

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

**GAZALTI (MIG) KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN 6061
SERİSİ ALÜMİNYUM PLAKALARINA YAPILAN KAYNAK
TAMİRİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ARSLAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2023

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

**GAZALTI (MIG) KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN 6061
SERİSİ ALÜMİNYUM PLAKALARINA YAPILAN KAYNAK
TAMİRİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ARSLAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nil TOPLAN

HAZİRAN 2023

Mustafa ARSLAN tarafından hazırlanan “Gazaltı (MIG) Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen 6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan Kaynak Tamirinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi” adlı tez çalışması 15.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Nil TOPLAN** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ahmet ÖZEL**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AKÇİL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “GAZALTI (MIG) KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN 6061 SERİSİ ALÜMİNYUM PLAKALARINA YAPILAN KAYNAK TAMİRİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(15/06/2023).

Mustafa ARSLAN

TEŞEKKÜR

Tezimin tüm aşamalarında bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, hiçbir yardımı esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Nil TOPLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında tüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan Türasaş Sakarya Bölge Müdürlüğü Alüminyum Gövde Üretim Fabrikası Müdürlüğü Çalışanlarına, Kaynak Eğitim ve Laboratuvar Müdürlüğü Çalışanlarına ve Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvar olanakları için bölüm başkanlığına ve bütün öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın yürütülmesinde fikir desteği ve yardımlarıyla katkılarından dolayı Mahmud Cemaleddin YALÇIN, Mete YILDIRIM ve Yusuf KÜPRAY'a teşekkür ederim.

Değerli eşim Cansu AKTAŞ ARSLAN'a, başta abim Alikemal ARSLAN olmak üzere hayatımın her döneminde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Mustafa ARSLAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
GAZALTI (MIG) KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN 6061 SERİSİ ALÜMİNYUM PLAKALARINA YAPILAN KAYNAK TAMİRİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ	xxiii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	7
2.1. Alüminyumun Özellikleri	7
2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	9
2.2.1. 6XXX serisi alüminyum alaşımları	10
2.2.1.1. 6061 T6 alüminyum alaşımları	11
2.3. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler	12
2.3.1. Çökelme sertleşmesi	13
2.3.2. Isıl işlem görebilen alaşımlarda sertleştirme mekanizmaları	17
2.3.3. 6061-T6 Alüminyum alaşımının çökeltme sertleşmesi	17
2.3.3.1. Çözeltiye alma ısıl işlemi	18
2.3.3.2. Yaşlandırma ısıl işlemi	18
3. KAYNAK YÖNTEMLERİ	21
3.1. MIG - MAG Kaynağı	23
3.1.1. Ekipman	25
3.1.1.1. Güç kaynağı	26
3.1.1.2. Tel ve aksesuarlar	28
3.1.1.3. Tel besleme tabancası	29
3.1.1.4. Koruyucu gaz	30
3.1.2. MIG kaynağı uygulama alanları	30
3.1.3. Kaynak proses parametreleri	31
3.1.3.1. Elektrot çapı	31
3.1.3.2. Voltaj	31
3.1.3.3. Tel besleme hızı ve akımı	31
3.1.3.4. Kaynak hızı	32
3.1.3.5. İndüktans	32
3.1.3.6. Elektrot	32
3.1.3.7. Koruyucu gaz ve gaz akış hızı seçimi	33

3.1.3.8. Torç ve birleştirme pozisyonu.....	33
3.2. TIG Kaynağı.....	34
3.2.1. TIG kaynağı temelleri	35
3.2.1.1. Arkın karakteristiği	36
3.2.2. Elektrotlar.....	37
3.2.2.1 Elektrot tipinin tanımlanması	38
3.2.3. Ark kaynak makinesi seçimi (AC veya DC).....	38
3.2.3.1. Doğru akım (DC)	39
3.2.3.2. Alternatif akım (AC)	39
3.2.4. Kullanılan koruyucu gazlar	39
3.3. Kaynak Pozisyonları.....	42
3.4. Kaynak Birleştirme Yöntemleri	43
3.5. Kaynak Hataları.....	45
3.5.1. Alüminyum kaynak süreksizlikleri	45
3.5.1.1. Porozite.....	46
3.5.1.2. Hidrojen kaynaklı gözenek.....	47
3.5.1.3. Deformasyon	48
3.5.1.4. Burkulma distorsiyonu	49
3.5.1.5. Kaynak gerilmeleri.....	49
3.5.1.6. Deformasyonun azalması	50
3.5.1.7. Çatlak	51
3.5.1.8. Korozyon.....	54
3.6. Kaynak Sonrası Mukavemet.....	55
3.6.1. Mukavemeti azaltan etkenler	56
3.7. Kaynak Sonrası Kontrol	57
4. KAYNAKLI İMALATTA TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENE	
YÖNTEMLERİ	59
4.1. Tahribatsız Muayene Yöntemleri	59
4.1.1. Gözle muayene yöntemi.....	60
4.1.2. Manyetik parçacık muayenesi	62
4.1.3. Sıvı penetrant muayenesi	64
4.1.4. Ultrasonik muayene.....	66
4.1.5. Radyografik muayene	67
4.2. Tahribatlı Muayene Yöntemleri	70
4.2.1. Sertlik testi.....	70
4.2.2. Çekme deneyi.....	71
4.2.3. Eğme testi.....	72
4.2.4. Darbe testi	73
4.2.5. Makro inceleme.....	74
4.2.6. Mikroyapı inceleme.....	74
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
5.1. Deney Programı.....	77
5.2. Kullanılan Malzemeler	78
5.2.1. 6061 T6 serisi Al plakalar	78
5.2.2. Dolgu malzemesi.....	79
5.3. Kaynak Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar	80
5.3.1. İşlem sırası.....	81
5.4. Muayene Yöntemleri	82
5.4.1. Gözle muayene.....	82
5.4.2. Penetrant test	83

