hızıyla ise azalır. Ayrıca artan eksenel basınçta sıcaklık artışına neden olmaktadır. SKK esnasındaki oluşan tork, takım tasarımı, malzemesi ve eğilme açısına, uygulanan basınca, takım-işparçası arasındaki lokal kesme gerilimine ve kaymaya ve sürtünme katsayısı gibi birçok parametreyle ilgilidir. Kaynak işlemindeki tork değerleri diğer parametreler sabitlendiği takdirde takım-işparçası arasındaki kayma seviyesinin ve takım etrafındaki akış geriliminin anlaşılmasını sağlayabilir. Dönme hızı

arttırıldığında sıcaklıktaki yükselişten dolayı tork azalır çünkü sıcaklık yükseldiğinde malzemenin akışı kolaylaşır. Yüksek ilerleme hızları sıcaklık oluşumunu azaltacağından malzeme akışının düşmesinden dolayı tork değeri bir miktar yükselmektedir.

Eksenel basınçta sürtünme karıştırma kaynağının kalitesinde etkiye sahiptir. Yüksek basınçlarda birleştirmelerde aşırı ısınma ve incelme görülür. Ayrıca yüksek basınçta işlem için gereken güç artmaktadır. Basıncın düşük olması ise gerekli ısıtmayı sağlamayamaz ve bağlantıda boşluk oluşumuna sebebiyet verebilir [31].

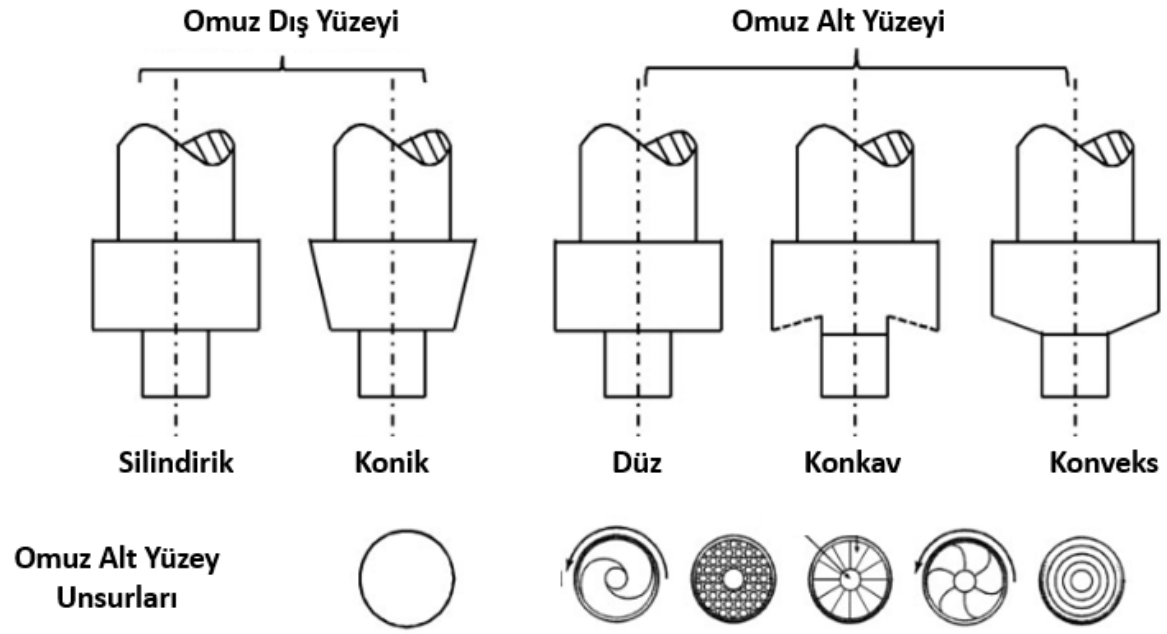
SKK işleminde kaynak parametreleri veya takım karakteristikleri doğru belirlenmediği takdirde kaynak kusurları görülebilir ve zayıf bir bağlantı elde edilebilir.

4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımı

Sürtünme karıştırma kaynağında takım tasarımı plastik akış, ısı üretimi, gerekli güç ve kaynağın homojenliği açısından önemlidir. Takımın omuz bölümü ısının büyük bir bölümünün üretilmesini sağlar ve plastik malzemenin omuz altından kaçmasını engeller. Ayrıca pim ile birlikte malzeme akışında etkiye sahiptir [31].

4.2.1. Sürtünme karıştırma kaynağında takım omuzları

Takım omuzları işparçasını sürtünmeyle ısıtma, kaynağın konsolidasyonu için aşağı doğru dövme hareketi sağlama ve ısıtılan metali omuz yüzeyinin altında tutabilme fonksiyonlarını yerine getirmek amacıyla tasarlanmaktadır. Literatürde sık karşılaşılan omuz tasarımları Şekil 4.3’de gösterilmektedir [33].

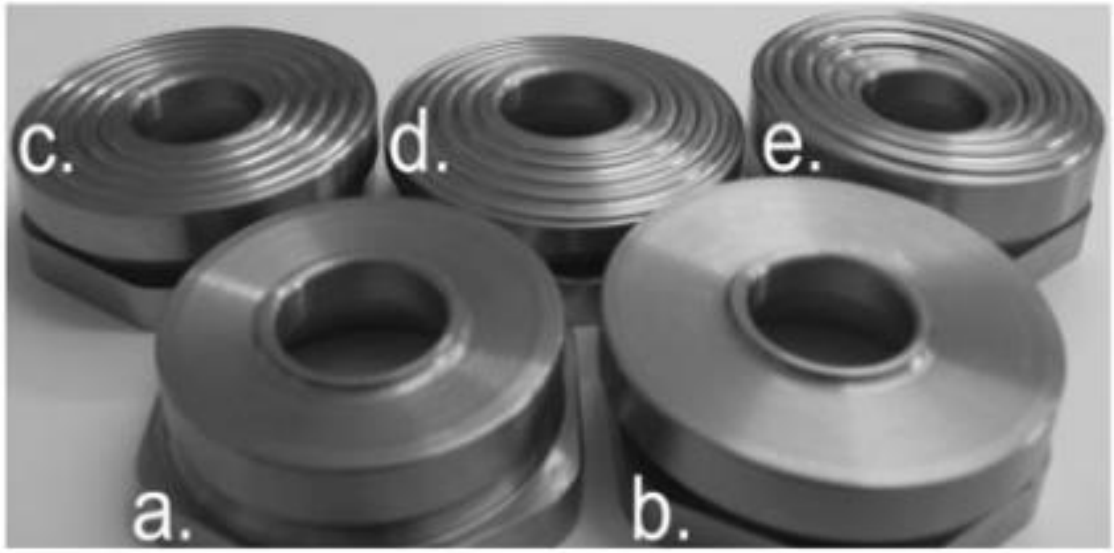


Şekil 4.3. Literatürde sık karşılaşılan takım omuz tasarımlarının şematik gösterimi

Omuz dış yüzeyi genelde silindirik olmakla birlikte nadiren konik tasarımında kullanıldığı bildirilmektedir. SKK da omuz kısmının dalma derinliği düşük olması nedeniyle omuz dış yüzeyinin kaynak kalitesinde önemli bir etkisi bulunmaz. Omuz alt yüzey profilinin tasarımında ise düz profil kullanmak en basit tasarım olmakla birlikte kaynak işlemi sırasında malzeme akışını omuz altında sınırlandırmakta ve tutmakta etkili bir tasarım değildir ve bu nedenle aşırı çapak oluşumuna neden olur. Düz profilin bu dezavantajı konkav profil tasarımıyla giderilmeye çalışılmaktadır. Konkav profil tasarımında malzeme omuz altında sınırlandırmaya çalışılır. Konkav omuz tasarımı düz profilli omuz tasarımına göre 6°-10° arası bir eğimde olacak şekildedir ve konkav profil pimin yer değiştirmesine neden olan malzeme için rezervuar görevi görür. Takımın ileri yönlü hareketi omuz altındaki kaviteye yeni malzemenin dolmasını sağlar ve varolan malzemeyi pimin arkasına iter. Konkav profil malzeme rezervuarının devamlılığı ve omuzun arka tarafında yeterli baskı kuvvetinin üretilebilmesi açısından takımın 1°-3° arası eğim ile çalışmasını gerektirir. Bir diğer omuz alt yüzey profili ise konveks omuz profildir. Konveks profil malzemenin pimin dışına doğru akışına neden olur. Konveks profille çalışmanın avantajı ise farklı kalınlık veya düzlemsellik içeren iki iş parçasının kaynağına olanak sağlamasıdır.

Omuz alt yüzeyi sürtünmeyi ve deformasyonu arttırmak bu sayede de iyi malzeme karışması ve yüksek kaynak kalitesi için unsurlar içerebilir. Omuz alt yüzeyindeki bu unsurlara örnek

olarak kıvrımlar, girinti/ çıkıntılar, oluklar ve eş merkezli daireler örnek verilebilir [33]. Şekil 4.4'de konkav (a, b), konveks (d) ve kıvrımlı (c, d, e) omuz tasarımlarına örnekler gösterilmiştir [34].

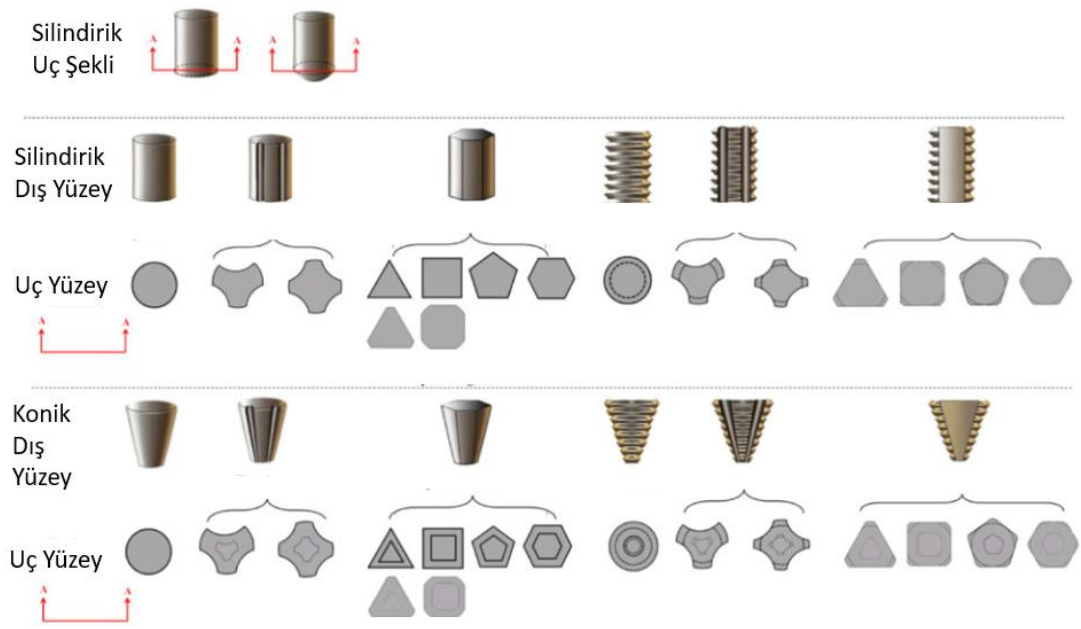


Şekil 4.4. Takım omuz alt yüzey tasarımlarına örnekler

4.2.2. Sürtünme karıştırma kaynağında takım pimleri

Sürtünme karıştırma kaynağında pimin tasarım amacı iş parçasında kesme mekanizması oluşturarak takımın önündeki malzemeyi arkaya doğru taşımaktadır. Literatürde sık karşılaşılan pim tasarımlarının şematik gösterimi Şekil 4.5'de verilmiştir [33].

Pim uç şekli düz veya kubbeli olabilir. Düz tabanlı pim üretim açısından kolaydır ve en sıklıkla kullanılan şekildir. Düz tabanlı pimin takımın plakalara dalışı sırasında yüksek dövme kuvveti oluşturması dezavantajdır. Yuvarlak veya kubbeli uç şekli dalma aşamasında dövme kuvvetini, takım aşınmasını azaltır ve pimin altındaki kaynak kökünün kalitesini de arttırabilir.



Şekil 4.5. Literatürde karşılaşılan takım pim tasarımlarının şematik gösterimi

Sürtünme karıştırma kaynağında takım pimleri genellikle silindirik veya konik dış yüzeye sahiptirler [33]. Pimin dönüş esnasındaki dinamik süpürme hacminin statik hacime orantısı önemli bir parametredir. Bu nedenle, kalın iş parçalarının kaynağında silindirik karıştırıcı yerine hacim olarak % 60-% 70 azaltımış olan konik uç tercih edilir. Konik uç kullanımıyla kaynak sırasındaki kuvvet de düşürülür. Ayrıca pim üzerine çeşitli işleme yapılarak bu oranın yükseltilmesi mümkündür. Böylelikle pim çevresinde ve altında malzeme akışı geliştirilmektedir [17]. Örneğin, saat yönünde dönüşte sol dişli unsurlu pim kullanımı, malzemenin pim yüzeyi boyunca dişler tarafından aşağı doğru çekilmesini sağlar ve malzeme takımın arkasına yığılmadan önce takım etrafında birçok kez dolaşabilir. Bu sayede malzeme karışması ve boşluk kapanması desteklenmiş olur. Ancak dişli unsurlar kolayca aşınabileceğinden yüksek dayanıma sahip veya aşındırıcılığı fazla alaşımlarda dişsiz pimler tercih edilir [33]. Şekil 4.6'da SKK da kullanılan bazı pim tasarımlarına örnekler verilmiştir [17].



Şekil 4.6. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak uçlarına örnekler

Pim üstünde düzlükler ve oluklar da bulunabilmektedir. Düzlükler malzemenin önce tutulup ve sonra takımın arkasına salınmasını sağlayarak daha etkili karıştırma görevi görür. Oluklara sahip dişli pimlerde benzer bir biçimde malzemenin tutulması açısından işlevlidir.

Sürtünme karıştırma kaynağındaki malzeme akışının anlaşılmasında kaydedilen gelişmeyle birlikte farklı takım geometrileri de ortaya çıkmaktadır. Konvansiyonel silindirik dişli pimle 12 mm kalınlığına kadar alüminyum alaşımları başarılı şekilde kaynaklanabilmektedir. Kalın plakalarda ise malzeme akışı ve karıştırılmasını arttırmak ve kaynak kuvvetlerini azaltmak amacıyla pime daha karmaşık unsurlar eklenmektedir. TWI tarafından geliştirilmiş Whorl ve MX Triflute takımları, 50–60 mm kalınlığa kadar olan alüminyum alaşımlarını kaynaklanmasında kullanılmaktadır. Geliştirilen bu takımlar yüksek hızlarda kaynak yapma ve iyi yüzey kalitesine sahip birleştirmeler sunabilmektedir. Whorl takımı kullanılarak 75 mm kalınlığında 6082-T6 levha alt ve üst yüzeyden olmak üzere toplamda iki pasoda birleştirilmiştir. Ek olarak Whorl ve MX Triflute takımlarıyla 50 mm kadar olan kalınlıkların tek pasoda kaynaklanabileceği bildirilmektedir. Şekil 4.7’de TWI da tasarlanan sürtünme karıştırma kaynağı takımları gösterilmiştir [33].



Şekil 4.7. TWI da tasarlanan sürtünme karıştırma kaynağı takımları

Bahsedilen takımlara ek olarak kaynak kalitesini arttırmak amacıyla olukların dışa doğru genişlediği Flared Trifule ve pim ekseninin eğimli olduğu A-skew isimli pim geometrileri geliştirilmiştir. Bu pim geometrileri aşağıda listelenen avantajları sunmaktadır.

- Süpürme oranını arttırarak pim altındaki ve çevresindeki akış yollarını yükseltmek
- Kaynak bölgesini genişletmek
- Karıştırma işlemini iyileştirmek ve kaynak arayüzünde oksit parçalanmasını ve dağılmasını geliştirmek
- Kaynak kökünde yörüngesel bir dövme hareketi sağlamak ve bu bölgedeki kaynak kalitesini geliştirmek

Geleneksel dişli takımlara göre Flared Triflute ve A-skew pimler, kaynak hızını arttırmakta, eksenel dövme kuvvetinde azalma sağlamakta ve önemli ölçüde genişleyen kaynak bölgesi sunmaktadır. Bu nedenle Flared-Triflute ve A-skew pimleri bindirme ve T kaynak konfigürasyonları için tavsiye edilmektedir [33].

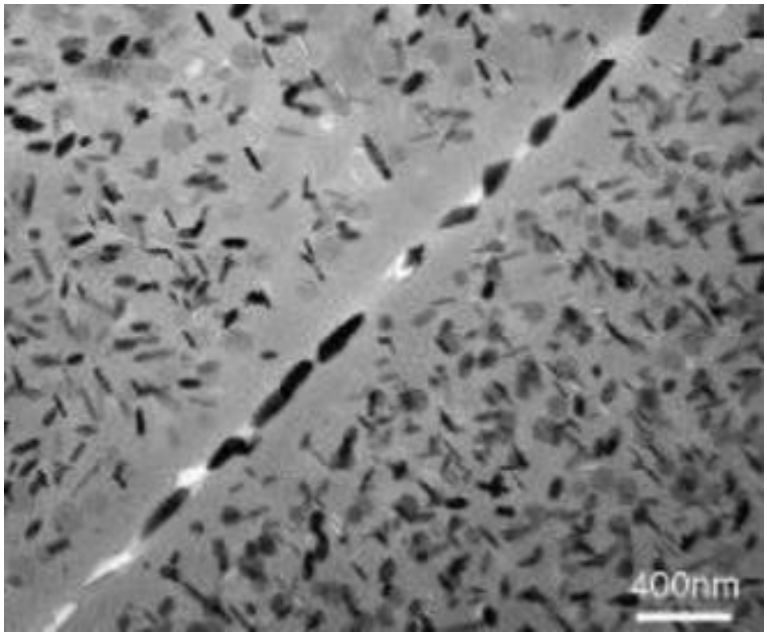
4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mikro Yapısı

SKK yönteminde oluşan kaynak dikişi simetrik değildir ve kaynak metali biçim olarak birleştirilen alaşıma ve kaynakta kullanılan değişkenlere göre farklılık gösterir [28].

Sürtünme karıştırma kaynağında malzeme ergimez ve ısı girdisi de yüksek olmaması nedeniyle ısıl etkilenen bölgenin boyutları dardır. Sürtünme karıştırma kaynağındaki metalürjik yapı dıştan içe doğru ana malzeme, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) olarak sıralanmaktadır.

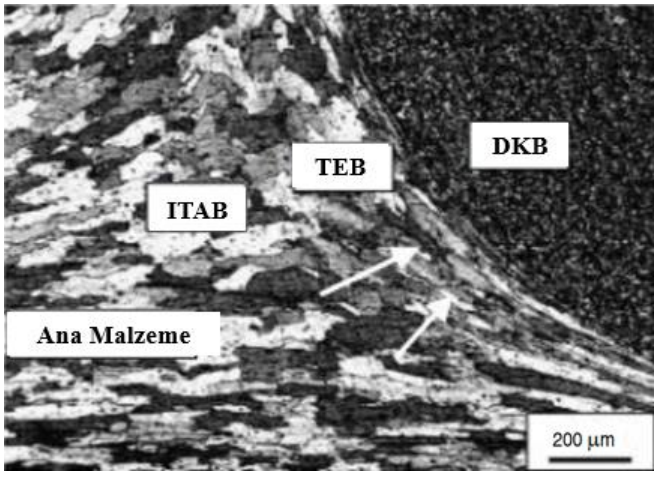
Ana malzeme takımın nüfuz ettiği bölgeden uzakta olduğundan dolayı ısıdan etkilenmez ve plastik deformasyona uğramaz. Dolayısıyla malzemenin özelliklerinde ve mikroyapısında değişim gözlenmez.

Isının tesiri altında kalan bölgede (ITAB) plastik deformasyon olmazken malzeme kaynak sırasında oluşan ısıdan etkilenir ve özelliklerinde değişim meydana gelir. Sürtünme karıştırma kaynağında ITAB bölgesi ergitme kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında dardır [14]. Çökelme sertleşmesi ısıl işlemi gören bazı alüminyum alaşımlarında ITAB sıcaklığı 250 °C'yi geçmezse taneler ana malzemenin özelliklerini korurlar ancak 250 °C geçilirse tane irileşmesi ve tane sınırlarında çökeltiler meydana gelebilir. Şekil 4.8'de tane sınırlarında çökelti toplanmasına örnek gösterilmiştir [17].



Şekil 4.8. Isının tesiri altındaki bölgede tane sınırlarında toplanan çökeltiler

Termomekanik olarak etkilenen bölgede (TEB) takımın karıştırma etkisiyle açığa çıkan ısı TEB deki yapı ve özellikleri değiştirir. Isı ve plastik deformasyon nedeniyle kısmi ince taneli yapı meydana gelir. Alüminyum için TEB bölgesinde yeniden kristalleşme olmamaktadır [14]. Deforme olan taneler, uzamış ve yassılaşmış tane özelliği gösterir. Şekil 4.9'da TEB bölgesinde tanelerin uzayarak yönlenmesine örnek gösterilmiştir [17].

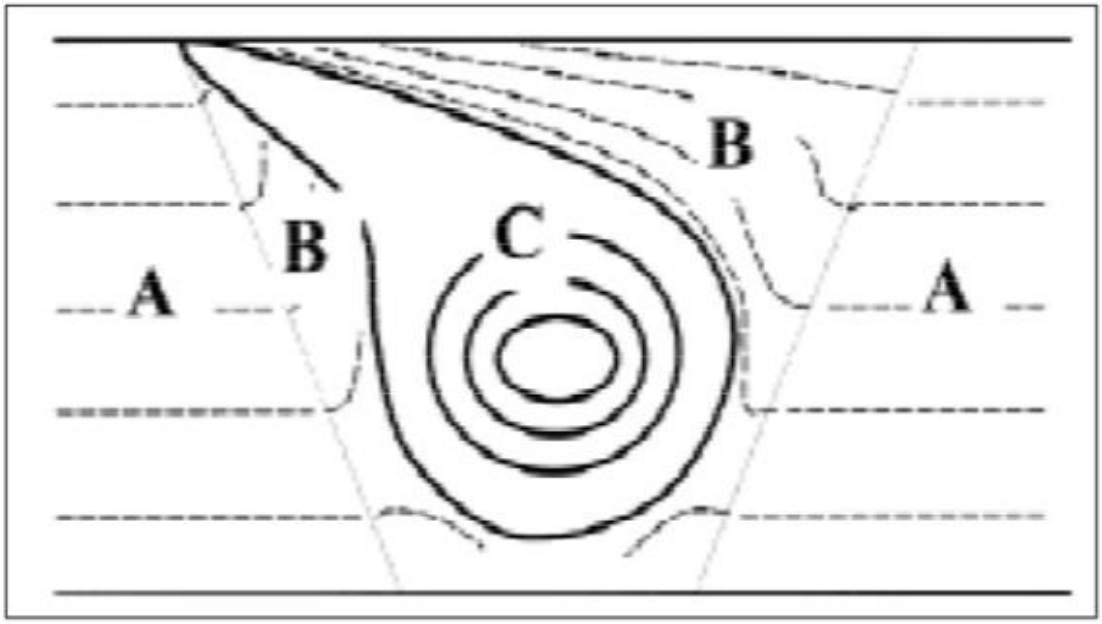


Şekil 4.9. TEB bölgesinde tanelerin uzayarak yönlenmesi

Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede (DKB) aşırı plastik deformasyon ve ısı ile malzemenin özellikleri ve mikroyapısının farklılaştığı alandır. Metal yığını şeklindedir ve alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşen alandır. Yapı olarak soğan halkası gibi birçok

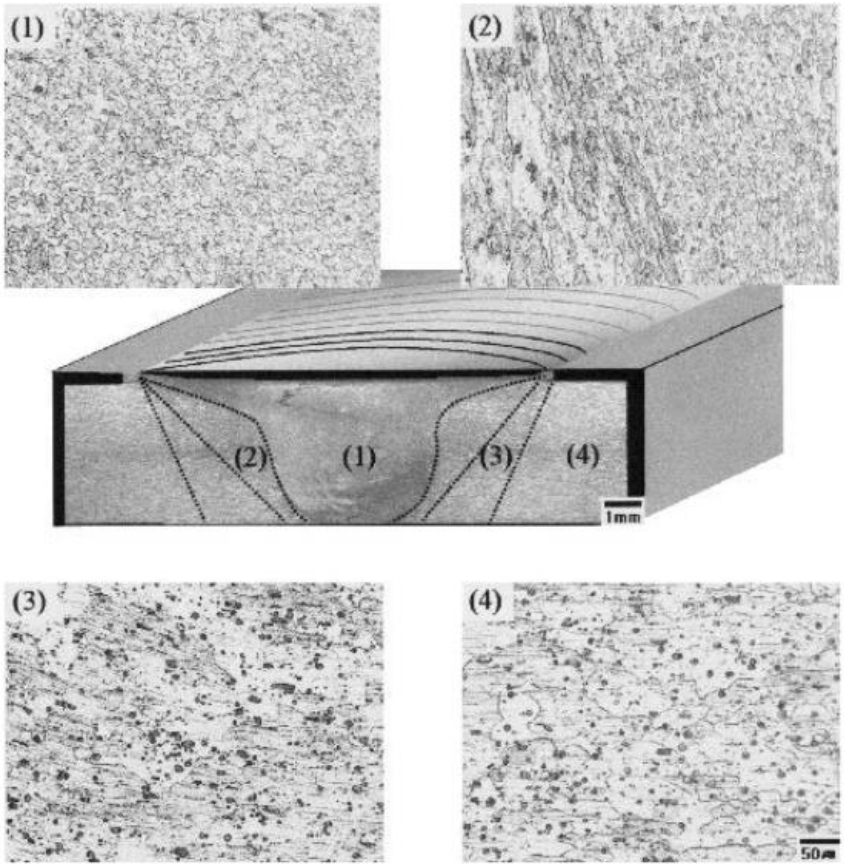
konsantrik halkadan oluşur [14]. Bu bölge kaynak merkezi olarak da ifade edilebilir. Dislokasyon yoğunluğu azdır ve daha ince yönlenmiş taneler bulundurur [17].

Şekil 4.10'da yukarıda açıklanan SKK kaynak bölgelerinin şematik resmi verilmiştir [35].



Şekil 4.10. SKK bölgeleri A) ITAB, B) TEB, C) DKB

Şekil 4.11'de bu tez çalışmasında iş parçası olarak seçilen sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş Al 6061-T6 alaşımına ait tipik kesit görüntüsü verilmiştir [36].



Şekil 4.11. Al 6061-T6 tipik görüntüsü, 1) DKB, 2) TEB, 3) ITAB, 4) Ana Malzeme

4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları

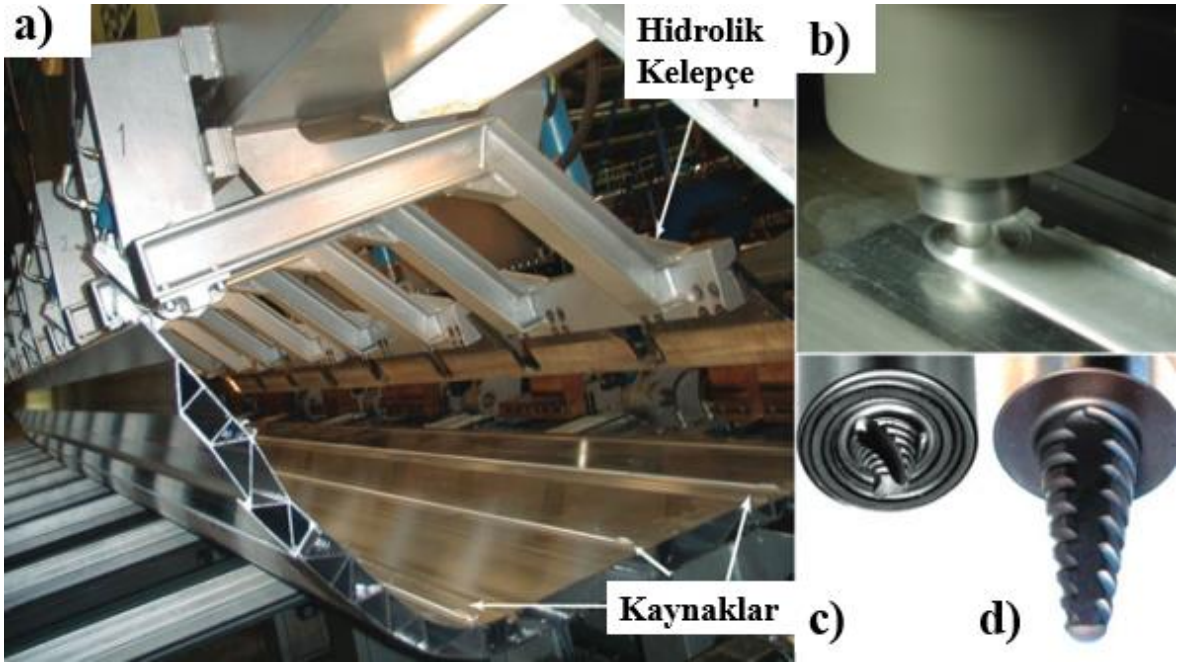
Bu bölümde SKK yönteminin uygulama alanlarına örnekler verilmiştir.

SKK tekniğinin özellikle kaynağı zor olan malzemelerde otomasyona uygunluğu, hızlı kaynak yapılabilmesi ve yüzey hazırlama ihtiyacının en az seviye olması gibi avantajları olması bu işlemi önemli bir alternatif haline getirmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı konvansiyonel ergitme kaynak teknikleriyle birleştirilmesi zor olan yaşlandırma sertleştirilmesi uygulanmış alüminyum alaşımlarında kullanılabilmesiyle de ön plana çıkmaktadır [28].

Sürtünme karıştırma kaynağı için ticari olarak üretilmiş tezgahlar bulunmaktadır ancak işlem konvansiyonel dik frezeyle de yapılmaktadır. SKK ile alüminyum alaşımları için tek pasoda 50 mm, çift taraflı kaynakta 100 mm kalınlığa kadar levhaların alın kaynağı mümkün olmaktadır. SKK bindirme kaynağında da kullanılabilmektedir. Gemi inşaatı, havacılık sanayi, hızlı tren imalatı ticari olarak kullanımına örnek olarak verilebilir. Yolcu uçaklarında

alüminyum yapılar için kullanımının önemli bir potansiyel oluşturduğu ve bu konuda çalışmalarında devam ettiği bildirilmektedir [35].

Şekil 4.12'de demiryolu sektöründe kullanılmakta olan ticari bir SKK düzeneği gösterilmiştir [7].

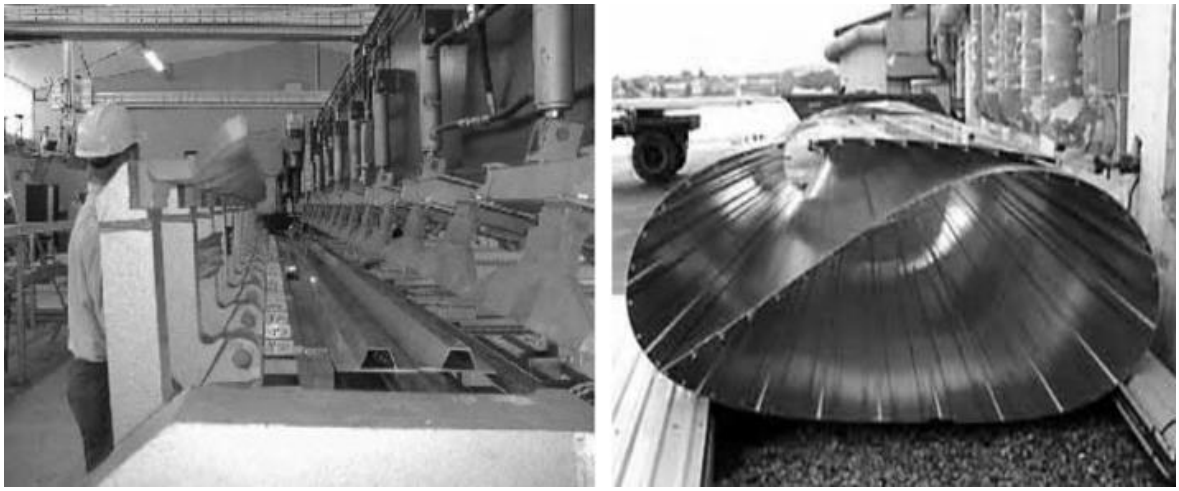


Şekil 4.12. a) SKK makinesi, b) kaynak kafası, c) Triflute MX takımı, d) Triflat takımı

Bu kaynak tekniği uçak, otomotiv, gemi, uzay sektöründe de kullanılmaktadır. Radyoaktif atık madde taşıyıcılarının imalatında ihtiyaç duyulan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 sınıfı alüminyum alaşımlarında, bakır alaşımlarında, titanyum alaşımlarında ve bazı çeliklerde de kullanımı mevcuttur [28].

Endüstride alüminyum panellerin kaynaklanmasında kullanılmıştır. Bu işlemde ergitme olmamasından dolayı panellerdeki çarpılma, kalıntı gerilmeler en az seviyede kalmaktadır [35]. Korozyona dayanıklı 2000, 5000, 7000 serisi paslanmaz alüminyum alaşımlarının kullanımının olduğu zırhlı araçlarda bazı panellerin kaynağında da kullanılmıştır [17].

Şekil 4.13'de sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum paneller gösterilmiştir [35].



Şekil 4.13. SKK ile birleştirilen alüminyum ekstrüzyon paneller

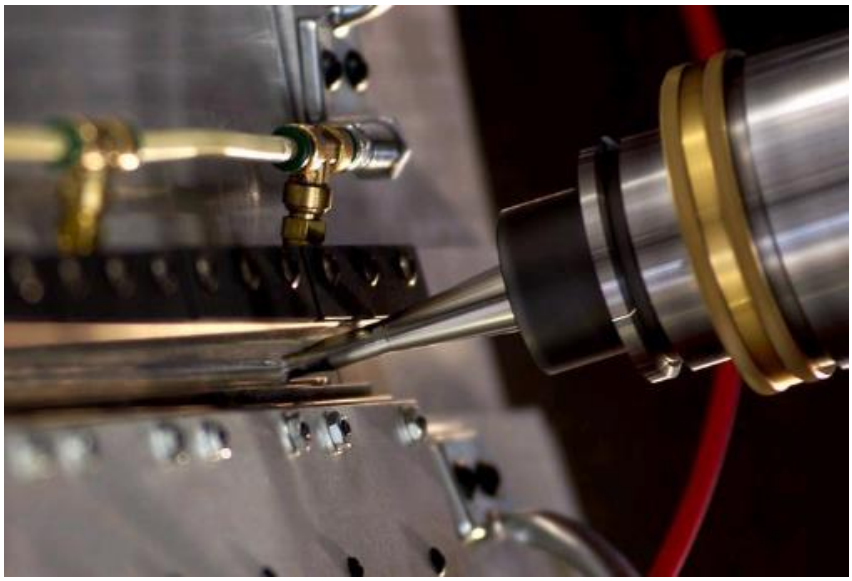
Şekil 4.14'de gemicilik sektöründe sürtünme karıştırma kaynağıyla alümünyum gemi panellerinin birleştirilmesi için kullanılan makine gösterilmiştir [17].



Şekil 4.14. Alüminyum gemi panellerinin birleştirilmesinde kullanılan SKK makinesi

SKK nın önemli avantajlarından biri alüminyum alaşımlarında ve özellikle de 2000 serisi alaşımlarda kaynak yapabiliyor olmasıdır. Bu alaşımlar havacılıkta gövde ve kanat panellerinde yüksek mukavemet ağırlık oranlarından dolayı kullanılırlar. Oksidasyon, katılaşma, büzülme, çatlak hassasiyeti, hidrojen çözünürlüğü ve gözeneklilik gibi problemler nedeniyle füzyon kaynakları ile çoğu zaman kaynaklamaz. Bu nedenle çoğu uçak yapısal parçası perçinleme ile mekanik olarak bağlanmaktadır. Bu alaşımların SKK ile kaynaklanabiliyor olması büyük bir fırsat sunmaktadır. SKK bu anlamda perçinleme yöntemine sunduğu daha iyi yorulma dayanımı, yapısal bütünlük ve ağırlık azaltımı açısından daha iyi bir alternatif oluşmaktadır [37].

Sürtünme karıştırma kaynağı Eclipse 500 uçağında kullanılmıştır. SKK ile otomatik perçinle birleştirmeye göre 6 kat, elle perçinlemeye göre 60 kat daha hızlı üretim yapılabildiği bildirilmektedir. Şekil 4.15'de bu uygulama gösterilmiştir [27].

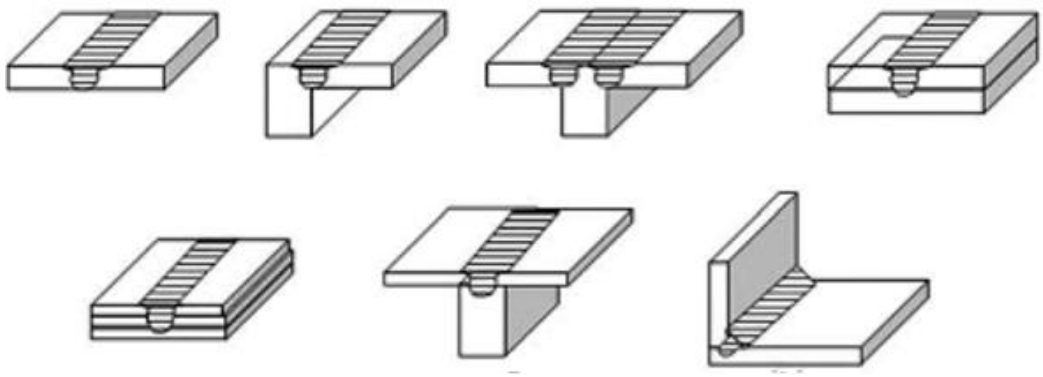


Şekil 4.15. Sürtünme karıştırma kaynağının Eclipse 500 uçağında uygulaması

Şekil 4.16'da SKK nın havacılık alanında kullanımlarına örnekler gösterilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı alın, kenar, T-alın, üst üste, T-üst üste ve dolgu birleştirmelerde kullanılabilmektedir.Şekil 4.17'de bu kaynak uygulamaları şematik olarak gösterilmektedir [17].

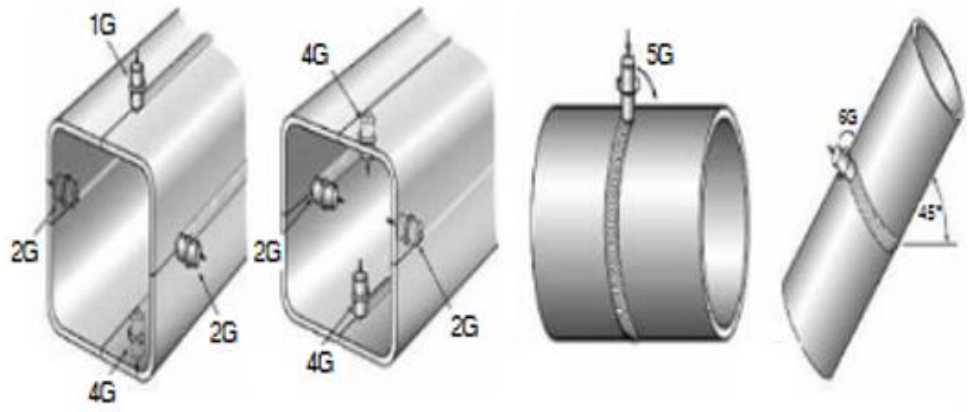


Şekil 4.16. Havacılıkta SKK kullanımı; türbin kanatları, birleştirmeler, roket yakıt tankı



Şekil 4.17. SKK alın ve bindirme kaynağı uygulamaları

SKK yönteminin dayanımı yüksek olmayan malzemelerden T ve L profil imalatında ve boru bağlantı birleştirmelerinde uygulama alanı mevcuttur. Şekil 4.18'de bu uygulamaya ait şematik görüntü verilmiştir [17].



Şekil 4.18. SKK boru kaynağı uygulaması şematik görüntüsü

5. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde sürtünme karıştırma kaynağında takımın dönme hızı ve ilerleme hızıyla ilgili yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Bilgin ve Meran 3 mm kalınlığındaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte farklı takım dönüş ve ilerleme hızlarını sürtünme karıştırma kaynağı işleminde çalışmışlardır. Takım dönüş hızları 560-1400 dev/dk ilerleme hızları ise 80-200 mm/dk aralığında değişmektedir. Çalışmalarında takımın artan dönme hızlarında sıcaklıkta artma, artan ilerleme hızlarında ise sıcaklıkta azalış gözlemlemişlerdir. Bu duruma parametrelerin değişikliğine bağlı olarak sürtünme kuvvetindeki değişimin neden olabileceği sonucu çıkarılmıştır. İlerleme hızı ve diğer parametreler sabit tutulduğunda en iyi çekme mukavemeti 1120 dev/dk değerinde alınmıştır. 1120 dev/dk değeri sabit tutularak ilerleme hızının değişimi incelendiğinde ise 125 mm/dk ilerleme hızı değeri en yüksek çekme mukavemetini vermektedir [38].

Çetkin, Çelik ve Temiz 5 mm kalınlığındaki AA5182 ve AA7075 malzemeleri alın konfigürasyonunda sürtünme karışma kaynağı kullanarak kaynaklamışlardır. Takım dönme devri, takım ilerleme hızı ve takım uç geometrisini değişken olarak kullanılıp başarılı bir şekilde kaynak yapılmış ayrıca mekanik özellikler ve mikroyapı incelenmiştir. Dönme hızı olarak üç farklı (980, 1325, 1800 dev/dk) parametre ilerleme hızı olarak iki farklı (108, 233 mm/dk) parametre çalışılmıştır. Konik helisel uç kullanılarak 980 dev/dk dönme hızı ve 108 mm/dk ilerleme hızında çekme testinde maksimum çekme kuvveti kaydedilmiştir. Bunun nedeni olarak da helisel konik kanalların üçgen profilli pime göre malzemenin daha iyi bir şekilde karışmasını sağlaması gösterilmiştir. Karıştırma mekanizmasının geliştirilmesi devir başına taşınan ve geriye doğru ekstrüzyonu sağlanan malzemeyi arttırmakta ve plastik deformasyon oluşumunu hızlandırmaktadır [39].

Şık ve Kayabaş 4 mm kalınlığında AA 1050 levhaları alın konfigürasyonunda sürtünme karıştıma kaynağı tekniğiyle birleştirmiştir. Karıştırıcı ucun dönme hızı ve ilerleme hızı değişken olarak belirlenip mekanik özellikler çalışılmıştır. 1000 dev/dk, 1500 dev/dk, 2500 dev/dk dönme hızı ve 120 mm/dk, 200 mm/dk ilerleme hızları kullanılarak çift ve tek taraflı kaynak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan parametrelerle sabit ilerleme hızında dönme hızı arttırıldığında ısı girdisinin yükselmesinden dolayı sertlikte ve çekme mukavemetinde

azalma görüldüğünden dönme hızı artarken ilerleme hızı da arttırılarak ısı girdisinin düşmesi sayesinde mekanik özelliklerde iyileşme sağlanmıştır. Çekme deneyinde kopmalar ITAB bölgesinden olmuştur. Bu da DKB bölgesinin mukavemet değerinin ITAB bölgesinden yüksek olduğunu göstermektedir. Malzemeye ısı girdisi arttığında ITAB bölgesinde mukavemeti arttıran partiküller homojen olmayan, kaba bir şekilde çökelmektedir. Deneylerde en yüksek sertlik 1000 dev/dk ve 120 mm/dk hızlarında kaynak metalinde 31,6 HV, ITAB da 29 HV, ana metalde 39,3 HV, en düşük sertlik 2500 dev/dk ve 120 mm/dk hızlarında kaynak metalinde 27,1 HV, ITAB da 27,2 HV, ana metalde 39,3 HV olarak tespit edilmiştir [28].

Maneiah ve diğerleri 3 mm kalınlığındaki Al 6061-T6 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağını çalışmışlardır. Dönme hızı, ilerleme hızı ve takım eğilme açısını değişken olarak kullanmışlardır. 560, 900, 1400 dev/dk dönme hızları, 20, 63, 100 mm/dk ilerleme hızları ve 0, 0,5, 1 derecelik eğilme açılarını parametre olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme mukavemetini 191 MPa olarak dönme hızının 1400 dev/dk, ilerleme hızının 100 mm/dk ve takım eğilme açısının 0 derece olduğu durumda tespit etmişlerdir [40].

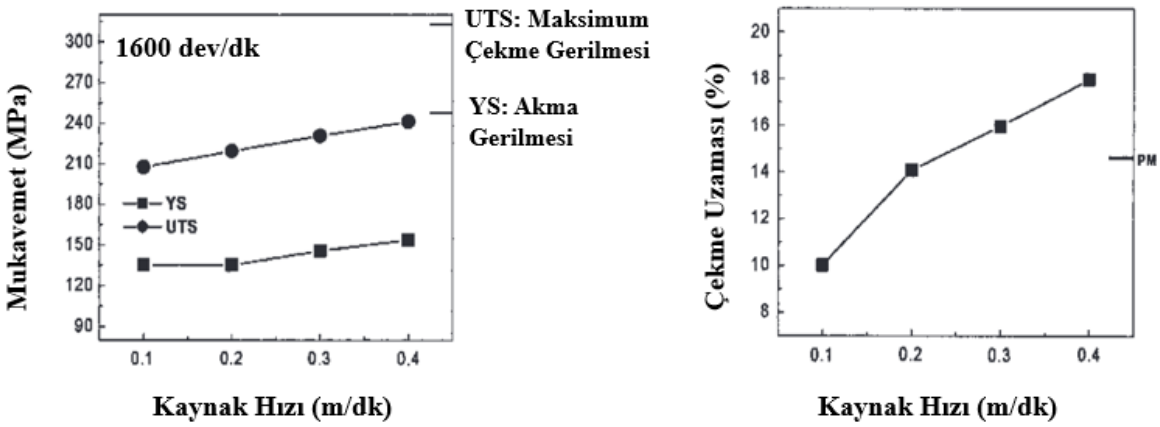
Dorbane ve diğerleri 3 mm kalınlığında Al 6061-T6 malzeme kullanarak sürtünme karıştırma kaynağını 1600 dev/dk dönme hızında 250, 500, 750 ve 1000 mm/dk ilerleme hızlarında çalışmışlardır. Optimum mikroyapı ve mekanik özelliklerin 1600 dev/dk dönme hızında ve 1000 mm/dk ilerleme hızında elde edildiği bildirilmiştir. Şekil 5.1'de 250 mm/dk ilerleme ve 1600 dev/dk dönme hızında farklı kaynak bölgelerinin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.1'de malzeme mikroyapıları görünmekte olup ana metalde taneler eliptik şekle sahip haddelenmiş bir mikroyapı göstermektedir. Yapı içinde intermetalik bileşikler ya da demir olarak zengin fazlar (gri renkli oluşumlar) görülebilir. ITAB bölgesinde plastik deformasyon oluşmaz ancak termal çevrimden etkilenir ve bölgede ana metale göre daha büyük bir tane yapısı görülür. TEB bölgesinde plastik deformasyon ve sıcaklığın neden olduğu ince taneli yapı oluşur. Karıştırma bölgesininde ince eş eksenli çözünmemiş bazı demir içeren fazlar görülebilir [41].



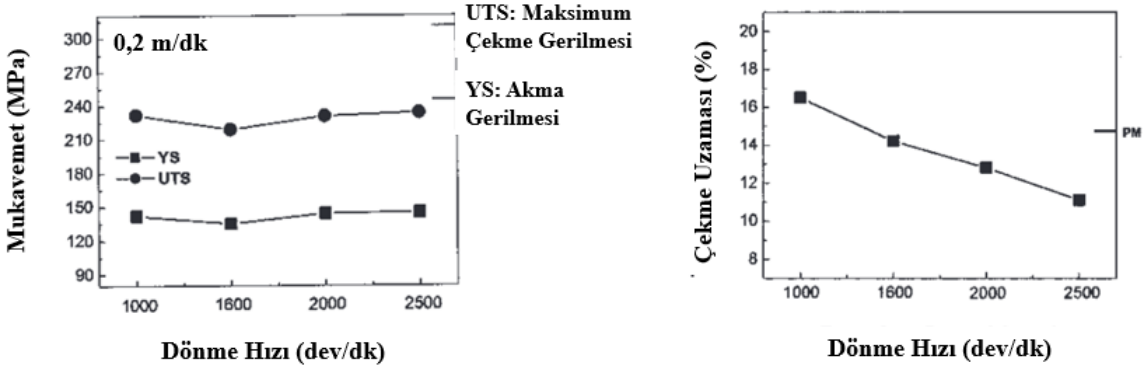
Şekil 5.1. Dorbane vd. çalışmasında kaynak bölgelerinin optik mikroskop görüntüsü

Lim ve diğerleri sürtünme karıştırma yöntemiyle 4 mm kalınlığında Al 6061-T6 malzemenin 1000, 1400, 1600, 2000, 2500 dev/dk dönme hızlarında ve 0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 m/dk ilerleme hızlarında çekme mukavemetini incelemişlerdir. İlerleme hızının azalışı veya dönme hızının artışı uzamayı azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Mikrografik ve fraktografik incelemeler sonucunda Al 6061 malzemenin çekme davranışındaki değişimin kaynak bölgesindeki plastik akış kaynaklı dönme ve savrulma nedeniyle kaba Mg_2Si çökeltisinin kümelenmesinden dolayı olduğu sonucuna varılmıştır. Düşük ilerleme hızı veya yüksek dönme hızı plastik akışı desteklemekte ve kaba çökeltilerin DKB den savrularak kümelenmesine neden olmaktadır. Çekme kırılması, her zaman geri çekilen bölge tarafında

oluşmuştur. Kaynak değişkenlerinden bağımsız olarak, TEB ile ITAB arasındaki sınır bölgenin en düşük sertlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de çalışmalarındaki ilerleme ve dönme hızlarının mukavemet ve uzama olan etkileri gösterilmiştir [36].