5.4.3. Radyografik test	84
5.4.4. Makroyapı inceleme.....	84
5.4.5. Mikroyapı inceleme	84
5.4.5.1. SEM cihazı ve özellikleri	85
5.4.6. X-ışınları analizi.....	86
5.4.7. Sertlik deneyi	86
5.4.8. Çekme ve eğme deneyi	87
6. DENEYSEL BULGULAR	89
6.1. Kaynaklı Numunelerin Tahribatsız Muayene Sonuçları	89
6.1.1. Gözle muayene sonuçları	89
6.1.2. Penetrant test sonuçları	90
6.1.3. Radyografik muayene sonuçları.....	91
6.2. Kaynaklı Numunelerin Tahribatlı Muayene Sonuçları	92
6.2.1. Makroyapı inceleme sonuçları	93
6.2.2. Çekme – Eğme test sonuçları.....	96
6.2.3. Sertlik deneyi sonuçları.....	100
6.2.4. Optik mikroyapı inceleme sonuçları	102
6.2.5. SEM-EDS sonuçları	104
6.2.6. XRD sonuçları.....	111
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113
7.1. Sonuçlar.....	113
7.2. Öneriler.....	114
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ.....	121

KISALTMALAR

AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
DIN	: Alman Standardizasyon Enstitüsü
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometre
EN	: Avrupa Standardı
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
ITAB	: Isı tesiri altında kalan bölge
MAG	: Metal aktif gaz
MIG	: Metal inert gaz
MT	: Manyetik parçacık testi
PT	: Penetrant test
RT	: Radyografik test
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TIG	: Tungsten inert gaz
XRD	: X ışınları difraksiyon analizi
UT	: Ultrasonik test
VT	: Gözle muayene testi

SİMGELER

A	: Amper
AA	: Alüminyum alaşımı
Al	: Alüminyum
Ar	: Argon
BHN	: Brinell sertlik değeri
°C	: Santigrad derece
He	: Helyum
HV	: Vickers
J	: Joule
kg	: Kilogram
KHN	: Knoop sertlik değeri
kN	: Kilonewton
ksi	: İnç başına düşen kilopounds
mm	: Milimetre
ppm	: Milyonda bir birim
Rm	: Maksimum çekme mukavemeti (MPa)
Rp	: Akma mukavemeti (MPa)
T6	: Isıl işlem kodu yapay yaşlandırılmış
VHN	: Vickers sertlik değeri

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri.	8
Tablo 2.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.	9
Tablo 2.3. AA6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	11
Tablo 2.4. Alüminyum ve alaşımlarının ürün halleri ve uygulama alanları.....	11
Tablo 2.5. AA6061 T6 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri.	12
Tablo 2.6. AA6061 T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	12
Tablo 2.7. T temper kodları.	13
Tablo 2.8. H temper kodları.	13
Tablo 2.9. Al-Si-Mg alaşımlarının yaşlanması sırasında faz dönüşümü.....	15
Tablo 3.1. Standart uzunluktaki tungsten elektrotların nominal ağırlığı.....	37
Tablo 3.2. Argon ile kullanım için önerilen kaynak parametreleri.	40
Tablo 3.3. Kullanılan gazların kimyasal davranışları ve uygulama alanları..	41
Tablo 3.4. Farklı yöntemlerle yapılan kaynak öncesi ve sonrası ana metallerin mukavemet değerleri. MIG/MAG, FSW=Sürtünme karıştırma kaynağı, EBM= Elektron ışın kaynağı, TIG.	57
Tablo 4.1. Sertlik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması.	71
Tablo 5.1. 6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu.	79
Tablo 5.2. 6061 T6 alüminyum plakanın mekanik değerleri.	79
Tablo 5.3. ER5356 dolgu teli kimyasal kompozisyonu.	80
Tablo 5.4. ER5356 dolgu teli mekanik özellikleri.	80
Tablo 5.5. MIG ve TIG kaynak parametreleri.....	80
Tablo 5.6. Kaynak tamirinde kullanılan ekipman listesi.....	81
Tablo 6.1. MIG kaynağı ile tamiratsız ve MIG ve TIG ile üç kez tamirat yapılan numunelerin çekme testi sonuçları.....	99
Tablo 6.2. MIG kaynağı ile tamiratsız ve MIG ve TIG ile üç kez tamirat yapılan numunenin eğme testi sonuçları.....	99
Tablo 6.3. Numunelerin Vickers sertlik deneyi sonuçları.....	101