Şekil 5.2. Çalışmadaki farklı ilerleme hızlarında mukavemet-uzamadaki değişim



Şekil 5.3. Çalışmadaki farklı dönme hızlarında mukavemet-uzamadaki değişim

Emamian ve diğerleri farklı pim profillerini çeşitli dönme ve ilerleme hızlarında Al 6061 malzeme için incelemişlerdir. Üç farklı dönme hızı ve ilerleme hızı belirlenerek dişli silindirik, konik, step konik ve kare pin profilleri test edilmiştir. En iyi birleştirmeyi dişli silindirk pin profiliyle dönme hızının 1600 dev/dk ve ilerleme hızının 40 mm/dk olduğu durumda bulunmuştur [42].

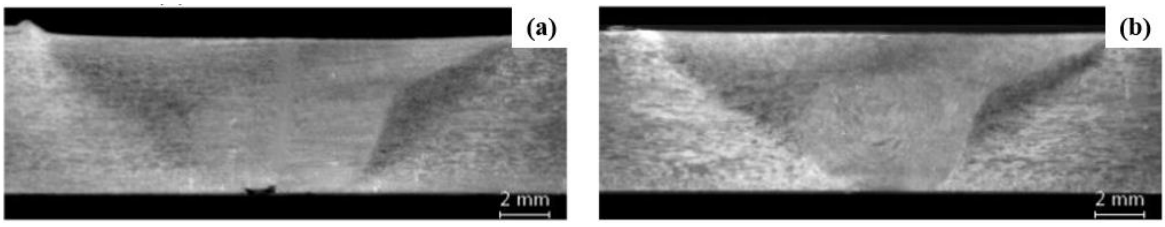
Ahmadi ve diğerleri sürtünme karıştırma kaynağında ilerleme hızı, dönme hızı ve pim profillerinin etkisini Al 6061 plakalar kullanarak incelemişlerdir. Her pim profili için yüksek

sertlik ve çekme mukavemeti düşük dönme hızları ve yüksek ilerleme hızlarında elde edilmiştir [43].

Kumbhar ve Bhanumurthy 5 mm kalınlığında Al 6061 plakaları 710, 1120 ve 1400 dev/dk dönme hızları ve 63, 80 ve 100 mm/dk ilerleme hızlarını kullanarak sürtünme karıştırma kaynağını çalışmışlardır. Çalışmada 25 mm omuz çapına, 5 mm pim çapına ve 4,8 mm pim uzunluğuna sahip takım kullanılmıştır. Hatasız kaynakların düşük dönme hızı ve yüksek ilerleme hızı koşullarında elde edildiği bildirilmektedir [44].

Heidarzadeh ve diğerleri 4 mm kalınlığındaki Al 6061 malzeme için sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklı birleştirmelerin çekme özellikleri % 95 güven mertebesinde öngören matematiksel model üzerine çalışmışlardır. Araştırmalarında kaynak parametleri olarak takım dönme hızı, ilerleme hızı ve eksenel kuvveti belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek çekme mukavemeti için parametrelerin 920 dev/dk, 720 mm/dk ve 7,2 kN olduğu, en yüksek çekme uzaması için 1300 dev/dk, 60 mm/dk ve 8 kN olduğu tespit edilmiştir [45].

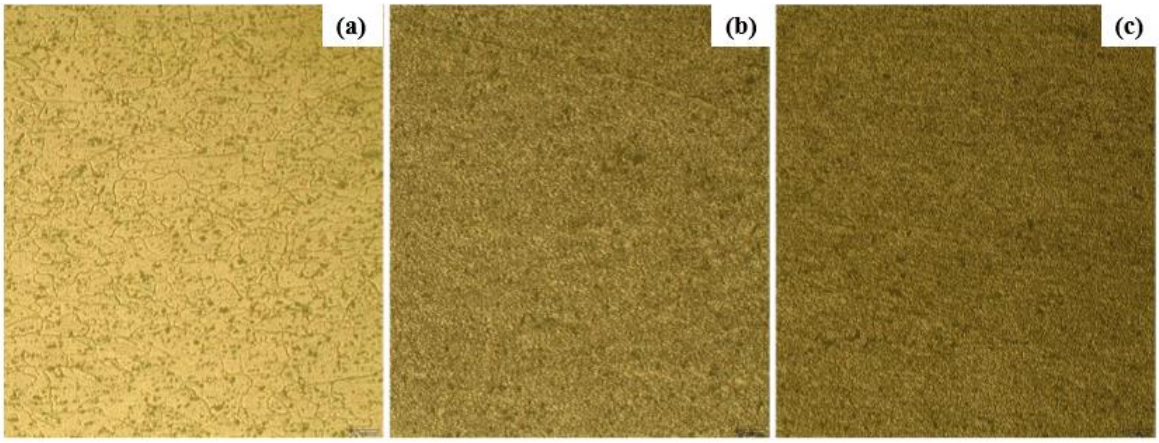
İpekoğlu, Akçam ve Çam araştırmalarında farklı kalınlıklara (3, 4, 5 ve 6,2 mm) sahip 6061-T6 malzeme için sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak hatasız kaynaklamalar için parametreler oluşturmak için çalışmışlardır. Her bir plaka kalınlığı için 1000 dev/dk dönme hızı altında iki farklı ilerleme hızı test edilmiştir. Kaynaklı parçalardan çıkarılan numunelerin makro görüntüleri incelendiğinde 1000 dev/dk hızında kaynak bölgerinde bir hata ile karşılaşılmamıştır.



Şekil 5.4. 1000 dev/dk da görüntüler; ilerleme hızı: a) 75 mm/dk, b) 100 mm/dk

Tüm plaka kalınlıklarında iç yapı alfa taneleri ve optik mikroskop ile tespit edilebilen alfa matrisinde dağınık halde bulunan intermetalik bileşiklerden meydana gelmektedir. Alfa matrisinde rastgele dağılan Fe_3SiAl_{12} partikülleri ve yuvarlak, büyük Mg_2Si partikülleri

bulunmaktadır. 6061-T6 alaşımının yapısında yaşlandırma sertleştirmesi neticesinde meydana gelen malzemeye yüksek dayanım özelliği kazandıran ancak zor tespit edilen Mg_2Si çökelti partikülleri vardır. 3 mm kalınlığındaki plaka 1000 dev/dk dönme hızında kaynaklandığında DKB bölgesinde tane rafinasyonu oluşmakta ve ilerleme hızının arttırılmasıyla ısı girdisinin azalmasından dolayı tane rafinasyonu da artarak daha ince taneli yapı elde edilmiştir.



Şekil 5.5. a) Ana malzeme, b) 100 mm/dk hızda DKB, c) 150 mm/dk hızda DKB

Çalışmada tane rafinasyonunun düşük kalınlıklı plakalarda daha belli olduğu ve meydana gelen alfa fazının daha ince tanelerden meydana geldiği bildirilmektedir. Bu duruma kalın plakalarda soğuma hızının daha yavaş olmasının neden olduğu düşünülmüştür [46].

Literatürdeki takım omuz tasarımıyla ilgili araştırmalar derlenen bazı çalışmalara ait önemli sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Zhang ve diğerleri çalışmalarında çeşitli omuz tasarımlarını tanıtmışlardır. Omuz tasarımlarını üç kategoride sınıflandırılmış olup bunlar omuz dış yüzeyi tasarımı, omuz ucu profili tasarımı ve omuz ucunun yüzey özelliğidir. Omuz ucu yüzeyinde spiral kanallar içeren omuz tasarımının malzeme akışının omuz kenarlarından pime doğru olmasına yardım ettiği ve takıma eğim açısı verme gerekliliğini ortadan kaldırıldığı belirtilmektedir. Ayrıca bu kanalların içinde biriken malzemenin sürekli kesme mekanizması sağladığı, yüzeydeki deformasyon ve sürtünmeye bağlı ısınmayı arttırdığı belirtilmiştir [33].

Galvoa ve diğerleri 1 mm kalınlığında bakır malzeme kullanarak düz, 6 derecelik konik konkav ve kıvrımlı omuz geometrilerine sahip takımlarla farklı dönme ve ilerleme hızlarında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Düz omuza sahip takım tüm kaynak koşullarında hasara neden olması nedeniyle kullanışlı bulunmamıştır. Kıvrımlı takım ise kaynaktaki kusurlar açısından konik omuzlu tasarımdan daha efektif olduğu belirtilmiştir. Kıvrımlı omuzlu tasarımın kullanıldığı kaynak işleminde daha iyi tane incelmesi, daha yüksek sertlik ve iyi mukavemet elde edildiği bildirilmiştir [47].

Trueba ve diğerleri Ti6Al4V malzemeden elektron ışını ile eritme eklemeli imalat yöntemiyle takımlar üretip bunlara AISI 1090 çelik malzemeli silindirik pimler entegre etmiştir. Takımlar 6,35 mm kalınlığındaki Al6061-T6 malzemeyi alın kaynağı konfigürasyonunda kaynaklamak için kullanılmıştır. Üretilen tek bir takım hariç takımlar omuz ucu yüzeyi özelliği olarak girintili ve yükseltili fan tasarımına sahiptir. Girinti ve yükseltiler omuz yüzeyinden 0,5 mm içeride/dışarıda olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, yüzey kalitesi, ve çekme mukavemeti açısından yükseltilmiş ve spiral omuz özelliği olan takımla yapılan kaynağın en iyi sonucu verdiği bildirilmiştir [48].

Trimble ve diğerleri 4,8 mm kalınlığında Al 2024-T3 plakaları sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirmiştir. İyi kalitede kaynak elde edebilmek için mümkün olan en yüksek kaynak hızında efektif kaynak parametreleri belirlemişlerdir. 450 dev/dk dönme hızı, 355 mm/dk değerine kadar ilerleme hızlarında kıvrımlı omuz ve triflüt pime sahip takımla yapılan kaynakların iyi kaynak kalitesine sahip olduğu belirtilmektedir [37].

Zhang ve diğerleri takım omuz boyutunun malzeme deformasyonuna ve sıcaklık dağılımına etkisini çalışmışlardır. Nümerik sonuçlar artan takım omuz çapıyla birlikte sıcaklıkta artışı göstermektedir. Ayrıca omuz boyutunun artışı karıştırma bölgesini genişletmektedir. Kaynak hattı civarında tane büyümesinin kontrolünde ana etkenin sıcaklıktaki değişim olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat gerinim ve gerinim hızı karıştırma bölgesi sınırlarında azalmaya başladığında yeniden kristalleşme işlemine malzeme deformasyonun etkisinin daha baskın olacağı belirtilmektedir [49].

Joshi ve diğerleri sürtünme karıştırma kaynağı işleminde kaynaklanan parçaların çekme ve sertlik özelliklerini geliştirme amacıyla omuz yüzeyinde yükseltiler ve girintiler bulunduran

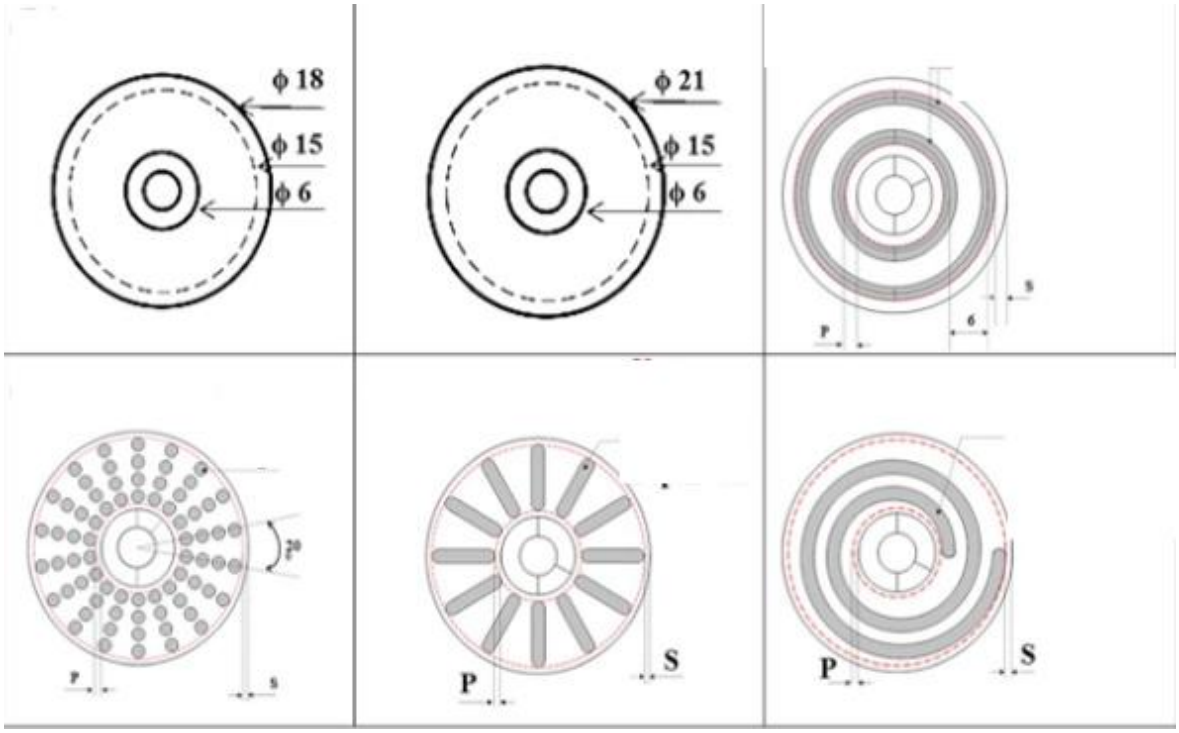
takım tasarımları yapmışlardır. H13 çeliğinden yapılan takımlar 5 mm kalınlığındaki 6061 alüminyum plakayı 1200 dev/dk dönme hızı ve yaklaşık 80 mm/dk ilerleme hızıyla kaynaklamak için kullanılmıştır. En iyi çekme özelliklerini kare pime sahip yükseltili omuz tasarımı içeren takımla 215,51 MPa ve en düşük sertlik değerini 66 HV olarak bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde yükseltili omuz tasarımına sahip takımlarla yapılan kaynakların daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [3].

Mugada ve Adepu malzeme akışı açısından oldukça önemli olan takım omuz ve pim geometri kombinasyonlarını çalışmışlardır. 6 mm kalınlığında Al 6082 malzeme için 800 dev/dk dönme hızı ve 40 mm/dk ilerleme hızı koşullarında omuz yüzeyinde tırtıl kanallar içeren kare pin profile sahip takımla yapılan kaynağın daha üstün özelliklere sahip olup 182 MPa çekme mukavemeti ve kaynak dikişinde 78 HV sertlik değeri verdiğini bildirmiştir [50].

Mugada ve Adepu farklı pim konfigürasyonlarıyla kıvrımlı omuz tasarımının malzeme akışı, mekanik özellikler ve takım eksenel kuvvetine etkisini değerlendirmiştir. Daha üstün mekanik özellikleri kıvrımlı omuz ve üçgensel pim tasarımıyla elde etmişlerdir. Bu takım tasarımıyla yapılan kaynakta 184 MPa çekme mukavemeti ve karıştırma bölgesinde 78 HV sertlik kaydedilmiştir [51].

Scialpi ve diğerleri sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle 1,5 mm kalınlığında Al6082-T6 malzemeyi farklı omuz geometrilerine sahip takımlarla kaynaklayarak mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışılan omuz geometrileri kıvrımlı, kaviteli ve omuz kenarları radyuslu şekilde unsurlar içermektedir. 1810 dev/dk dönme hızı ve 460 mm/dk ilerleme hızı koşullarında takıma 2 derecelik eğilme açısı verilerek deney yapılmıştır. Kaviteli ve omuz kenarı radyuslu unsurları birlikte içeren takımın boyuna ve enine mukavemeti arttırdığı ve aynı zamanda iyi yüzey kalitesi sağlamasından dolayı en iyi takım olarak değerlendirilmiştir [52].

Mugada ve Adepu 6 mm kalınlığında Al 6082 plakaları sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle farklı omuz tasarımlarına sahip takımlar kullanarak kaynaklamışlardır. Kullanılan takımlar omuz yüzeylerine girintili olacak şekilde tasarlanan eş merkezli daireler, delikler, yuvalar ve kıvrımlar içermektedir ve ayrıca karşılaştırma amaçlı düz omuz yüzeyine sahip takımda deneylerde kullanılmıştır. Bu tasarımlara ait görsel Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Mugada ve Adepu çalışmalarında kullandıkları takım omuz tasarımları

Şekil 5.6'da verilen takımlar kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı deneyi gerçekleştirilmiş ve takımların işleme olan etkileri araştırılmıştır. Tüm takımlar 800 dev/dk dönme hızı, 40 mm/dk ilerleme hızı, 1 derece takım eğilme açısı ve 5,7 mm dalma derinliği koşullarında kullanılmıştır. Kaynaklanan plakaların üst yüzeyi incelendiğinde düz omuz yüzeyine sahip takımla yapılan kaynakta en kötü yüzey kalitesi tespit edilmiş ve bunun sebebi olarak düz omuzlu tasarımın malzemeyi omuz yüzeyi altında tutamadığı ve dolayısıyla malzemenin omuz yüzeyi kenarlarından kaçması gösterilmiştir. Omuz yüzeyinde delikler içeren takım tasarımın en iyi mekanik özellikleri verdiği bildirilmiştir. Delikli omuz yüzeyine sahip takımla yapılan birleştirmede 194 MPa çekme mukavemetine ulaşılmış ve aynı omuz çapına sahip düz omuz yüzeyli tasarıma göre kuvvet/tork değerinde % 32 düşüş kaydedilmiştir [10].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Deney Öncesi İşlemler

Sürtünme karıştırma kaynağı deneyinde kullanılmak üzere 300 mm x 100 mm x 6,35 mm boyutlarındaki 6061-T6 alüminyum alaşımı plakalar ticari olarak temin edilmiştir.

Süneklik ve tokluk özelliklerinin artışı için 6061 alümiyum alaşımları manganez içermektedir. Al 6061-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.1'de verilmiştir [16].

Çizelge 6.1. Al6061-T6 kimyasal kompozisyonu

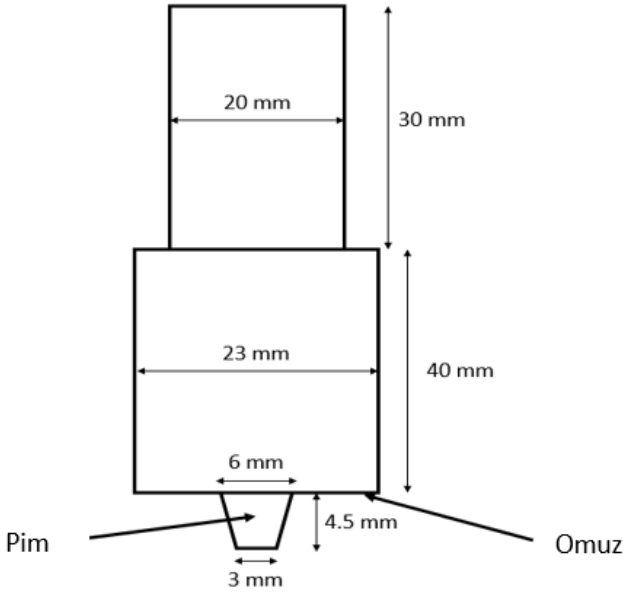
Komponent	Kimyasal Kompozisyon, %
Al	95,8-98,6
Mg	0,8-1,2
Si	0,4-0,8
Fe	Maksimum 0,7
Cu	0,15-0,4
Cr	0,04-0,35
Zn	Maksimum 0,25
Mn	Maksimum 0,15
Ti	Maksimum 0,15

SKK deneyinde kullanılmak üzere konik pim konfigürasyonuna sahip sahip takım tasarlanıp, üretilmiştir. Bunun için AISI 4140 takım çeliğinden takım istenilen ölçüde kesilmiş ve sonrasında tornada gerekli ölçülere getirilmiştir. AISI 4140 çeliğine ait kimyasal kompozisyon değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir [53].

Çizelge 6.2. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu

Komponent	Kimyasal Kompozisyon, %
Fe	96,785-97,77
Cr	0,80-1,1
Mn	0,75-1,0
C	0,38-0,43
Mo	0,15-0,25
P	<=0,035
Si	0,15-0,30
S	<=0,040

Üretilen takımların ana boyutları Şekil 6.1'de verilmiştir.

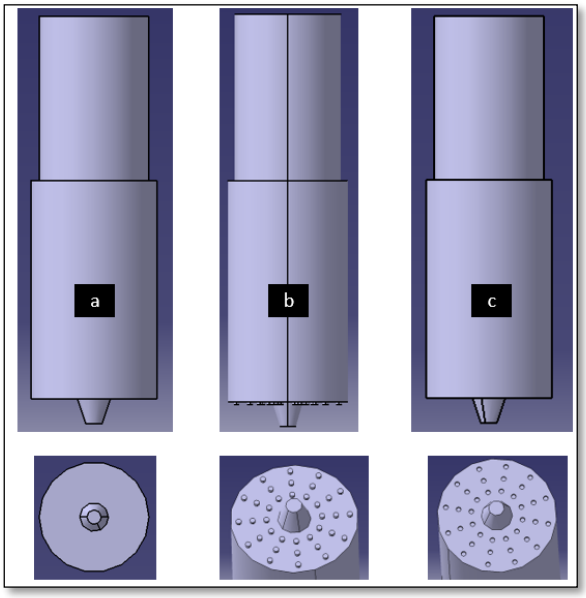


Şekil 6.1. Deneylerde kullanılan takımların ana boyutları



Resim 6.1. Deneylerde kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı takımları

Üretilen takımlar birbirinden omuz ucu yüzeyi özellikleriyle ayrışmaktadır. Düz omuz ucu yüzeyi olarak isimlendirilen tasarım omuz yüzeyinde hiçbir unsur içermemektedir. Diğer iki takım ise omuz ucu yüzeyinde dairesel unsurlar içermektedir. Bu takımlardan birinde dairesel unsurlar omuz ucu yüzeyine girintili olarak tasarlanırken diğerinde çıkıntılı olarak tasarlanmıştır. Bu unsurlar takımların torna ile birincil operasyonu yapıldıktan sonra freze işlemiyle 1,5 mm çaplı freze takımı kullanılarak omuz yüzeyine işlenmiştir. Girinti ve çıkıntıların omuz yüzeyinden mesafesi 0,5 mm dir.



Şekil 6.2. Tasarlanan sürtünme karıştırma kaynağı takımları

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak plakalar alın kaynağı konfigürasyonunda birleştirileceğinden plakaların birbirine bakacak yüzlerinin temasını iyi bir şekilde sağlamak adına öncelikle eşleşecek kenar yüzeylerinin temizleme işlemi yapılmıştır. Bu işlem AWEA BM-1200 dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Cihaz Resim 6.2'de gösterilmiştir. Ayrıca temin edilen plakaların kalınlığı bu tezgahta takım pim uzunluğu da göz önünde bulundurularak 5,0-5,1 mm arasında kalınlık sağlanacak şekilde inceltilmiştir.



Resim 6.2. Deney plakaların kenar temizleme işlemi

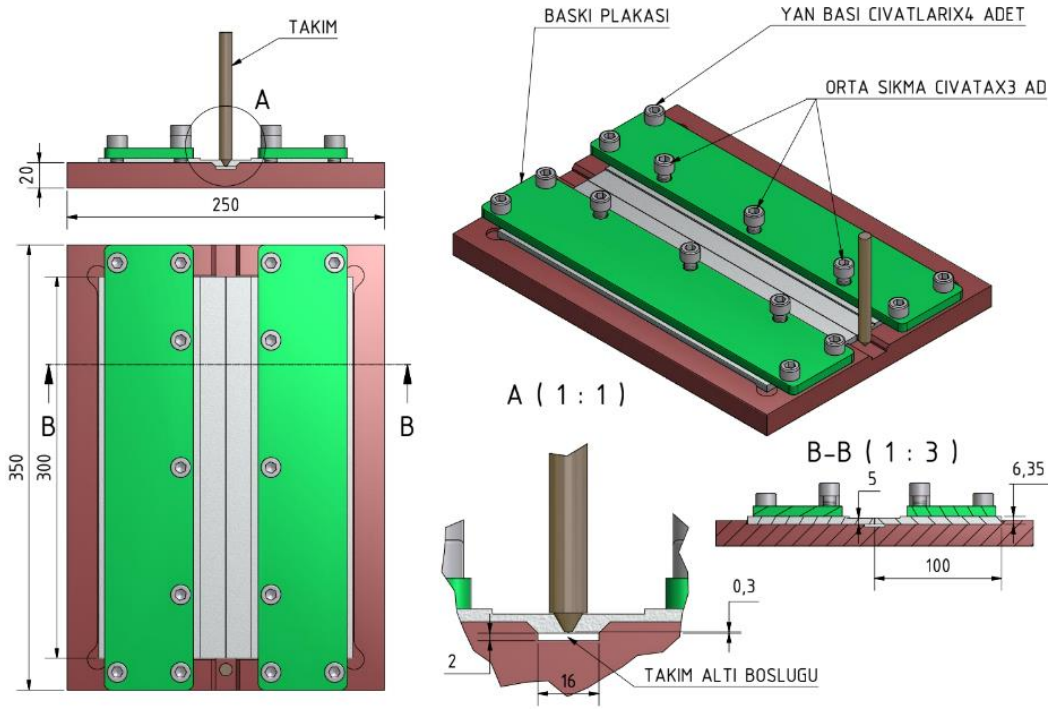
6.2. Deneyin Gerçekleştirilmesi

Sürtünme karıştırma kaynağı deneyi 4 eksen CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihaz SMTCL 850E modelidir. Cihazın maksimum devri 8500 dev/dk, gücü 7.5/11 kW dir. Cihaz Resim 6.3'de gösterilmiştir.



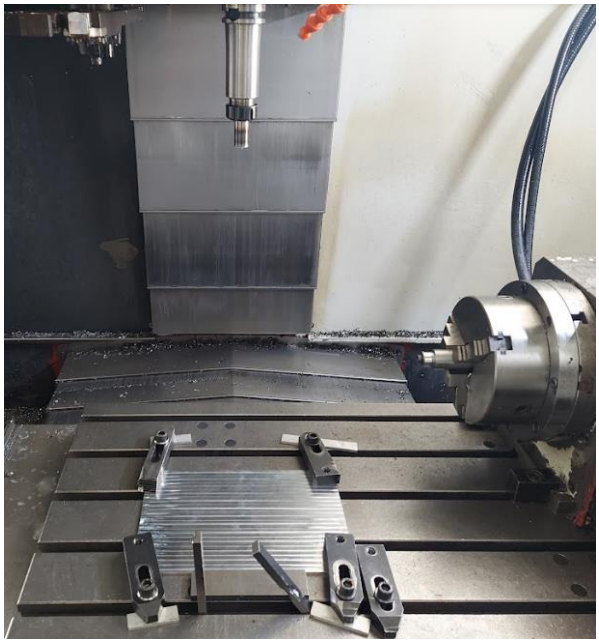
Resim 6.3. Sürtünme karıştırma kaynağı deneyinin gerçekleştirildiği cihaz

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında takımın oluşturduğu tork kaynaklanacak plakaların işlem sırasında kolayca birbirinden ayrılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle plakaların iyi bir şekilde fikstürlenmesi gerekmektedir. Başlangıç aşamasında göz önünde bulundurulan fikstür tasarımı Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Deneyler sırasında birçok parametre denenmesi gerekebileceğinden bu fikstür tasarımında işlem sırasında oluşacak çeşitli tork değerlerinde plakaların yerinde sabit kalmasını sağlayacak bağlantı cıvataları ve takımın ilerlediği yerde fazla ısınmadan dolayı takım pim kısmının plakayı delme durumunda tezgaha temas etmesini önlemek veya plakanın ısınmadan dolayı tezgaha yapışmasını önlemek adına takım altı boşluğu kullanmak amaçlanmıştır.



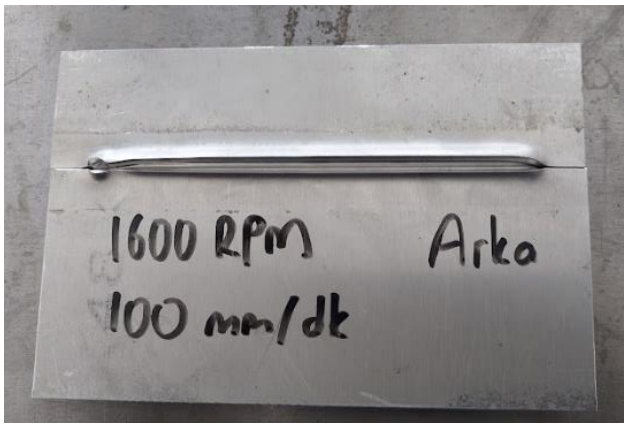
Şekil 6.3. Başlangıç aşamasında düşünülen fikstür tasarımı

Ancak bu fikstür tasarımı için üretim planlaması yapılmadan önce literatürde sıklıkla karşılaşılan standart bağlama kelepçelerinin de değerlendirilmesi amacıyla bağlama kelepçeleriyle test yapılmıştır. Bu kapsamda plakaları köşelerinden tutan 4 adet bağlama kelepçesi kullanılmıştır. Resim 6.4'de gerçekleştirilen deneylerde kullanılan bağlama kelepçe tipleri gösterilmiştir.



Resim 6.4. Sürtünme karıştırma kaynağı deneyleri sırasında kullanılan fikstürler

Hem fikstür düzeneğinin sağlamlığını hem de belirlenen 4,7 mm batma derinliğinin uygunluğunu değerlendirebilmek adına test yapılmıştır. Öncelikle işlemde takım altı boşluğu kullanıldığında plakaların arka yüzeyinde pim patlatma etkisi yaratmıştır. Bu durum Resim 6.5'de örnek olarak gösterilmiştir. Elde edilen tecrübe sonucunda deneylerde takım altı boşluğu kullanılmaması kararlaştırılmıştır.



Resim 6.5. Deney öncesi testleri- Dönme hızı: 1600 dev/dk- ilerleme hızı: 100 mm/dk

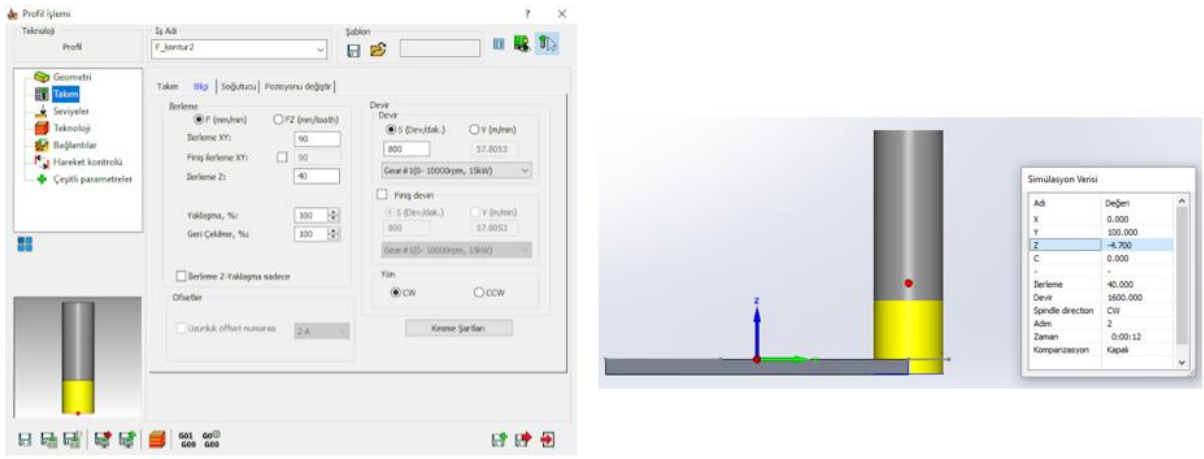
Literatür taraması bölümünden de anlaşılacağı üzere deneyde ısı girdisi düşük ilerleme hızlarında artmaktadır. Bu nedenle takımın 60 mm/dk olduğu sabit ilerleme hızında test işlemi yapılmıştır. Sabit ilerleme hızında deney seti için belirlenen dönme hızı parametrelerinden en yüksek ve en düşüğünün uygunluğu değerlendirilmiştir. Test

işleminde takım plakanın yarı uzunluğuna geldiğinde devir 1600 dev/dk değerinden 800 dev/dk değerine düşürülmüştür. Her iki parametrede de kaynaklanan parçaların birleşebildiği ve bağlama kelepçelerinin plakaları sağlam bir şekilde tutabildiği gözlemlenmiştir. Böylelikle deneyde kullanılacak parametrelerin denenmesine geçilmiştir.

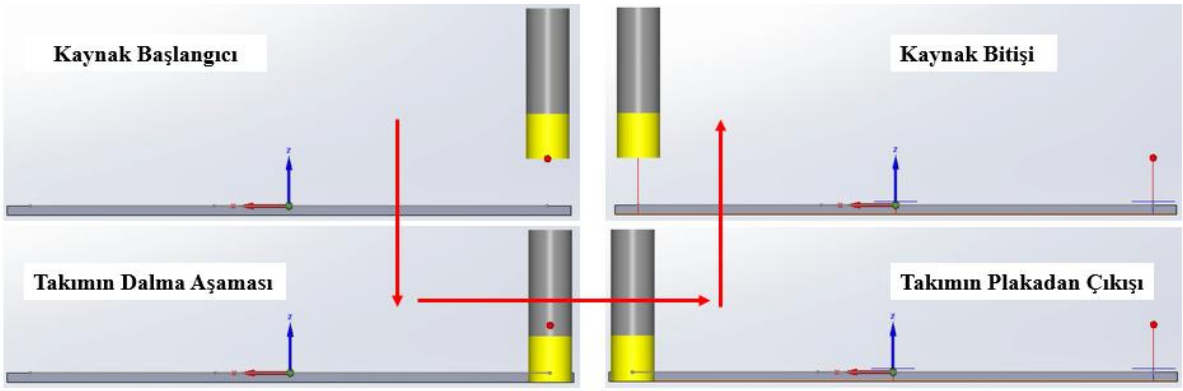


Resim 6.6. Sürtünme karıştırma kaynağı deneyi öncesi gerçekleştirilen parametre kontrolü

Deney sabit ilerleme hızında takımın plaka ortasında dönme hızının değişmesi şeklinde planlanmıştır. Bu doğrultuda SolidCAM yazılımı kullanılarak deney parametreleri ayarlanmış ve işlemin yapılacağı tezgaha program aktarılmıştır.



Şekil 6.4. SolidCAM programında deney parametlerinin girilmesi

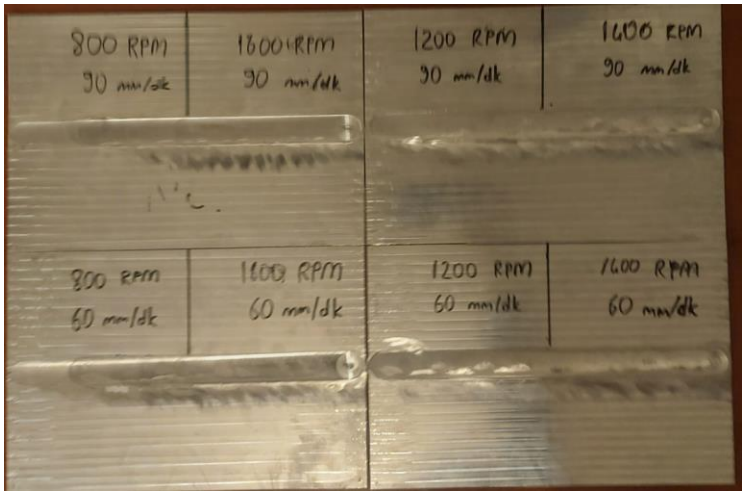


Şekil 6.5. SolidCAM programında deneyin simülasyonu

Deneyin ikinci bölümünde takım omuz tasarımının sürtünme karıştırma kaynağında çekme mukavemetine ve ısı girdisine etkisi anlaşılmaya çalışılmış ve düz omuza sahip takımla birlikte daha önce açıklanan dairesel girintili ve çıkıntılı omuz tasarımları sabit dönme ve ilerleme hızında test edilmiştir.

6.3. Deney Sonrası İşlemler

Deney sonrasında test işlemleri için kaynaklı plakalardan numuneler hazırlanmıştır. Öncelikle sürtünme karıştırma kaynağı yapıldıktan sonra plakaların üst yüzeylerinin kaynak sırasında geri çekilen bölgede çapak oluşturması nedeniyle plakaların yüzey temizliği zımparalanarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.7. Kaynaklı plakaların yüzey temizliği sonrası resimleri

Daha sonra kaynaklı plakalardan numune kesimi su jeti tezgahı kullanılarak yapılmıştır. Bu işlem için STM Böhler su jeti kullanılmıştır. Numuneler kesim sırasında karışmaması için plakalardan tam olarak ayrılmamış, sonradan el ile ayrılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.8. Numunelerin çıkarılması için kullanılan su jeti tezgahı

7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Görsel İnceleme

Sürtünme karıştırma kaynağında talaş oluşumu plakaların üst yüzeyinde geri çekilen tarafta oluşurken ilerleyen tarafta en az düzeydedir. Literatürdeki çalışmalardakine benzer şekilde çalışılan tüm parametre setleri geri çekilen tarafta talaş oluşumu göstererek bu durumu doğrulamıştır. Kaynak işlemi bitişinde takımın yukarı çekilme hareketini gerçekleştirdiği bölgede talaş toplanması gerçekleşmiş ve bölgede anahtar deliği geometrisi oluştuğu gözlemlenmiştir. Çalışılan parametrelerle gerçekleştirilen kaynaklarda plakaların üst yüzeyinde oluşan dikiş profilleri aşağıdaki resimlerde gösterilmiştir. Görsel incelemelerde sonucunda sabit ilerleme hızında takımın devrinin arttırılmasının çapak oluşumunu arttırdığı gözlemlenmiştir. En az çapak oluşumu deney setinde kullanılan en düşük dönme hızı olan 800 dev/dk kullanımıyla elde edilmiştir.



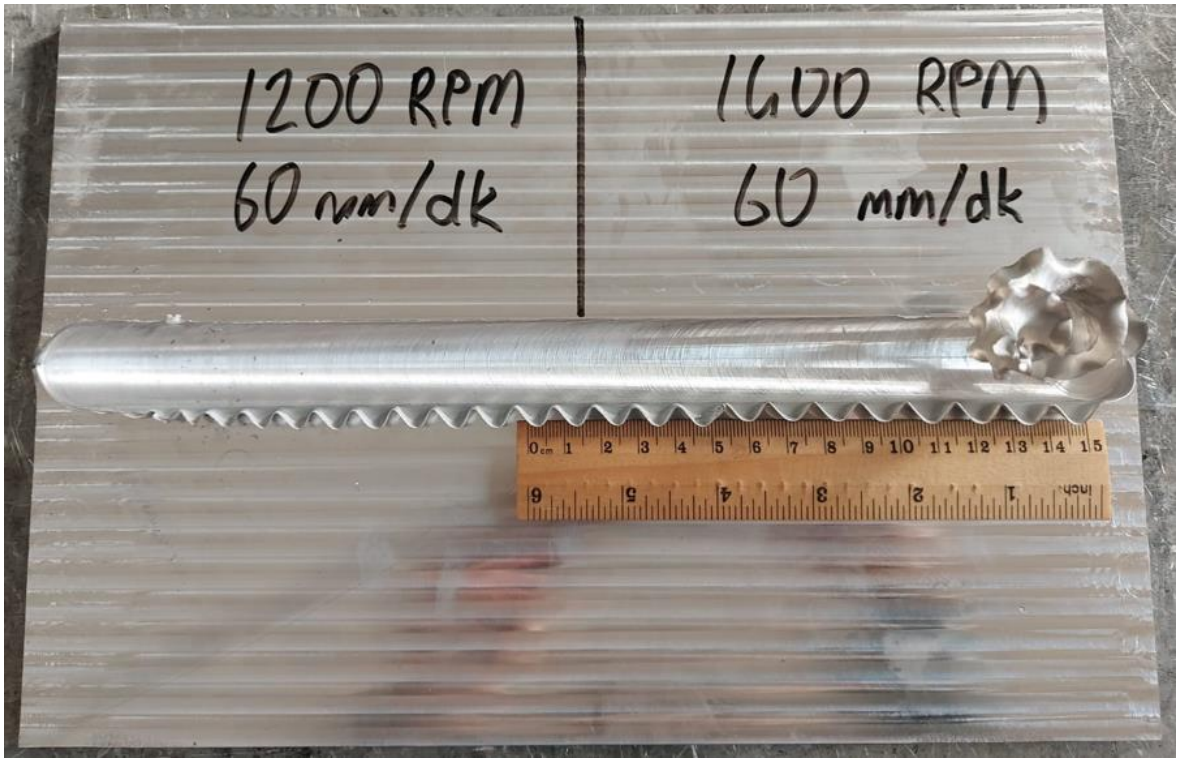
Resim 7.1. 90 mm/dk ilerleme hızında 800-1600 dev/dk dönme hızlarının deneyi



Resim 7.2. 90 mm/dk ilerleme hızında 1200-1400 dev/dk dönme hızlarının deneyi

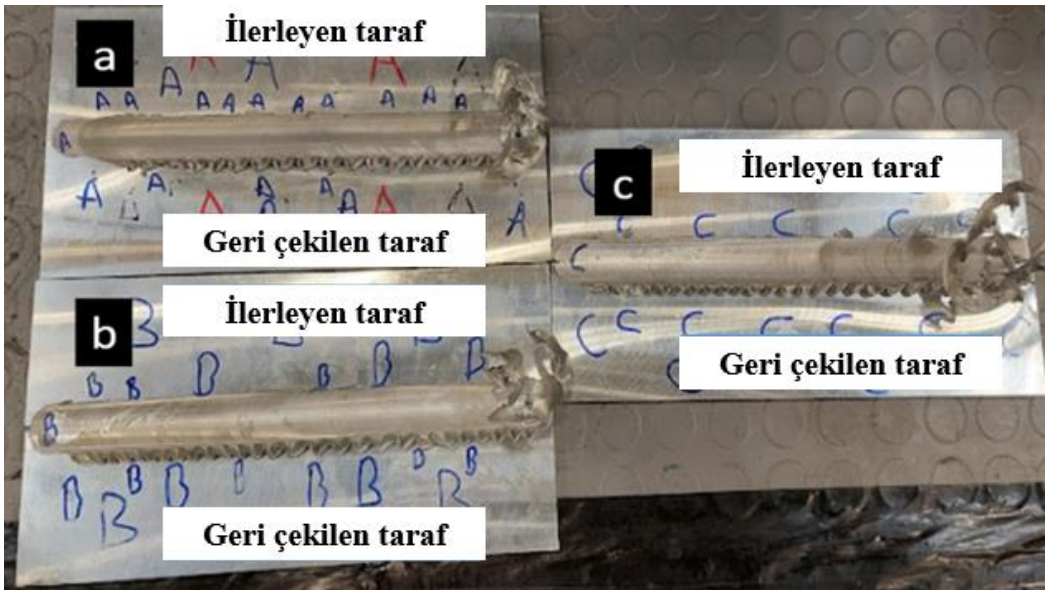


Resim 7.3. 60 mm/dk ilerleme hızında 800-1600 dev/dk dönme hızlarının deneyi



Resim 7.4. 60 mm/dk ilerleme hızında 1200-1400 dev/dk dönme hızlarının deneyi

Farklı takım omuz yüzeyi ucu tasarımlarının çalışıldığı deneyde de benzer şekilde talaş oluşumu plakaların üst yüzeyinde geri çekilen tarafta oluşurken ilerleyen tarafta en az düzeydedir. Tasarlanan üç takımla gerçekleştirilen kaynaklarda plakaların üst yüzeyinde oluşan dikiş profilleri Resim 7.5'de gösterilmiştir.

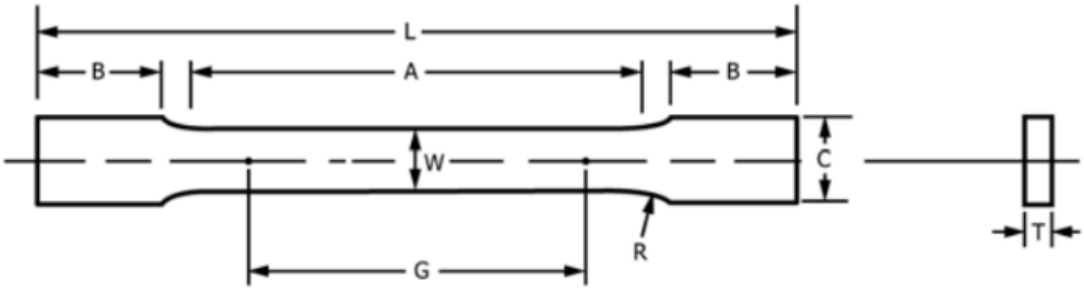


Resim 7.5. Üst yüzey a) düz, b) dairesel çıkıntılı, c) dairesel girintili omuz yüzeyli takım

Görsel inceleme doğrultusunda en küçük dikiş profilinin dairesel girintili omuz yüzeyi tasarımıyla kaynak yapılan plakada olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni takım omuzundaki girintilerin işlem sırasında deformasyona bağlı oluşan talaşı hapsetmesi ve yeni oluşan talaşı da omuz dışına doğru çıkışını önlemesi olduğu düşünülmektedir.

7.2. Kaynaklı Numunelerin Çekme Özellikleri

Kaynak bölgesindeki çekme mukavemetinin tespiti için çekme deneyi planlanmıştır. Çekme deneyi için ASTM E8 [54] standardına göre plakalardan kaynak yönüne dik olarak numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 7.1. Çekme numunesi şematik gösterimi

Çizelge 7.1. Kaynaklı parçadan çıkarılan çekme numune boyutları

Çekme Numunesi	[mm]
Kalınlık	Malzeme Kalınlığı
G, Ölçü Uzunluğu	25
W, Genişlik	6
R, Radyus	6
L, Toplam Uzunluk	100
A, Gövde Uzunluğu	32
B, Kavrama Uzunluğu	30
C, Kavrama Genişliği	10

Çekme testleri Zwick Roell Z100 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Resim 7.6'da çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz gösterilmiştir.



Resim 7.6. Çekme deneylerinin gerçekleştirildiği cihaz

Çekme deneyleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneye başlamadan önce hem cihazın hem de kaynağı yapılan Al 6061-T6 plakanın kontrolünü sağlamak için kaynaklanmamış plakadan çıkarılan numunelerle test yapılmıştır. Numuneler hem literatürde belirtilen çekme mukavemetine uyumlu hem de parçalar kendi içinde uyumlu sonuçlar göstererek malzeme kalitesi ve cihaz tekrarlanabilirliği doğrulanmıştır. Yapılan çekme deneyleri sonucunda Çizelge 7.2'de değişken dönme ve ilerleme hızlarında çekme numunelerinden elde edilen ortalama değerler verilmiştir.

Çizelge 7.2. Dönme ve ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen çekme deneyi sonuçları

İlerleme Hızı	Dönme Hızı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Mukavemet Performansı (%)
90 mm/dk	800 dev/dk	183,66	10,39	59,24
90 mm/dk	1200 dev/dk	183,76	15,40	59,27
90 mm/dk	1400 dev/dk	153,64	5,86	49,56
90 mm/dk	1600 dev/dk	125,65	3,37	40,53
60 mm/dk	800 dev/dk	177,26	9,5	57,18
60 mm/dk	1200 dev/dk	175,62	14,05	56,65
60 mm/dk	1400 dev/dk	153,84	6,25	49,62
60 mm/dk	1600 dev/dk	124,44	3,99	40,14

Kaynak işleminde yeniden kristalleşen bölgenin mukavemeti ısının tesiri altındaki bölgeden daha yüksek olduğu için numuneler çekme deneyinde kaynak merkezi yerine ITAB bölgesinden geri çekilen taraftan kopma eğilimi göstermiştir. Literatür taramasında bu duruma sebeb olarak ITAB bölgesindeki mukavemeti arttırıcı partiküllerin kaba bir biçimde çökelerek mukavemeti azatlması gösterilmektedir. Çekme deneylerinde en yüksek mukavemetin elde edildiği 90 mm/dk ilerleme hızında 800 ve 1200 dev/dk, 60 mm/dk ilerleme hızında 800 ve 1200 dev/dk numunelerin kopma yerleri kaynak merkezinde gerçekleşmemesi bu durumu doğrulamaktadır. Bu duruma örnek Resim 7.7'de gösterilmiştir.

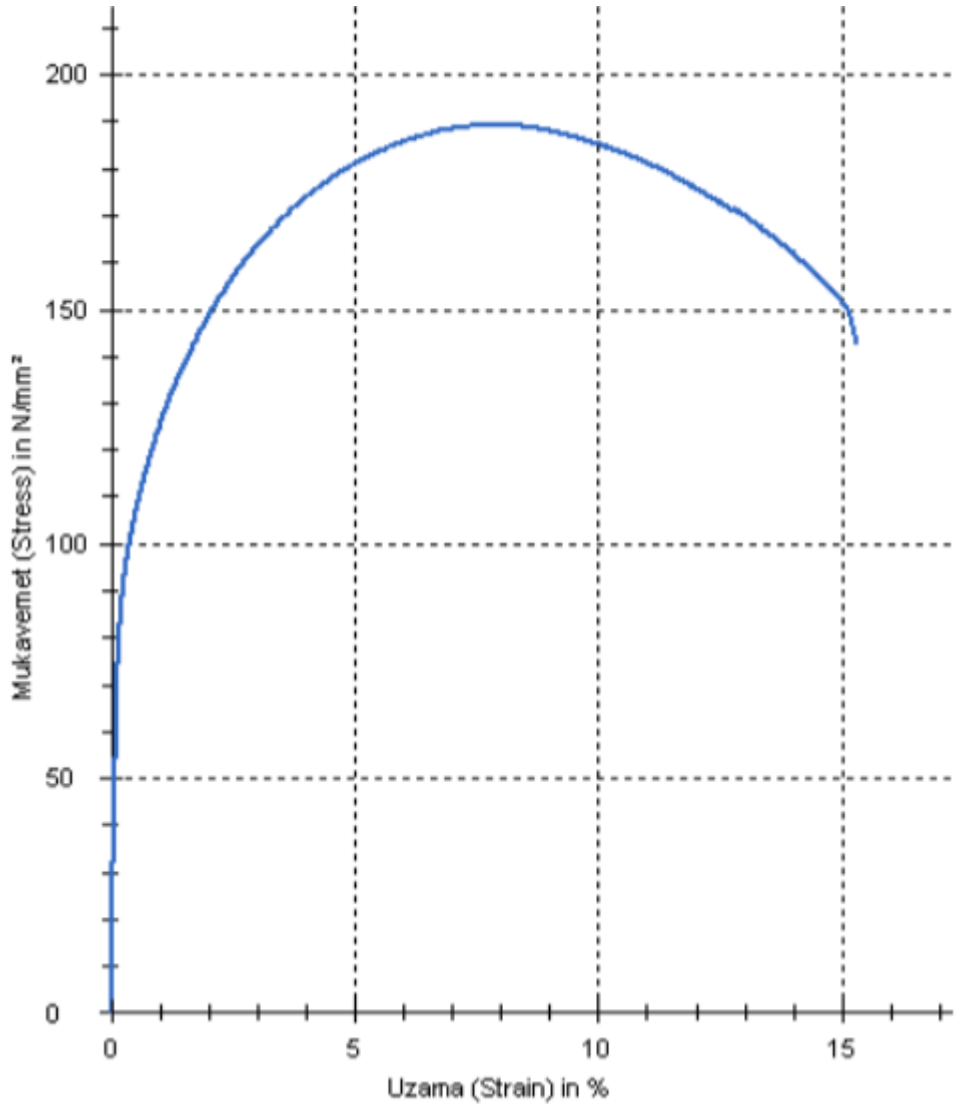


Resim 7.7. En yüksek mukavemet elde edilen numunelerin kopma yerleri

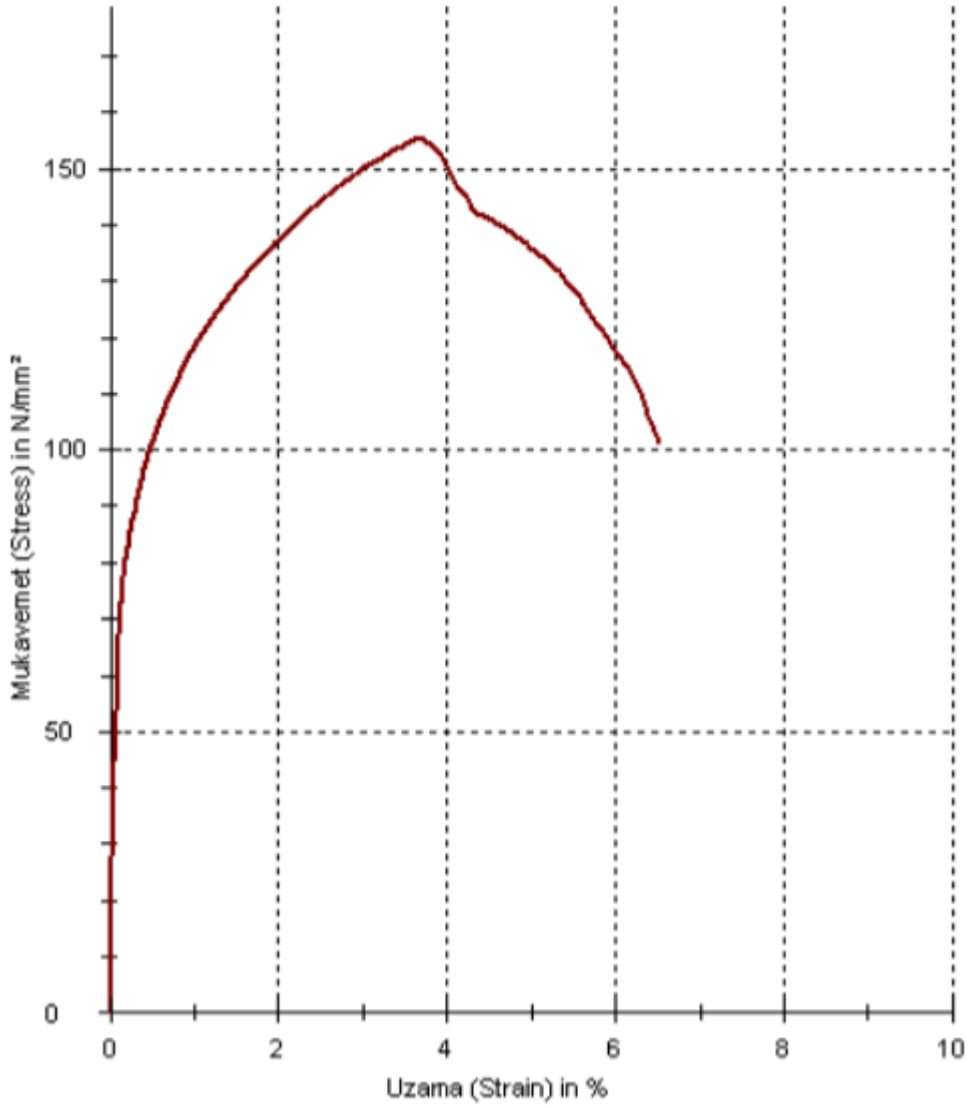
Sabit ilerleme hızında dönme hızı arttıkça malzemeye ısı girdisinde artış olmaktadır [28]. Deney sonuçlarında görüleceği üzere dönme hızının arttırılması çekme mukavemetini azaltma eğilimi göstermektedir. Sabit 90 mm/dk ilerleme hızında 800 dev/dk ve 1200 dev/dk dönme hızları çekme mukavemeti adına benzer sonuçlar gösterirken 1400 dev/dk ve 1600

dev/dk dönme hızlarına göre daha yüksek çekme mukavemeti göstermiştir.

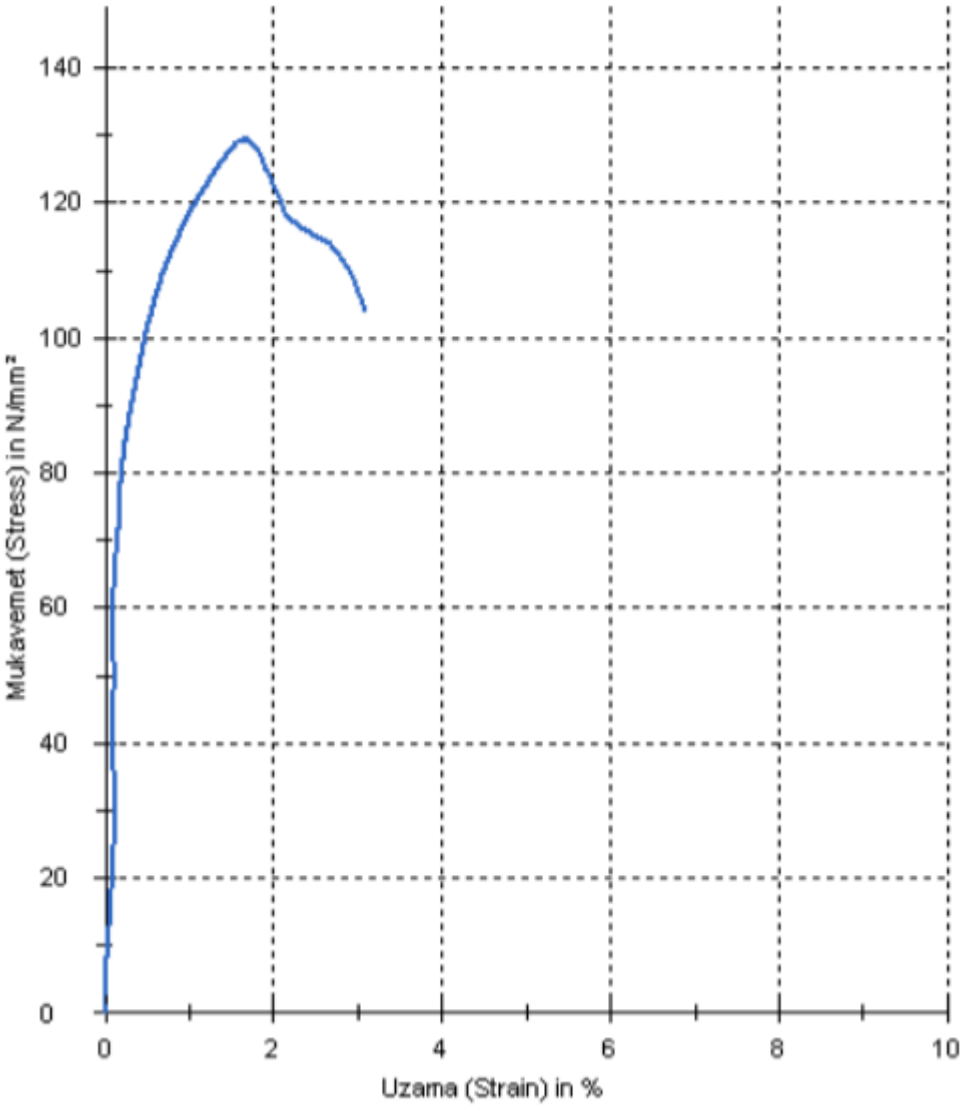
90 mm/dk sabit ilerleme hızı için değişken dönme hızlarında Çizelge 7.2'de sunulan ortalama değerlere en yakın numunelerin gerilme-uzama grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.2. 90mm/dk-800dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (189,26 MPa)



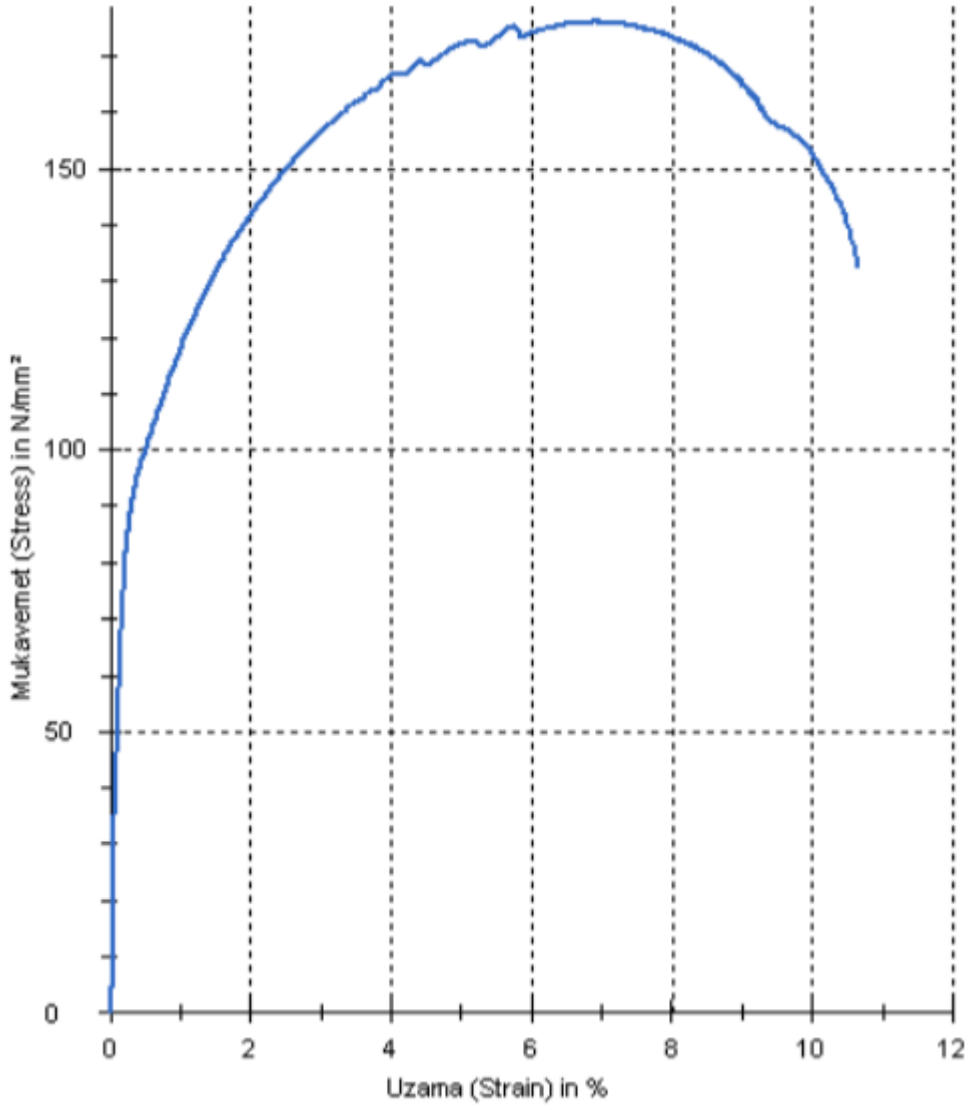
Şekil 7.3. 90mm/dk-1400dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (155,36 MPa)



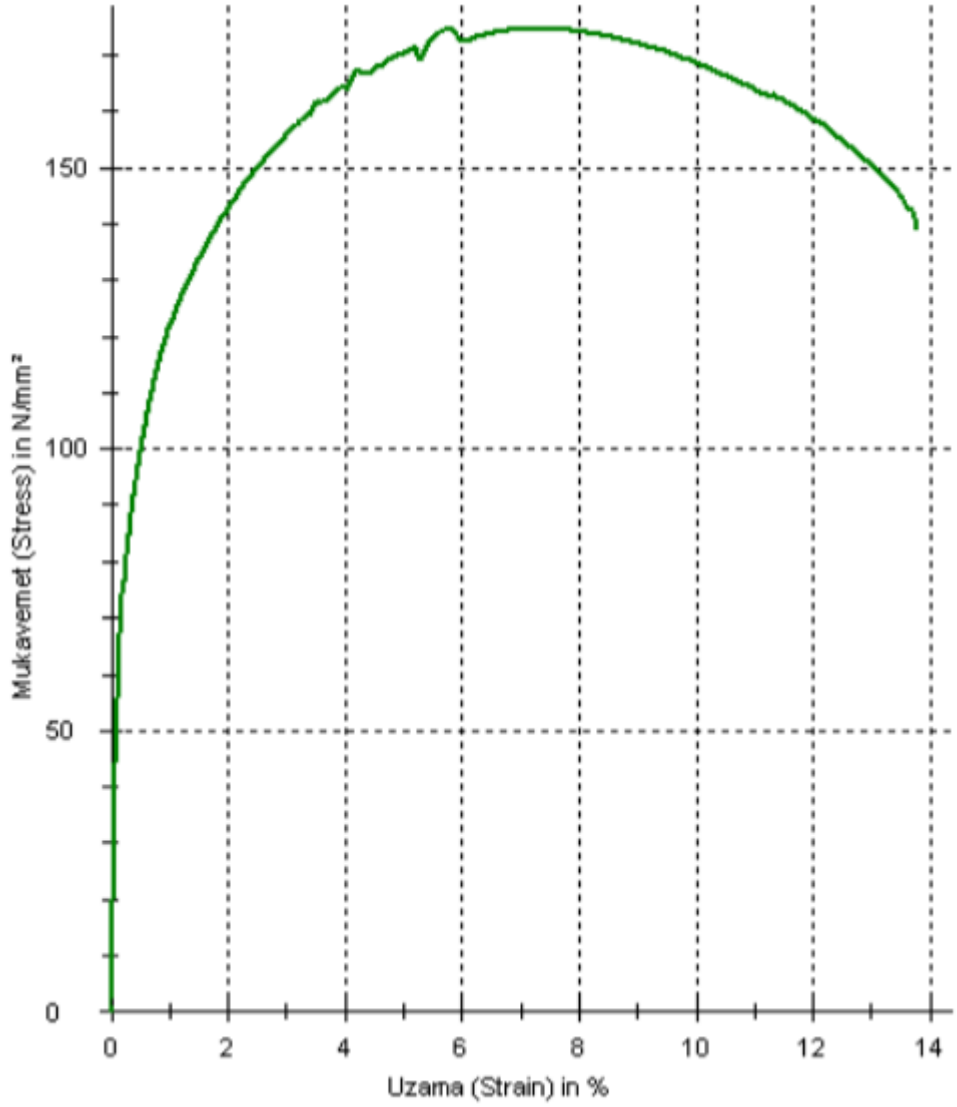
Şekil 7.4. 90mm/dk-1600dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (129,38 MPa)

Sabit 60 mm/dk ilerleme hızında dönme hızındaki artışda da benzer şekilde mukavemet değerlerinde düşüş tespit edilmiştir.

İlerleme hızındaki artış ısı girdisini azaltmakta ve çekme mukavemetini iyileştirmektedir [28]. Sabit 800 dev/dk dönme hızında 90 mm/dk ilerleme hızı ortalama 183,66 MPa mukavemet gösterirken ilerleme hızı 60 mm/dk değerine düştüğünde ortalama mukavemet 177,26 MPa olarak tespit edilmiştir. 1200 dev/dk dönme ve 90 mm/dk ilerleme hızında 183,76 MPa çekme mukavemeti elde edilirken aynı dönme hızında ilerleme hızı 60 mm /dk düştüğünde ortalama çekme mukavemeti 175,62 MPa değerine gerilemiştir.



Şekil 7.5. 60 mm/dk-800 dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (176,01 MPa)



Şekil 7.6. 60mm/dk-1200dev/dk ortalamaya en yakın gerilme-uzama grafiği (174,74 MPa)

Isı girdisinin artması kopma uzamasını azaltmaktadır [28]. Bu anlamda Çizelge 7.2'de genel olarak eğilime bakıldığında en yüksek mukavemete sahip numunelerde % uzama miktarı da daha yüksek elde edilmiştir.

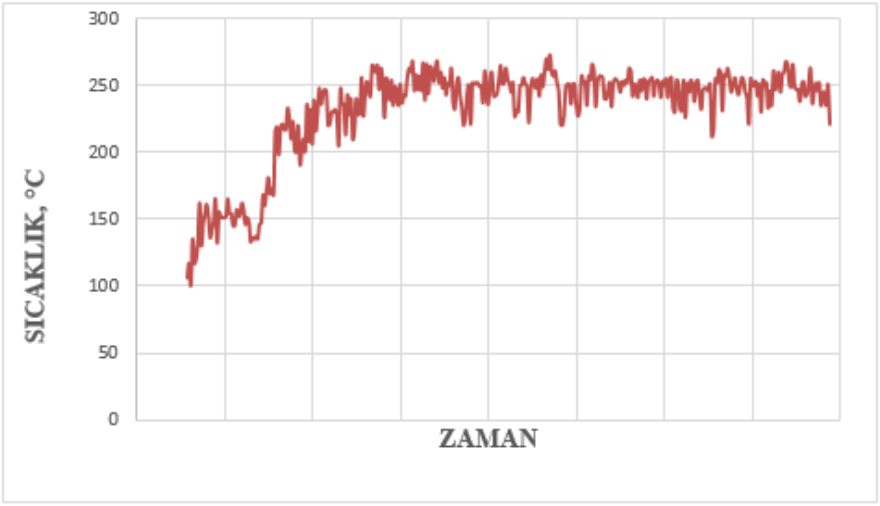
Deneyin ikinci bölümünde kullanılan takımın omuz ucu yüzeyi tasarımının çekme mukavemetine etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Kaynak işleminde kullanılacak parametreler benzer çalışmalarda edinilen tecrübelerin yorumlanması doğrultusunda belirlenmiştir [3, 10]. Kaynak işlemi için kullanılan takımlar dönme hızı 800 dev/dk ve ilerleme hızı ise 40 mm/dk olarak belirlenmiştir [10].

Farklı ilerleme ve dönme hızlarının denendiği deneyin birinci bölümünde ısı girdisi ile çekme mukavemeti arasında ilişki kurulmuştur. Deneyin bu bölümünde sıcaklık hakkında fikir edinebilmek adına deneyde sıcaklık takibi yapılmıştır. Bunun için termal kamera kullanılmıştır.

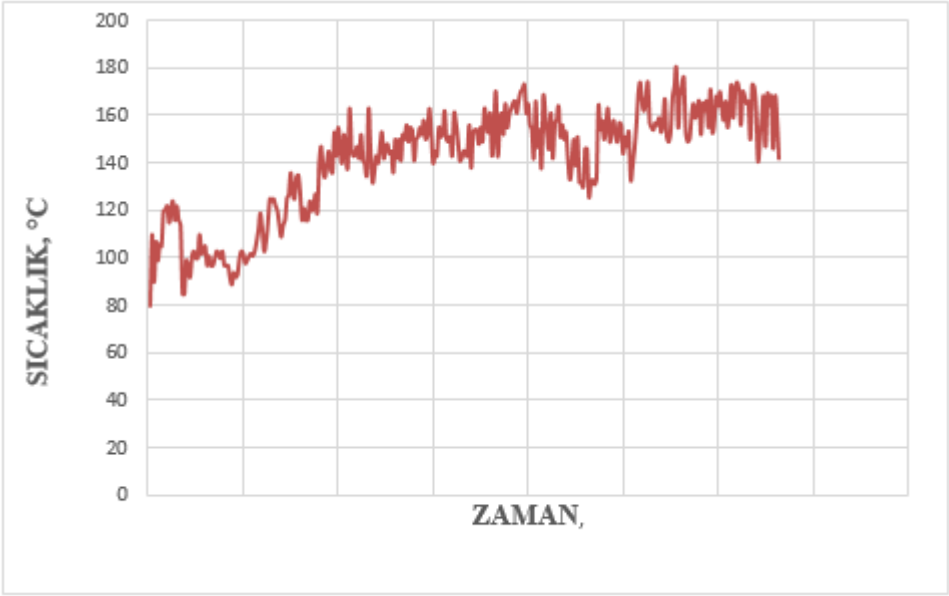


Resim 7.8. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında termal kamera ile sıcaklık takibi

Sürtünme karıştırma kaynağında maksimum sıcaklık takım omuz kısmının altındaki bölgede oluşmaktadır. Ancak termal kamera ölçümü gördüğü bölgelerden yaptığı ve omuz altındaki kısmı görmediği için maksimum sıcaklık işlem sırasında omuz çevresinden kaydedilmiştir. Düz omuz ucu yüzeyi ve dairesel çıkıntılı omuz ucu yüzeyi tasarımlı takımlarla yapılan kaynaklardaki ölçülen sıcaklıklar Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de verilmiştir.



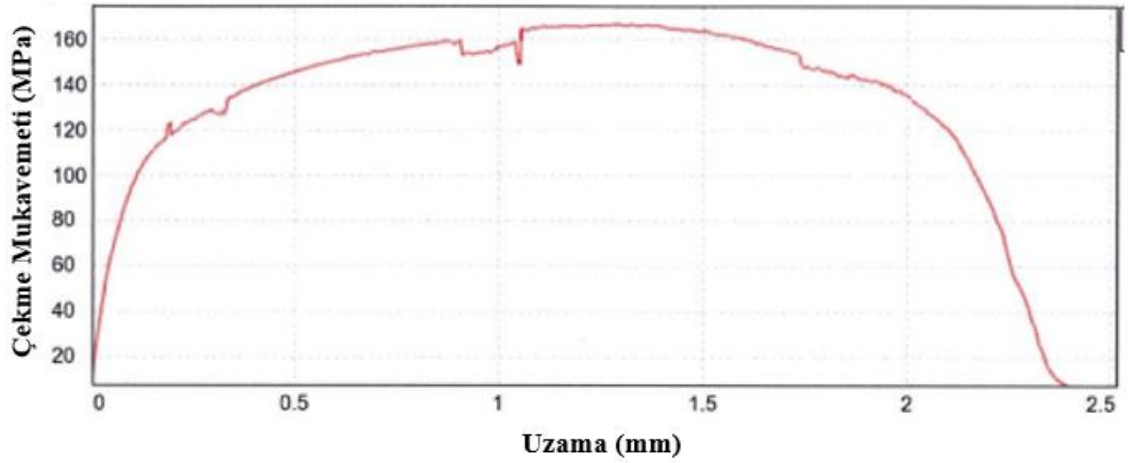
Şekil 7.7. Düz omuza sahip takımla ölçülen sıcaklık değerleri



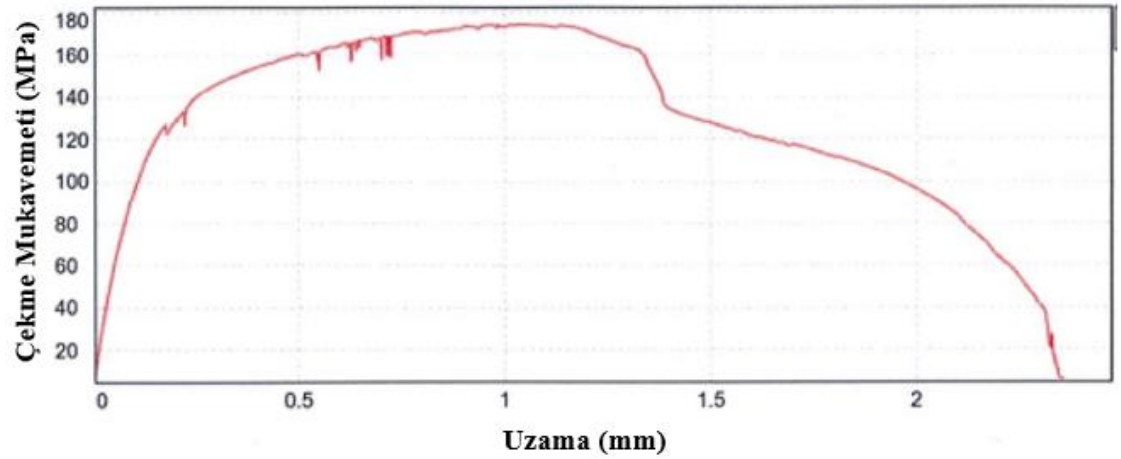
Şekil 7.8. Dairesel çıkıntılı omuza sahip takımla ölçülen sıcaklık değerleri

Ölçülen sıcaklık değerlerinden anlaşılacağı üzere takımın işparçasına dalmaya başlamasından bir süre sonra ölçülen sıcaklıklar belirli bir aralık etrafında kalmaktadır. Düz omuz tasarımı için sıcaklık datası kararlı hale ulaştığında 250 °C etrafında dalgalanmaktadır. Takım omuzunda girintili ve çıkıntılı dairesel unsurlar içeren tasarımlarda daha düşük sıcaklıklar (150-160 °C) gözlemlenmiştir. Bu tasarımların düz omuzlu tasarıma göre iş parçası arayüzünde daha fazla temas alanına sahip olması düşük sıcaklığın nedeni olarak yorumlanmıştır.

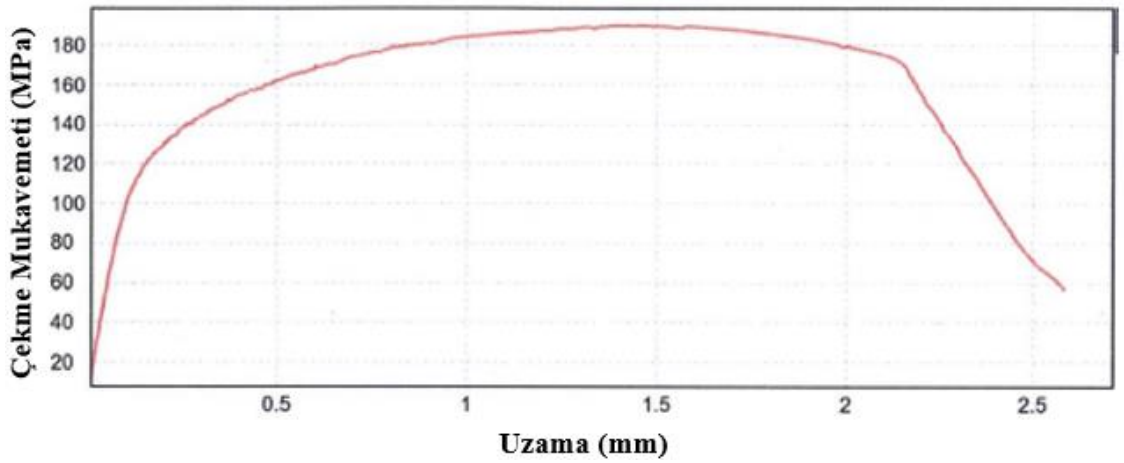
Numunelerde en yüksek çekme mukavemeti 190,1 MPa olarak çıkıntılı dairesel omuz ucu tasarımıyla yapılan kaynağa ait olarak bulunmuştur. Girintili dairesel omuz ucu tasarımına ait kaynakta ise bu değer 174,3 MPa olup en düşük çekme mukavemeti değeri düz omuz ucu tasarımına sahip takımla çalışan kaynakta 163,4 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar omuz ucu yüzeyi tasarımıyla çekme mukavemetinde artış sağlanabileceği potansiyelini göstermektedir. Dairesel girintili ve çıkıntılı omuz yüzeyi tasarımlarının malzemede plastik deformasyonu arttırması nedeniyle çekme mukavemetine olumlu olarak etki ettiği düşünülmektedir. Ayrıca deneyin bu bölümünde 800 dev/dk dönme hızı ve 40 mm/dk ilerleme hızında kullanılan düz omuz yüzeyi tasarımı deneyin birinci bölümünde aynı dönme hızında 60 mm/dk ve 90 mm/dk ilerleme hızlarına göre daha düşük çekme mukavemeti göstermiş olması sebebiyle ilerleme hızının artışıyla çekme mukavemetinde iyileşmeyi doğrulamıştır.



Şekil 7.9. Düz omuz ucu yüzeyi tasarımı gerilme-uzama grafiği (163,4 MPa)



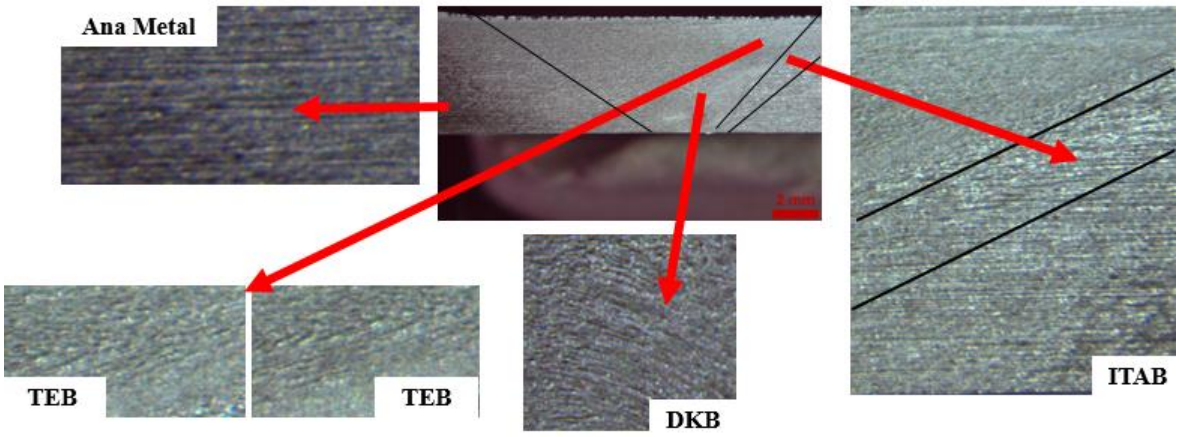
Şekil 7.10. Dairesel girintili omuz ucu yüzeyi tasarımı gerilme-uzama grafiği (174,3 MPa)



Şekil 7.11. Dairesel çıkıntılı omuz ucu yüzeyi tasarımı gerilme-uzama grafiği (190,1 MPa)

7.3. Makroyapı İncelemesi

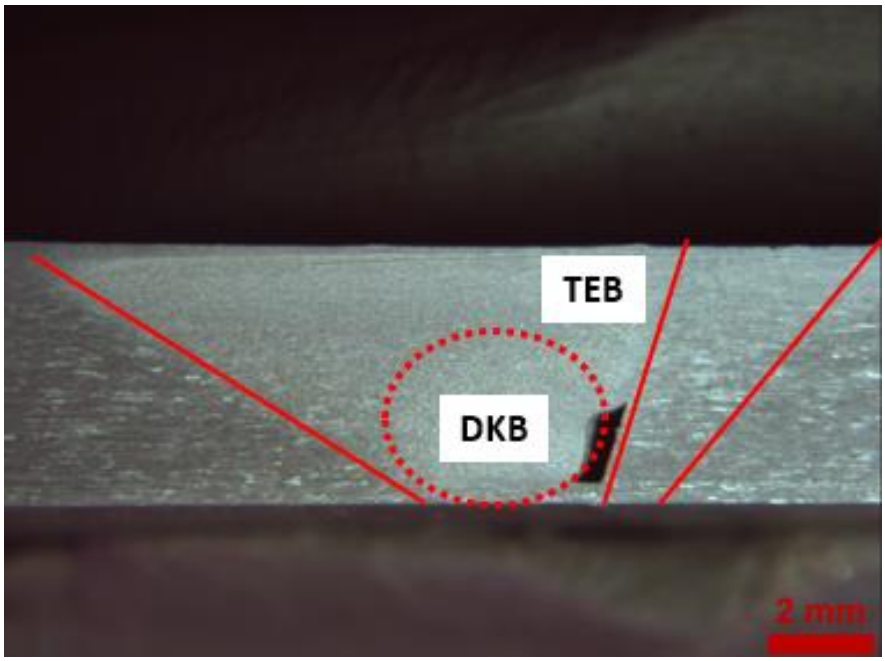
SKK deneyleri sonrasında kaynak parametrelerinin makro ve mikro yapı oluşumlarını inceleyebilmek için kaynaklı plakalardan kaynak yönüne dik olarak numuneler çıkarılarak incelenmiştir. Numunelerden alınan makro görüntüler incelendiğinde SKK işlemindeki karakteristik kaynak bölgeleri tespit edilebilmektedir. Bunlar dinamik kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak sıralanmaktadır. Takımın karıştırma etkisi sonucu oluşan kaynak bölgesinin havza benzeri yapısı takımın omuz kısmının malzeme akışını önemli ölçüde etkilediği sonucunu çıkarmaktadır. Resim 7.9'da 60 mm/dk takım ilerleme hızında ve 800 dev/dk takım dönme hızında düz omuz tasarımına sahip takım kullanılarak elde edilen optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



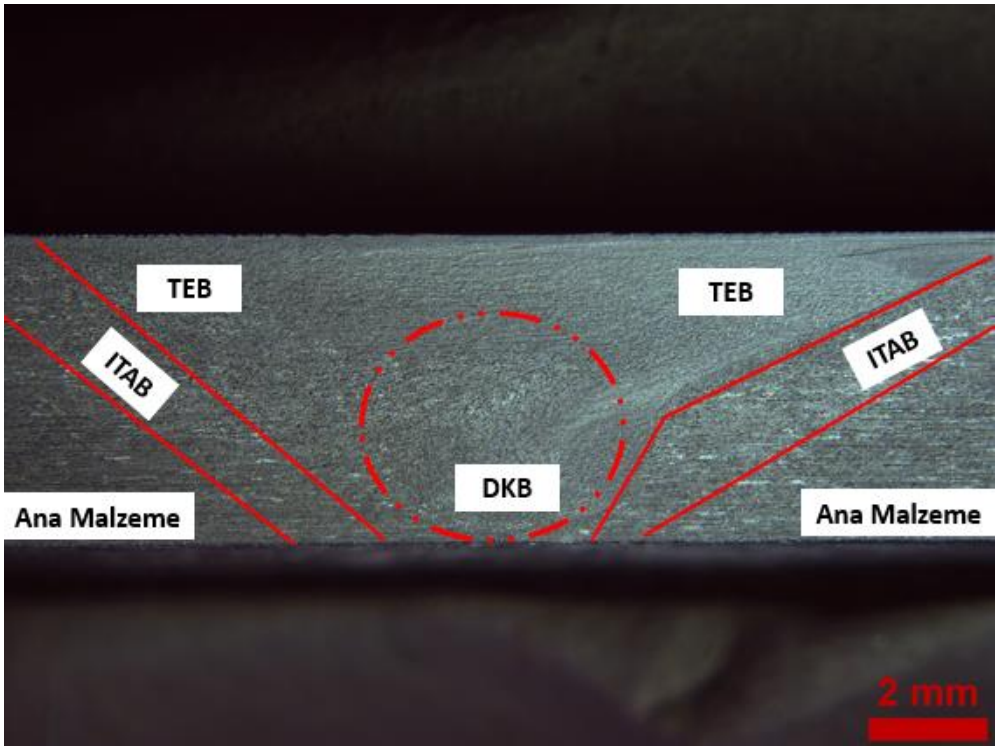
Resim 7.9. 60 mm/dk – 800 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynağa ait optik görüntü

Ana malzeme bölgesi kaynak bölgesinden uzakta olmasından dolayı kaynak sırasında oluşan ısı ve deformasyondan etkilenmediği ve tanelerin haddeleme yönünde hizalandığı gözlemlenmiştir. Yapıda görülen beyaz oluşumların intermetalik bileşikler olduğu düşünülmektedir. Makro görüntülerde dar bir ITAB bölgesi görülmektedir. Bu bölge tanelerin hizalanması açısından ana malzemeye benzerlik göstermektedir. Ancak bölgede ısıdan kaynaklı değişim olduğu tanelerin kabalaşmasından anlaşılmaktadır. Termomekanik olarak etkilenen bölge karıştırma bölgesine bitişik olarak bulunduğundan ısı ve deformasyon etkisiyle yapıda değişim meydana geldiği ve tanelerin uzayarak haddeleme yönünden saptığı tespit edilmiştir. Taneler bükülme morfolojisine sahiptir. Kaynak merkezinde yapıda ana malzemeye göre tane incelmesi meydana geldiği oldukça belirgindir.

Tez çalışmasında en düşük mukavemet elde edilen 90 mm/dk ilerleme hızı ve 1600 dev/dk dönme hızında boşluk oluşumu görülmektedir. Resim 7.10'da 90 mm/dk ilerleme hızında ve 1600 dev/dk dönme hızında kaynaklanan numunenin makro görüntüsü verilmiştir. Kaynak parametreleri TEB ve ITAB bölgesinin şekli, boyutunu ve iki bölgenin sınırının konumunu etkilemektedir. Isı girdisinin yüksek olarak değerlendirildiği ve diğer parametrelere göre düşük mukavemet (125 MPa) elde edilen 90 mm/dk ilerleme hızında ve 1600 dev/dk dönme hızında boşluk oluşumu görülen taraftaki TEB bölgesi boşluk oluşmayan taraf kadar yayılmış ve belirgin bir biçimde görünmemektedir.



Resim 7.10. 90 mm/dk – 1600 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynağa ait optik görüntü



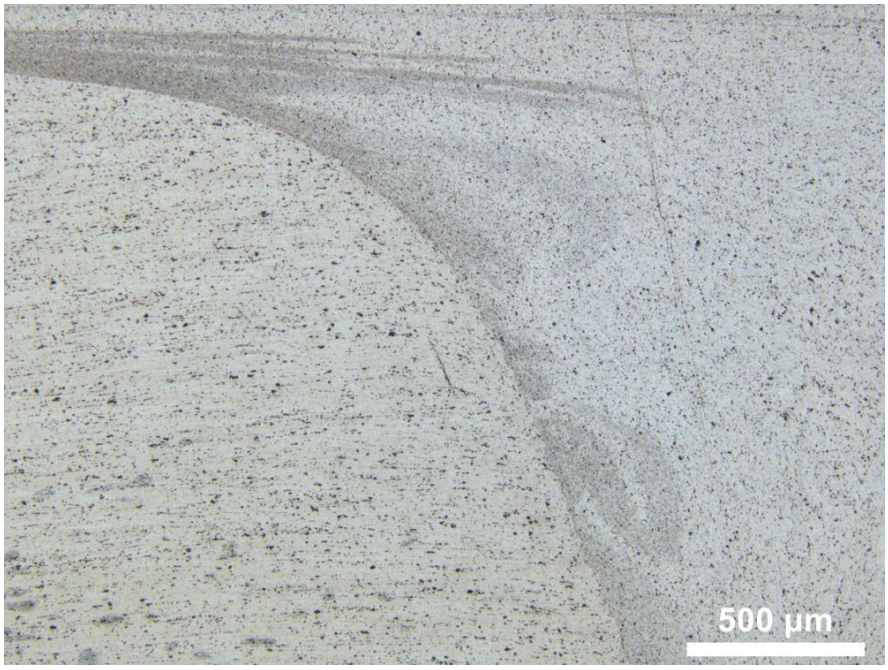
Resim 7.11. 90 mm/dk – 800 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynağa ait optik görüntü

Resim 7.11'de 90 mm/dk ilerleme hızında 800 dev/dk dönme hızında elde edilen optik görüntü verilmiştir. Karakteristik SKK yapı bölgeleri resimden anlaşılabilmektedir.

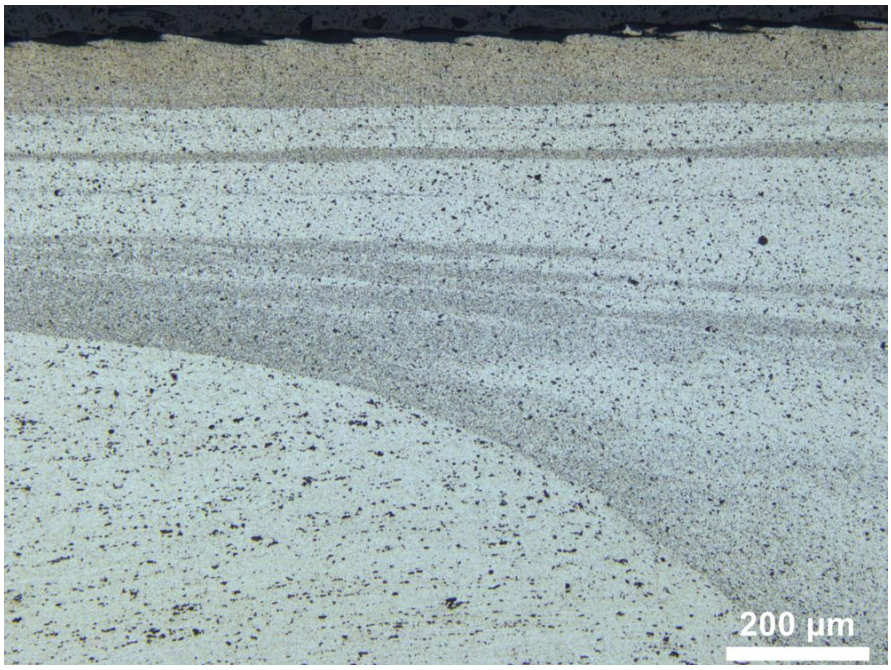
7.4. Mikroyapı İncelemesi

Isının tesiri altındaki bölgeden kaynak merkezine doğru iç yapıda gerçekleşen değişimleri göstermek için 60 mm/dk ilerleme ve 1400 dev/dk dönme hızında elde edilmiş mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Resim 7.12 ve Resim 7.13'de sürtünme karıştırma kaynağında ısıl olarak etkilenen bölgelerin kaynak merkezine göre daha düşük sıcaklığa maruz kalmasından dolayı parçacıkların kabalaşması şeklinde yapı gösterdiği ve kaynak merkezinde iç yapıda plastik deformasyon kaynaklı tane rafinasyonu olduğu görülmektedir.

Kaynak bölgesinden uzakta yapı uzunlamasına tanelerden oluşmaktadır. Yapıda görülen beneklerin intermetalik parçacıklar olduğu düşünülmektedir. Taneler ve intermetalik bileşikler haddeleme yönüne paralel olarak uzandığı mikroyapı resimlerinden anlaşılmaktadır.



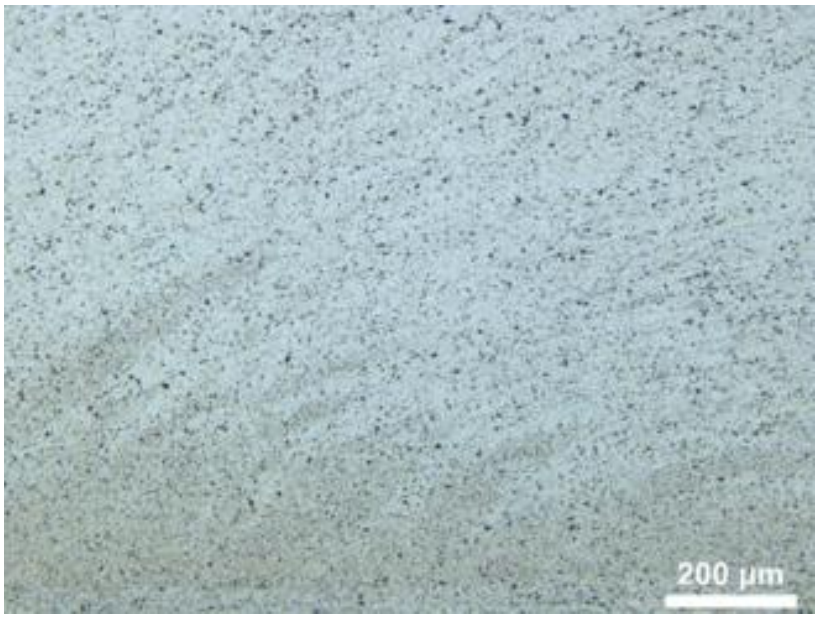
Resim 7.12. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü (500 mikrometre)



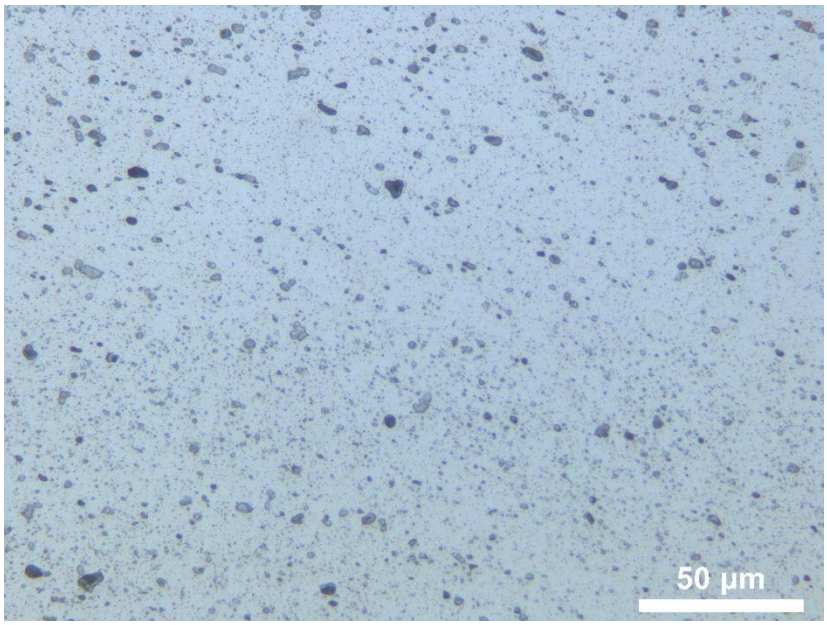
Resim 7.13. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü-1 (200 mikrometre)

Karıştırma bölgesi incelendiğinde kaynak sırasında pimin karıştırma etkisiyle meydana gelen yüksek deformasyonla birlikte ana malzemeden küçük ince tanelerden oluştuğu görülmektedir. Kaynak bölgesinin alt kısımlarında tanelerin daha ince olduğu ve üst bölgelere doğru gidildikçe kaba oluşumların ortaya çıktığı Resim 7.14 ve Resim 7.15'de görülmektedir. Bu duruma alt bölgede büyük oranla pimin deformasyon etkisinin neden

olduğu ancak bunun yanında kaynaklanan işparçasının fikstüre teması nedeniyle üst bölgelere göre düşük sıcaklık oluşumunun da etkisi olduğu ve alt bölgedeki tanelerin büyümesi için yeterli enerji ve sürenin olmaması olduğu düşünülmektedir [55].



Resim 7.14. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü-2 (200 mikrometre)

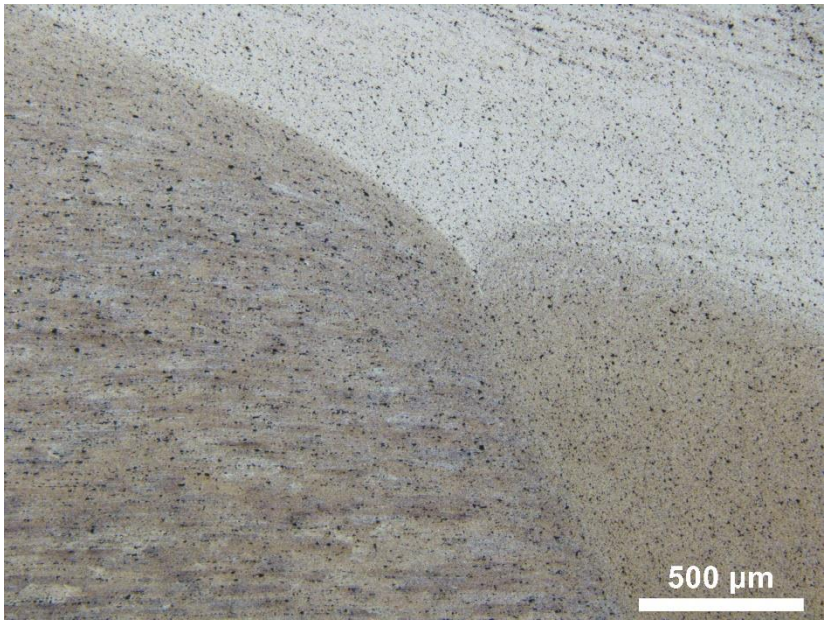


Resim 7.15. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında optik görüntü (50 mikrometre)

Termomekanik olarak etkilenen bölge karıştırma bölgesine bitişik konumda bulunur ancak bu bölgede ulaşılan sıcaklık ve deformasyon yeniden kristalleşmeye neden olacak kadar fazla olmadığından yeniden kristalleşen yapı yerine kesme kuvveti dolayısıyla uzamış

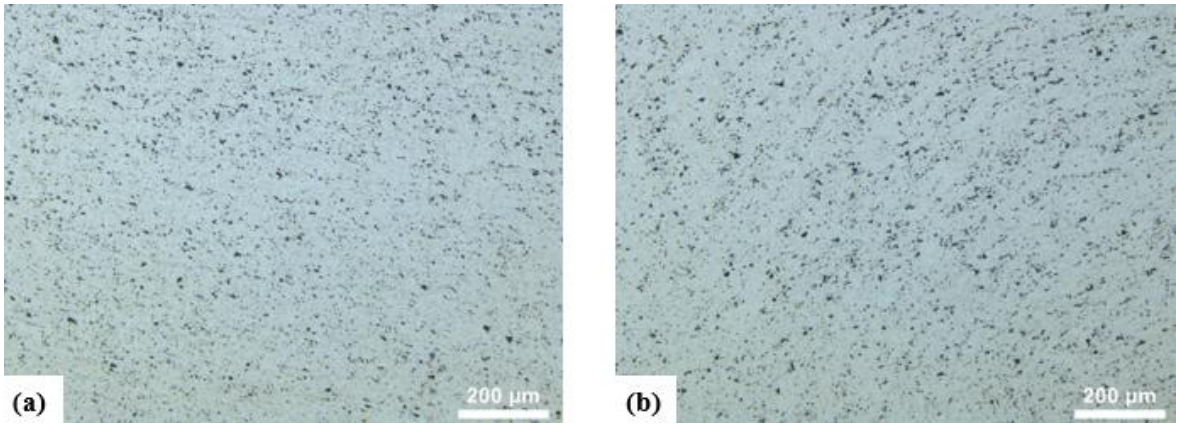
biçimde tane yapısı gözlemlenmektedir. Deformasyon ve ısıdan etkilenen tanelerin haddeleme doğrultusundan saparak bükülme morfolojisi kazandığı görülmektedir. Bu durum Resim 7.12 ve Resim 7.13'de görülebilmektedir.

Optik mikroskop görüntüsü alınan tüm numunelerin karıştırma bölgelerinde yeniden kristalleşme ile birlikte tane incelmesi tespit edilmiştir. Bu durum Resim 7.16'da örneklendirilmiştir.

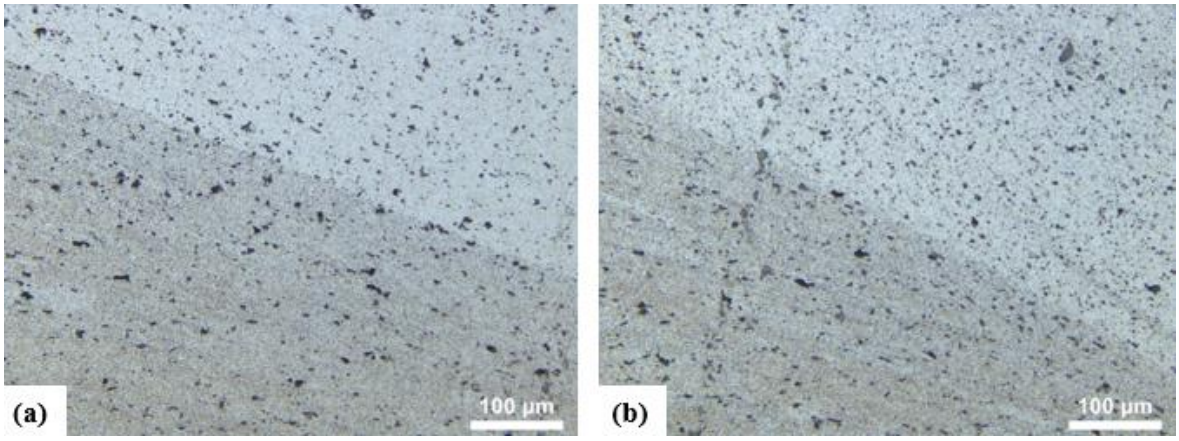


Resim 7.16. 90 mm/dk-800 dev/dk hızında ait optik görüntü (500 mikrometre)

Tane incelmesi ile ısı girdisi arasında ilişki tespit edilebilmektedir. Tane büyümesi ısı girdisi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Aynı ilerleme hızında takım dönme hızının artışında daha yüksek ısı girdisi nedeniyle tane incelmesi daha az olmakta ve uzun soğuma süresi dolayısıyla daha kaba oluşumlu bir yapı gözlemlenmektedir. Bu durum Resim 7.17'de gösterilmiştir. Takım ilerleme hızının artması ısı girdisini azaltmaktadır. Bu nedenle karıştırma bölgesinde düşük sıcaklık elde edilmekte ve kristalizayon sonrası tane büyümesi için daha az zaman kalmaktadır. Dolayısıyla kaynak ve ısıl etkilenen bölgelerde daha küçük boyutlu taneler elde edilmektedir. İlerleme hızı arttıkça ısıl etkilenen bölgede ve kaynak bölgesindeki tane kabalaşması azalmaktadır. Bu durum Resim 7.18'de gösterilmiştir.

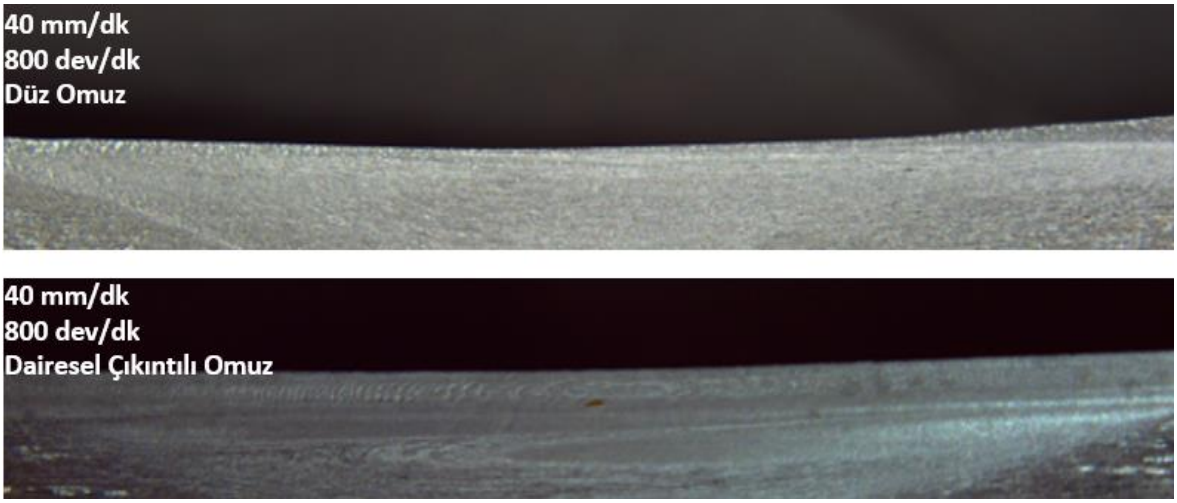


Resim 7.17. 90 mm/dk hızında a) 800 dev/dk, b)1600 dev/dk dönme hızlarında optik görüntüler (200 mikrometre)

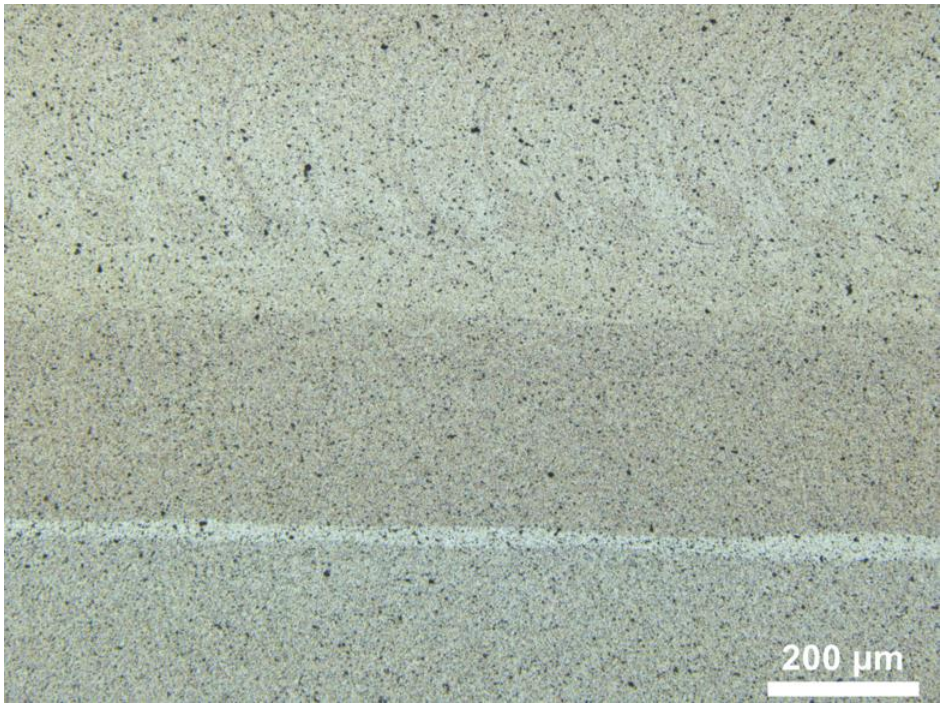


Resim 7.18. 800 dev/dk hızında a) 90 mm/dk, b) 60 mm/dk ilerleme hızlarında optik görüntüler (100 mikrometre)

Resim 7.19'da 40 mm/dk ilerleme hızında 800 dev/dk dönme hızında düz omuz yüzeyli takım ile dairesel çıkıntılı omuz tasarımıyla yapılan kaynakların takım omuzu ile işparçası arayüzüne ait makro görüntü verilmiştir. Dairesel çıkıntılı omuz yüzeyine sahip takımla yapılan kaynakta DKB bölgesinde karşılaşılabilen halka benzeri oluşumlar kaynak üst yüzeyinde de görülürken aynı hız parametreleriyle düz omuz yüzeyine sahip takımla gerçekleşen kaynakta bu oluşumlar görülmemiştir. Bu durum Resim 7.19 ve Resim 7.20'de görülmektedir.



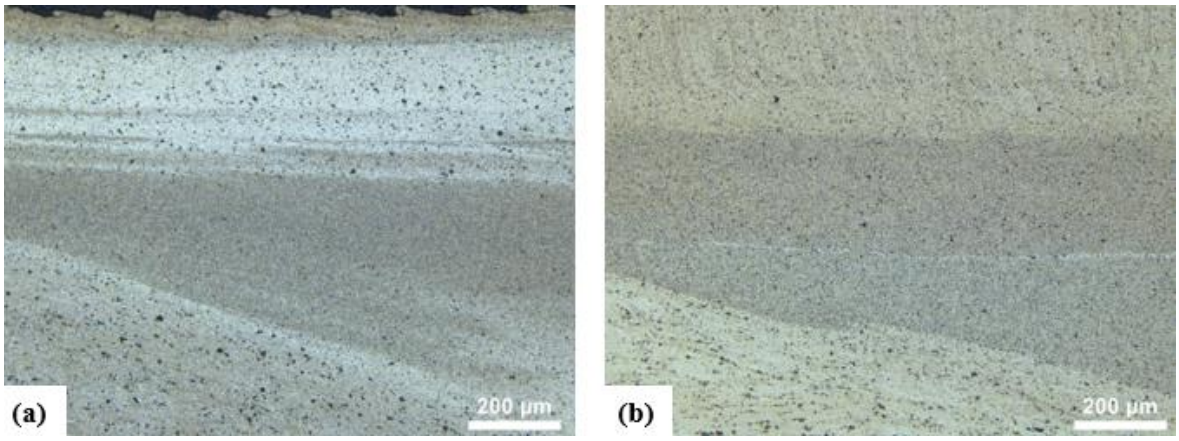
Resim 7.19. 40 mm/dk – 800 dev/dk hızında düz ve dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımlarla yapılan kaynaklara ait makro görüntüler



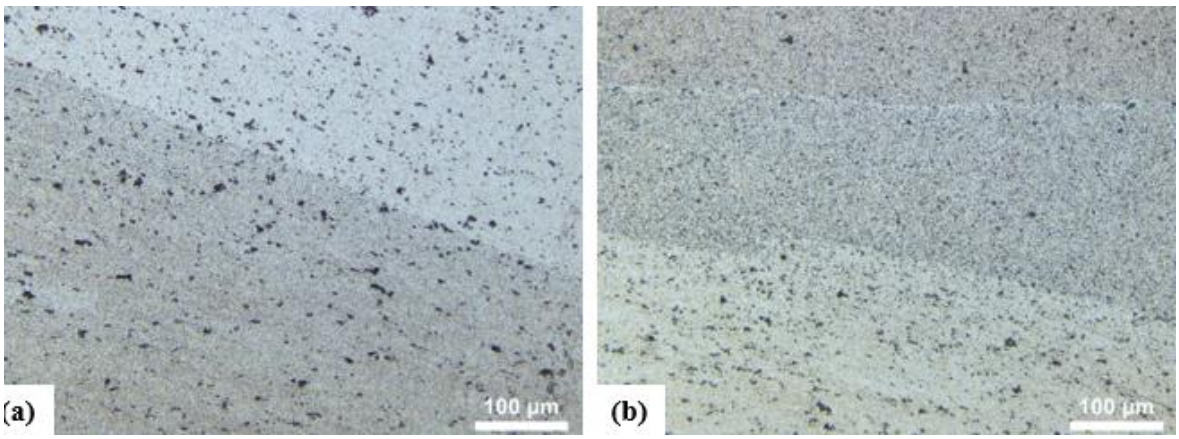
Resim 7.20. 800 dev/dk dönme hızında 40 mm/dk ilerleme hızında dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımla yapılan kaynağa ait optik görüntü (200 mikrometre)

90 mm/dk ilerleme hızında ve 800 dev/dk dönme hızında yapılan kaynaklı bağlantılarda ortalama 183 MPa çekme mukavemeti elde edilmiş olup bu değer düz omuz yüzeyine sahip takımla yapılan diğer takım hızı parametrelerine göre yüksek olarak değerlendirilebilecek bir değerdir. Bu parametrede elde edilen mikroyapı dairesel çıkıntılı omuz yüzeyine sahip takımla karşılaştırılmıştır. Dairesel çıkıntılı omuz yüzeyine sahip takımla yapılan kaynakta dönme hızı 800 dev/dk ilerleme hızı 40 mm/dk kullanıldığı düşünüldüğünde normal

şartlarda ısı girdisinin artışına bağlı olarak tane kabalaşması beklenirken mikroyapıda belirgin kabalaşmalar görülmemiştir. Bu durumu karşılaştıran optik görüntüler Resim 7.21 ve Resim 7.22'de verilmşitir.



Resim 7.21. 800 dev/dk dönme hızında a) 90 mm/dk düz omuzlu, b) 40 mm/dk dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımlara ait optik görüntüler (200 mikrometre)

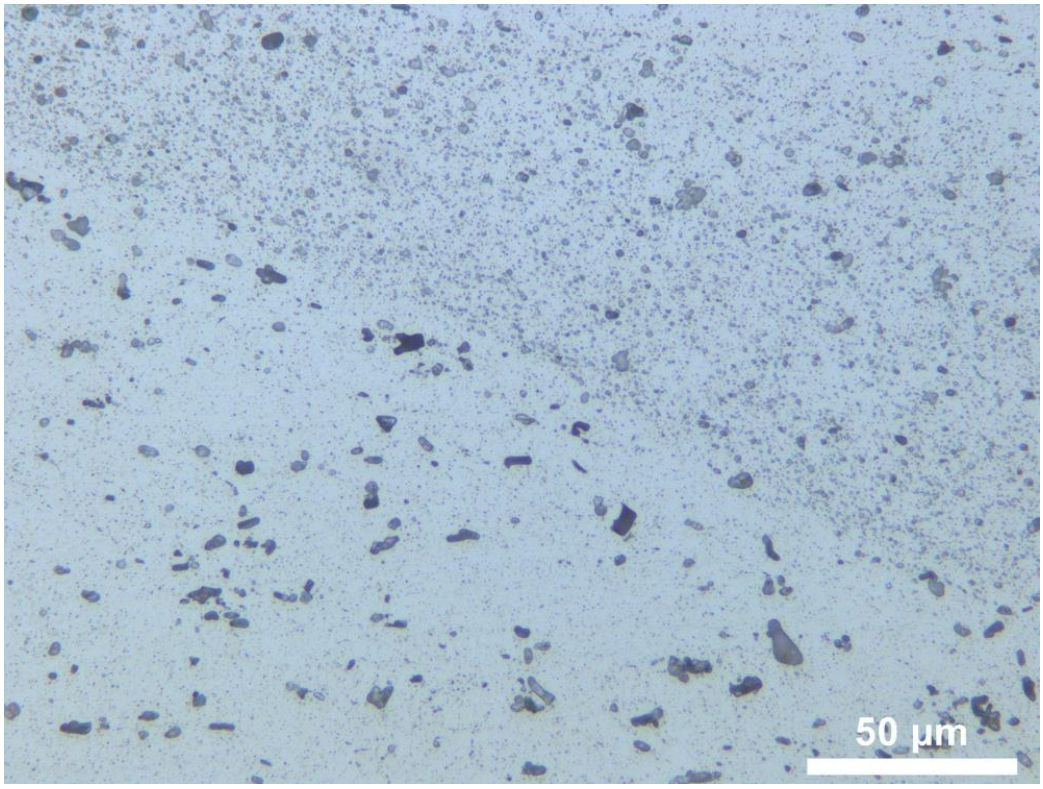


Resim 7.22. 800 dev/dk dönme hızında a) 90 mm/dk düz omuzlu, b) 40 mm/dk dairesel çıkıntılı omuzlu tasarımlara ait optik görüntüler (100 mikrometre)

7.5. Taramalı Elektron Mikroskopu İncelemesi

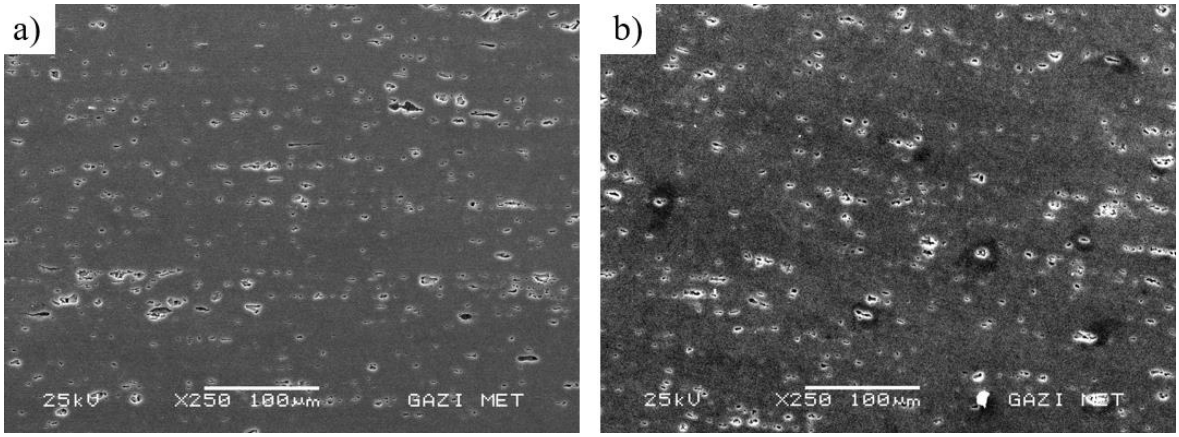
Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisi sonucu yapıda kabalaşmanın ve dinamik kristalleşen bölgeden malzeme akışıyla ısının tesiri altındaki bölgeye kümelenen ve biriken çökeltilerin çekme mukavemetinde etkisini inceleyebilmek için takımın 90 mm/dk ilerleme hızı ve 800 dev/dk dönme hızında kaynakladığı numune için yapının taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi yapılmıştır. Bu takım hızlarında çalışılan kaynakta çekme numuneleri ITAB bölgesinden ve geri çekilen taraftan hasara uğramıştır.

Isı girdisinin artması kaynaklı bağlantıda ısının tesiri altındaki bölgede mukavemeti yükselten partiküllerin kabalaşarak çökelmesiyle çekme mukavemetine olumsuz etki etmektedir [28]. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağı yapılan Al 6061-T6 malzemede kaynak parametrelerinden bağımsız olarak kaynaklı bağlantılarda hasarın gerçekleştiği yerde tane kabalaşması ve kümelenmesi gerçekleşmektedir. Bu durumun Mg_2Si çökeltilerinden plastik akış kaynaklı savrulma dolayısıyla gerçekleştiği bildirilmektedir. Düşük takım ilerleme hızı veya yüksek takım dönme hızı malzeme akışını destekleyerek kabalaşan çökeltilerin kaynak merkezinden savrulup kümelenmesine yol açmaktadır [36]. Isı girdisi kaynaklı çökelti kabalaşmasının ve kaynak merkezinden savrulan çökeltilerin bir yerde kümelenmesinin Al 6061-T6 malzemede çekme mukavemetine etki eden faktörler olduğu düşünülmektedir. Ancak takım ilerleme hızı ve dönme hızındaki ısı girdisindeki artışa neden olacak düşük ilerleme ve yüksek dönme hızının aynı zamanda sürtünme karıştırma kaynağında savrulma mekanizması da destekliyor olması ve kaynak merkezindeki yeniden kristalleşme mekanizması bu durumlardan hangisinin daha baskın olacağına dair çıkarım yapmayı zorlaştırmaktadır. Resim 7.23'de 60 mm/dk-1400 dev/dk parametrelerinde gerçekleştirilen kaynakta ITAB bölgesindeki kaba oluşumlar gösterilmiştir.

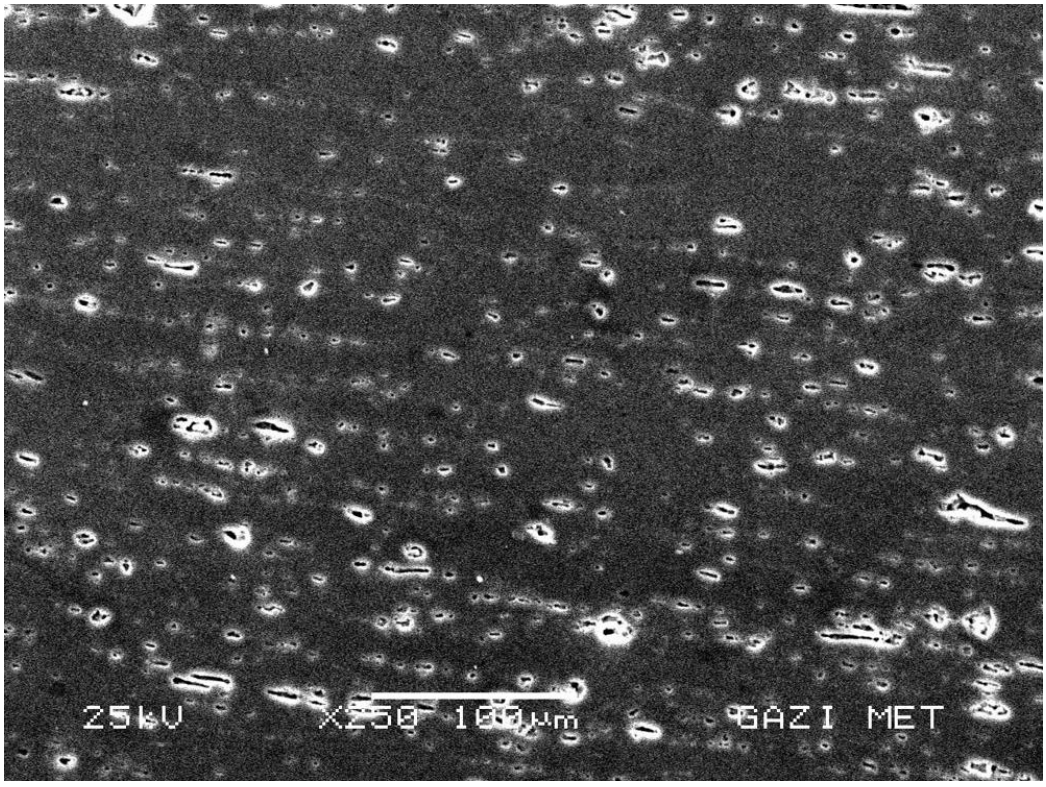


Resim 7.23. 60 mm/dk-1400 dev/dk hızında gerçekleştirilen kaynakta ITAB bölgesindeki kabalaşma

SEM görüntüleri incelendiğinde çökelme irileşmesinin ana yumuşama mekanizması olduğu anlaşılmaktadır. Kaynak merkezine doğru ilerledikçe partikül kabalaşması görülmektedir. Çökeltiler için kaynak merkezi ve kaynak merkezinden uzak bölge karşılaştırıldığında homojen biçimde dağılmış çökeltilerin kaynak merkezinden uzaktaki bölgede kaynak bölgesine göre daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Resim 7.24'de gösterilmiştir.

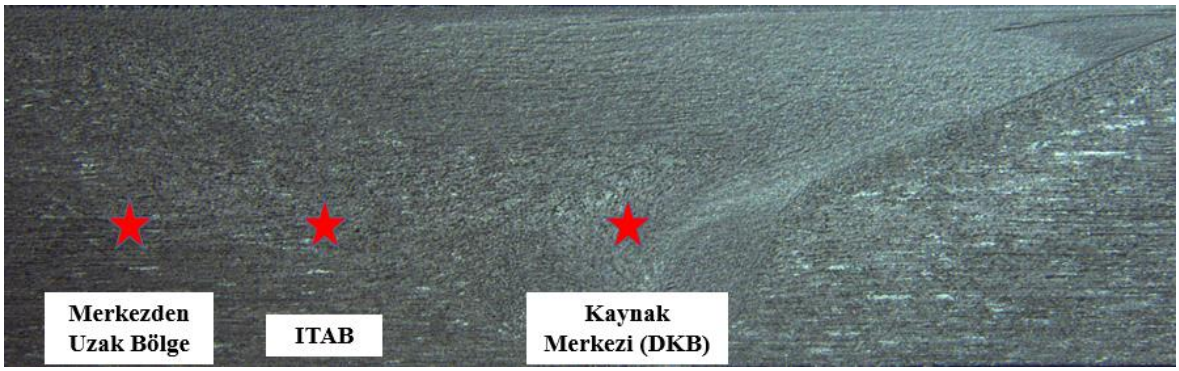


Resim 7.24. a) Kaynak merkezinden uzak, b) kaynak merkezine ait SEM görüntüsü (100 mikrometre)



Resim 7.25. Isının tesiri altındaki bilgeye ait SEM görüntüsü (100 mikrometre)

Resim 7.25’de ısının tesiri altındaki bölgeye ait SEM görüntüsü verilmiştir. Isının tesiri altındaki bölgede çökelti oluşumlarının daha kaba olduğu görülmektedir ve bazı partiküllerin uzunluğunda artış belirgindir.

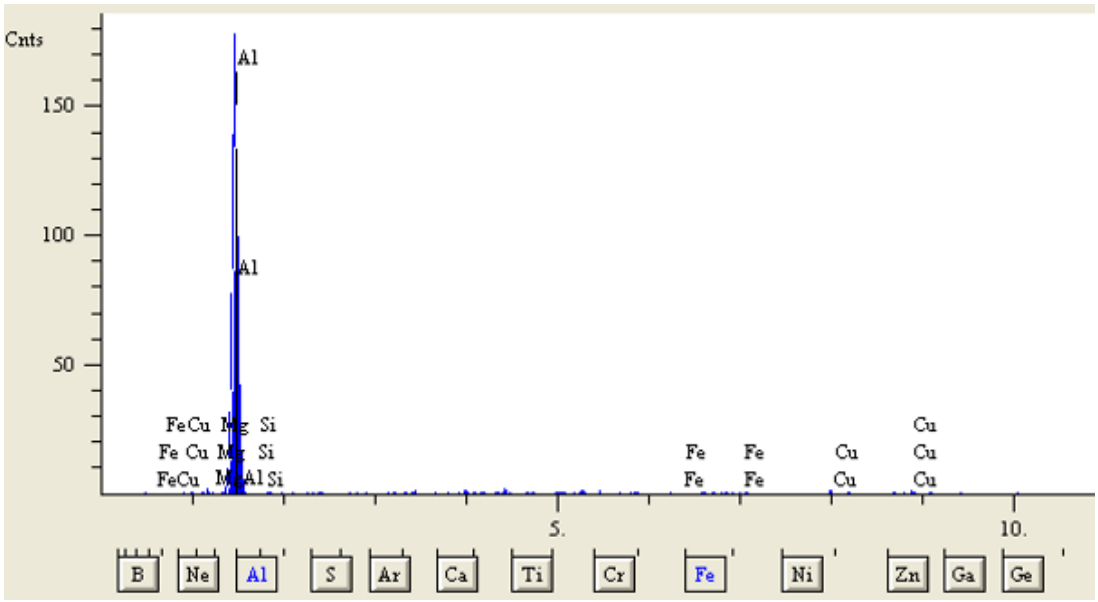


Resim 7.26. EDS analizi için numune üzerinde çalışılan lokasyonların gösterimi

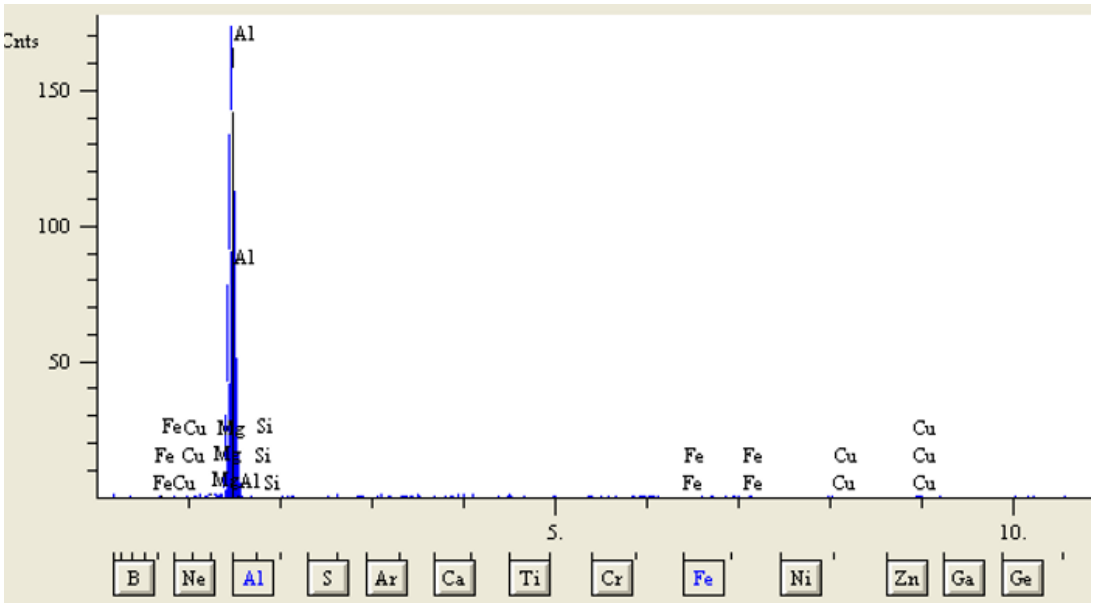
SEM ve enerji dağılımı spektrometresi (EDS) analizi için çalışılan alanlar Resim 7.26’da işaretlenmiştir. Kaynaklı yapıda maznezyum ve silisyumun malzemede EDS analizinde görülebilen diğer elementlere göre yüzdesel oranı Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Lokasyona bağlı değişken magnezyum ve silisyum kompozisyonları

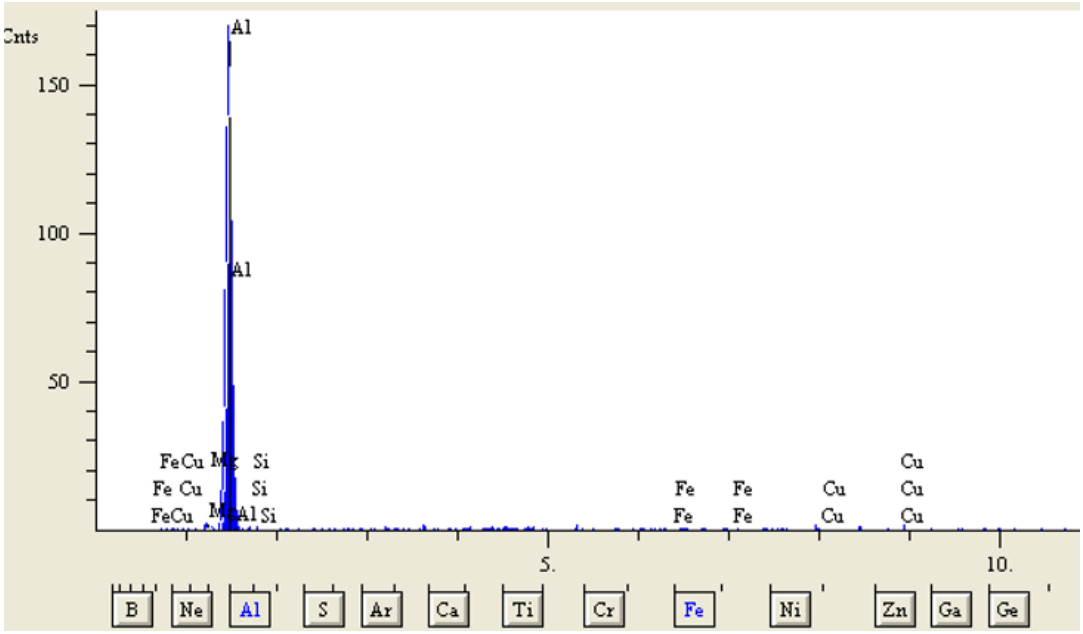
Lokasyon	% Mg Kompozisyonu	% Si Kompozisyonu	% Mg + Si
Kaynak Merkezi (DKB)	0,568	2,198	2,766
ITAB	0,662	2,348	3,01
Merkezden Uzak Bölge	0,755	1,644	2,399



Şekil 7.12. Kaynak merkezi enerji dağılımı spektrometresi sonuçları



Şekil 7.13. ITAB enerji dağılımı spektrometresi sonuçları



Şekil 7.14.Merkezden uzak bölge enerji dağılımı spektrometresi sonuçları

Magnezyum kaynak bölgesinde daha az görülmektedir. Kaynak bölgesinden ITAB ve kaynak merkezinden uzaktaki bölgeye doğru gidildikçe magnezyum oranı artmaktadır. Ancak yüzdesel olarak bakıldığında bu değişim bir füzyon kaynağı yöntemi olan elektron ışın kaynağı ile kaynaklanmış 6061-T6 malzemedeki kadar yüksek olmamıştır [56]. Bu durumun sürtünme karıştırma kaynağındaki ısı girdisinin füzyon kaynak yöntemlerine göre düşük olması sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Dinamik kristalleşen bölgede (DKB) tespit edilen % 0,568 maznezyum oranı ITAB bölgesinde % 1,254 değerine yükselmekteyken merkezden uzak bölgede azalarak % 0,755 olarak tespit edilmiştir. Magnezyum ve silisyumun toplam yüzdesel ağırlığına bakıldığında DKB bölgesinde % 2,766, ITAB bölgesinde % 3,01, merkezden uzaktaki bölgede ise % 2,399 olarak bulunmuştur. Ayrıca ITAB bölgesinin magnezyum, silisyum, bakır ve demir oranlarınında fazla olarak görülmesi bölgede çökelti/bileşik oluşumlarını doğruladığı düşünülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak alüminyum 6061-T6 alaşımı kaynaklanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağında ilerleme hızı, dönme hızı ve takım omuz tasarımının işleme olan etkileri incelenmiştir. Deneyler için düz omuzlu, dairesel çıkıntılı omuzlu ve dairesel girintili omuzlu takımlar kullanılmıştır. Kaynak işlemleri CNC kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi öncesinde alın kaynağı yapılacak plakaların yüzey temizleme işlemleri yapılmıştır. Kaynak işlemi sonrası ise oluşan çapaklar zımparalama ile temizlenmiştir. Daha sonra kaynaklı plakalardan çekme testlerinde ve mikroyapı incelemelerinde kullanılmak üzere numune kesimi yapılmıştır.

Deneysel çalışmaların birinci bölümünde ilerleme ve dönme hızlarının çekme mukavemetine olan etkileri ele alınmıştır. Bu doğrultuda iki farklı ilerleme hızında dört farklı dönme hızı test edilmiştir. Kaynaklı plakalardaki görsel inceleme sonucunda çapak oluşumunun plakaların geri çekilen tarafında oluştuğu ve artan dönme hızlarıyla daha büyük boyutlarda oluştuğu gözlemlenmiştir. Çekme testi sonucunda ısı girdisi ile çekme mukavemeti arasındaki bağlantı doğrulanmıştır. 60 mm/dk ve 90 mm/dk ilerleme hızlarında dönme hızlarının 800 devirden 1600 devire kademeli çıkışı çekme mukavemetini azaltıcı yönde eğilim göstermiştir. Dönme hızı sabit tutulup ilerleme hızındaki değişimin çekme mukavemetine etkisine bakıldığında 60 mm/dk ilerleme hızında 90 mm/dk'ya göre daha düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. En iyi çekme mukavemetleri 90 mm/dk-800 dev/dk, 90 mm/dk-1200 dev/dk ve 60 mm/dk-800 dev/dk parametrelerinde sırasıyla 183,66 MPa, 183,76 MPa ve 177,26 MPa olarak tespit edilmiştir. Yüksek mukavemete sahip numunelerde % uzama miktarı da daha yüksek elde edilmiştir.

Deneyin ikinci bölümünde ise takım onuz tasarımının çekme mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda tasarlanan üç farklı omuza sahip sürtünme karıştırma kaynağı takımları 800 dev/dk dönme hızında ve 40 mm/dk ilerleme hızında plakaları alın kaynağı konfigürasyonunda kaynaklamak için kullanılmıştır. Deneyin birinci bölümünde ısı girdisinin işleme olan etkisi kritik olarak tespit edilmiştir. Deneyin ikinci bölümünde kaynak işlemi sırasında sıcaklık takibi termal kamera ile yapılmıştır. En yüksek sıcaklığın düz omuzlu takım kullanımıyla oluştuğu belirlenmiştir. Kaynaklı plakalarda çapak oluşumu geri çekilen tarafta oluşurken en küçük dikiş profilinin dairesel girintili omuz yüzeyi tasarımıyla

kaynak yapılan plakada oluşmuştur. Bunun nedeninin takım omuzundaki girintilerin işlem sırasında deformasyona bağlı oluşan talaşı hapsetmesi ve yeni oluşan talaşı da omuz dışına doğru çıkışını önlemesi olduğu düşünülmektedir. Düz omuz ucu tasarımına sahip takımla çalışılan kaynakta çekme mukavemeti 163,4 MPa olarak tespit edilirken çıkıntılı dairesel omuz ucu tasarımıyla yapılan kaynakta çekme mukavemeti 190,1 MPa olarak belirlenmiştir. Sonuçlar omuz ucu yüzeyi tasarımıyla çekme mukavemetinde artış sağlanabileceği potansiyelini göstermektedir.

Yapılan makroyapı, mikroyapı ve taramalı elektron mikroskopu incelemelerinde çalışılan kaynak hızı parametrelerinde ısı girdisi artışının tanelerdeki ve çökeltilerdeki kabalaşmayı desteklediği görülmektedir. 90 mm/dk ilerleme hızında 800 dev/dk dönme hızında çalışılan kaynaktan elde edilen çekme numunelerinin ısıl etkilenen bölgeden hasara uğraması nedeniyle bu bölgedeki çökelti oluşumları incelenmiş ve kaba oluşumların bu bölgede kümelendiği tespit edilmiş ve sonuçlar enerji dağılımı spektrometresi sonuçlarıyla doğrulanmıştır. 90 mm/dk ilerleme hızı ve 800 dev/dk kaynak hızı parametreleriyle düz omuz yüzeyi kullanılarak yapılan kaynağın dairesel çıkıntılı omuz yüzeyi tasarımıyla yapılan kaynaktaki ilerleme hızı (40 mm/dk) değerine göre yüksek olmasına rağmen kaynaklı yapılarda kabalaşma açısından belirgin farklar görülmemektedir. Bu duruma dairesel çıkıntılı omuz yüzeyi tasarımının kaynak sıcaklığını düşürerek malzemede plastik deformasyonu arttırması ve daha iyi karıştırma sağlamasının neden olduğu düşünülmektedir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalar için:

- Sürtünme karıştırma kaynaklı parçalarda en iyi parametrelerin yorulma davranışlarının incelenmesi
- Sürtünme karıştırma kaynağında en iyi çekme mukavemeti için takım hızı ve takım tasarımı özelliklerine göre hız parametrelerini ve tasarımı şekillendirebilecek matematiksel model geliştirilmesi

konuların incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Çam, G., İpekoğlu, G. (2017). Recent developments in joining of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 1851–1866.

2. Verma, RP., Kumar, L.M. (2021). A short review on aluminium alloys and welding in structural applications. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10687–10691.

3. Joshi, S., Namjoshi, S., Paliwal, D. (2020). Effect of tool geometry on friction stir welded 6061 aluminum alloy. *Materials Today: Proceedings*, 24, 738–745.

4. Çam, G., Mistikoglu, S. (2014). Recent developments in friction stir welding of al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1936–1953.

5. Joshi, SK., Gandhi, JD. (2015). Influence of tool shoulder geometry on friction stir welding: a literature review. *2nd International Conference on Multidisciplinary Research & Practice*, 3, 261–264.

6. Kah, P., Rajan, R., Martikainen, J., Suoranta, R. (2015). Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(26), 1-10.

7. Threadgill, PL., Leonard, AJ., Shercliff, HR., Withers, PJ. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 54, 49–93.

8. Ramanjaneyulu, K., Madhusudhan, R.G., Venugopal, R.A. (2014). Role of tool shoulder diameter in friction stir welding: an analysis of the temperature and plastic deformation of AA 2014 aluminium alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67, 769–780.

9. Asmare, A., Al-Sabur, R., & Messele, E. (2020). Experimental investigation of friction stir welding on 6061-T6 aluminum alloy using Taguchi-based GRA. *Metals*, 10(11), 1480 (21).

10. Mugada, KK., Adepu, K. (2018). Influence of tool shoulder end features on friction stir weld characteristics of Al-Mg-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 1553–1566.

11. Meilinger, Á., Török, I. (2013). The importance of friction stir welding tool. *Production Processes and Systems*, 6, 25–34.

12. Mathers, G. (2002). *The Welding of Aluminium and its Alloys.* Cambridge: Woodhead publishing, 1-46.

13. Totten, G. E., MacKenzie, DS. (2003). *Handbook of Aluminum (Volume 1). Physical metallurgy and processes* New York : Marcel Dekker, Inc., 37.

14. Büyükarslan, S. (2006). *Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 3-40.

15. Davis, JR. (2001). *Alloying: Understanding the Basics.* Ohio, ASM International, 351-416.

16. İnternet : Al6061-T6 kimyasal kompozisyonu URL: https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6, Son Erişim Tarihi: 18.07. 2022.

17. Yılmaz, SS., Ünlü, BS., Uzkut, M., Ertürk, D. (2016). Alüminyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 57(676), 56–63.

18. Singh, RP., Kumar, S., Dubey, S., Singh, A. (2021). A review on working and applications of oxy-acetylene gas welding. *Materials Today: Proceedings*, 38, 34–39.

19. Oğuz, B. (1990). *Demir Dışı Metallerin Kaynağı,* Türkiye: Oerlikon Yayını, 864.

20. Durgutlu, A. (2007). Alüminyumun TIG kaynağında argon-hidrojen gaz karışımının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi. *Politeknik Dergisi*, 10(3), 271–276.

21. Aktaşoğlu, C., Hayat, F. (2018). *Hafif metallerin kullanımı ve elektron ışın kaynağı ile kaynaklanabilirlikleri.* 4th International Symposium on Railway System Engineering, Karabük, 644–648.

22. Atkaya, M. (2021). *Alüminyum 6061 T6 Özelliğindeki Malzemenin Elektron Işın Kaynağı Yöntemi İle Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-26.

23. Yürük, A., Kaya, Y., Kahraman, N. (2021). Alüminyum alaşımlarının MIG kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 43–52.

24. Orhan, A. (2008). *Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen Fe Esaslı Kaplama Tabakalarının Aşınma ve Mikroyapı Karakteristiklerinin Araştırılması,* Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 91-92.

25. Aydın, K., Karaağaç, İ. (2018). Lazer kaynağı ve lazer kaynağının başlıca uygulamaları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi,* 5(2), 693–705.

26. Meriç, C., Köksal, NS., Erdoğan, MT., Okur, A. (2008). Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 4(2), 135–144.

27. Kafali, H., Ay, N. (2014). Havacılıkta kullanılan 6013-T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 18(1), 38–47.

28. Şık, A., Kayabaş, Ö. (2003). Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 11(12), 30–43.

29. Mugada, KK., Adepu, K. (2018). Influence of ridges shoulder with polygonal pins on material flow and friction stir weld characteristics of 6082 aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 625–634.

30. Bastier, A., Maitournam, MH., Dang, VK., Roger, F. (2006). Steady state thermomechanical modelling of friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11, 278–288.

31. Nandan, R., Debroy, T., Bhadeshia, H. (2008). Recent advances in friction stir welding – process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53, 980–1023.

32. Ma, ZY., Feng, AH., Chen, DL., Shen, J. (2018). Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: microstructural evolution and mechanical properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 43, 269–333.

33. Zhang, YN., Cao, X., Larose, S., Wanjara, P. (2012). Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51, 250–261.

34. Cederqvist, L., Sorensen, CD., Reynolds, AP., Öberg, T. (2009). Improved process stability during friction stir welding of 5 cm thick copper canisters through shoulder geometry and parameter studies. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14, 178–184.

35. Çam, G. (2005). Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) : Al-alaşımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi. *Mühendis ve Makina*, 46(541), 30–39.

36. Lim, S., Kim, S., Lee, CG., Kim, S. (2004). Tensile behavior of friction-stir-welded Al 6061-T651. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35, 2829–2835.

37. Trimble, D., O'Donnell, GE., Monaghan, J. (2015). Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3. *Journal of Manufacturing Processes*, 17, 141–150.

38. Bilgin, MB., Meran, C. (2012). The effect of tool rotational and traverse speed on friction stir weldability of AISI 430 ferritic stainless steels. *Materials & Design*, 33, 376–383.

39. Çetkin, E., Çelik, YH., Temiz, Ş. (2019). Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA5182/AA7075 alaşım bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 603–612.

40. Maneiah, D., Mishra, D., Rao, KP., Raju, KB. (2020). Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints. *Materials Today: Proceedings*, 27, 904–908.

41. Dorbane, A., Ayoub, G., Mansoor, B., Hamade, R.F., Imad, A. (2017). Effect of temperature on microstructure and fracture mechanisms in friction stir welded Al6061 joints. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 26, 2542–2554.

42. Emamian, S., Awang, M., Yusof, F., Hussain, P., Meyghani, B., Zafar, A. (2019). The effect of pin profiles and process parameters on temperature and tensile strength in friction stir welding of AL6061 alloy. *The Advances in Joining Technology*. Springer Singapore, Singapore, 15–37.

43. Ahmadi, M., Rahmatabadi, D., Pahlavani, M., Marzbanrad, J., Hashemi, R., Afkar, A. (2021). Experimental study of the defects, mechanical and microstructural characteristics of friction-stir-welded Al 6061 sheets. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9(3), 035012.

44. Kumbhar, NT., Bhanumurthy, K. (2008). Friction stir welding of Al 6061 alloy. *Asian Journal of Experimental Sciences*, 22(2), 63–74.

45. Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A., Nazari, E. (2012). Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints. *Materials & Design*, 37, 166–173.

46. İpekoğlu, G., Akçam, Ö., Çam, G. (2018). Farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhaların sürtünme karıştırma kaynağı için uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 324–335.

47. Galvão, I., Leal, RM., Rodrigues, DM., Loureiro, A. (2013). Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds in thin copper sheets. *Journal of Materials Processing Technology,* 213, 129–135.

48. Trueba, L., Heredia, G., Rybicki, D., Johannes, LB. (2015). Effect of tool shoulder features on defects and tensile properties of friction stir welded aluminum 6061-T6. *Journal of Materials Processing Technology,* 219, 271–277.

49. Zhang, Z., Liu, YL., Chen, JT. (2009). Effect of shoulder size on the temperature rise and the material deformation in friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45, 889–895.

50. Mugada, KK., Adepu, K. (2019). Effect of knurling shoulder design with polygonal pins on material flow and mechanical properties during friction stir welding of Al–Mg–Si alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29, 2281–2289.

51. Mugada, KK., Adepu, K. (2021). Role of scroll shoulder and pin designs on axial force, material flow and mechanical properties of friction stir welded Al–Mg–Si alloy. *Metals and Materials International*, 27, 2809–2820.

52. Scialpi, A., De Filippis, LAC., Cavaliere, P. (2007). Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy. *Materials & Design*, 28, 1124–1129.

53. İnternet: AISI 4140 kimyasal kompozisyonu URL :https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8b43d8b59e4140b88ef666336ba7371a&ckck=1, Son Erişim Tarihi: 18.07.2022.

54. American Society for Testing and Materials (ASTM), (2016). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8 / E8M – 16, West Conshohocken, PA, 1-30.

55. He, J., Ling, Z., Li, H. (2016). Effect of tool rotational speed on residual stress, microstructure, and tensile properties of friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy thick plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 1953–1961.

56. Küçüktürk, G., Atkaya, M. (2022). Numerical and experimental study for electron beam welding process of Al6061-T6 material. *Materials Research Express*, 9, 046504.



Gazili olmak ayrıcalıktır