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlandırma şeması.....	10
Şekil 2.2. Çekirdeklenmiş bir katı çözeltilde bileşimin farklılık göstermesi.....	14
Şekil 2.3. Difüzyon sırasında atomların hareketi.....	14
Şekil 2.4. GP Zonu Al-Mg-Si (6xxx).....	15
Şekil 2.5. (a), (c) β'' (iğne şeklinde) ve (b), (d) β' (çubuk şeklinde) çökeltilerini gösteren transmisyon elektron mikroskop görüntüsü.	16
Şekil 2.6. Parçacık ve dislokasyon arasındaki etkileşim (a) Orowan döngüsü, (b) parçacık kesme	17
Şekil 2.7. (T6) ısıtma işleminde çökeltme sertleşmesinin iki aşaması..	18
Şekil 2.8. Çökeltmeyle sertleşebilen Mg_2Si alüminyum için faz diyagramı	19
Şekil 2.9. Mukavemet ve yaşlanma süresi.	19
Şekil 3.1. MIG, argon gazı (solda) ve %75 He–%25 Ar (sağda).	24
Şekil 3.2. MIG sisteminin basit formu.....	26
Şekil 3.3. MIG 350MP ünitesinin güç kaynağı.....	26
Şekil 3.4. Sabit Akım Güç Kaynağı Volt-Amper özellikleri.....	27
Şekil 3.5. Güç Kaynağının Sabit Voltajı Volt-Amper özellikleri	27
Şekil 3.6. Güç kaynakları (sabit gerilim ve ark uzunluğu).	28
Şekil 3.7. Tel sürme aksesuarları.	29
Şekil 3.8. a) Makara tabancası, b) İtme-çekme ünitesi.....	29
Şekil 3.9. Otomatik MIG ünitesi.....	30
Şekil 3.10. Yarı otomatik MIG ünitesi	30
Şekil 3.11. Kaynak hızının kaynak görünümü üzerindeki etkinliği.....	32
Şekil 3.12. Temas ucu-iş mesafesi ve elektrot uzantısı	33
Şekil 3.13. Kaynak torç açısı ve konumu.	33
Şekil 3.14. Kaynak birleşim bölgeleri	34
Şekil 3.15. TIG kaynak işlemi.	35
Şekil 3.16. Renklerine göre DIN standardı ile tanımlanan elektrotlar.....	38
Şekil 3.17. Çeşitli malzeme kalınlıkları için tipik TIG akım aralıkları.	39
Şekil 3.18. İç köşe kaynağı için tipik TIG kaynak parametreleri.	40
Şekil 3.19. Farklı gazların ve karışımlarının kaynak dikişi ve nüfuziyete etkisi	41
Şekil 3.20. a) Alın, b) köşe ve c) kenar kaynakları	43
Şekil 3.21. Alın, dolgu ve kenar kaynağından geliştirilen bağlantı türleri a) küt b) T c) köşe d) bindirme e) kenar f) çapraz.	44
Şekil 3.22. Alın kaynağında boğaz kalınlığı: (a) tam kalem alın kaynağı, (b) kısmi alın kaynağı, (c) T-alın kaynağı.....	44
Şekil 3.23. köşe kaynağında boğaz kalınlığı: a) İç köşe kaynağı, b) köşe ve dışbükey dolgu kaynağı	44
Şekil 3.24. Köşe, dışbükey, içbükey ve eşit olmayan bacak boyu gösterimi	45
Şekil 3.25. İnce dağılmış gözeneklilik.....	46
Şekil 3.26. Kaynaklı kökte gözenek oluşumunu gösteren şematik diyagram	46

Şekil 3.27. Alaşım elementlerinin sıvı alüminyum içinde 1246 °C ve 1 atm basınçta hidrojen çözünürlüğüne etkisi	47
Şekil 3.28. Çeşitli kaynak distorsiyonu türleri	49
Şekil 3.29. Kaynak sırasında sıcaklıklardaki ve termal gerilimlerdeki değişikliklerin şematik gösterimi	50
Şekil 3.30. Kaynak malzemesinde tipik bir sıcak çatlak. AA6061'in kısmi nüfuziyetli kaynağı: a) kaynak enine kesiti, b) katılaşma çatlama, dendritik kırılma yüzeyi, c) sıvılaştırma çatlama, kırılma yüzeyi.....	51
Şekil 3.31. Kaynakta katılaşma çatlama etkileyen proses parametreleri arasındaki etkileşimi gösteren diyagram	53
Şekil 3.32. Dört farklı alaşım ilavesinin alüminyumun çatlak duyarlılığı üzerindeki etkileri.....	54
Şekil 3.33. Sertleştirilebilir bir alaşımın ısıdan etkilenen bölgelerin kaynak boyunca enine kesiti 1) Kaynak bölgesi (katılaşma yapısı), 2) Çözeltiye alma işlemi uygulanmış bölge, 3) Yumuşak tavlama bölge, 4) Yaşlandırılmış bölge, 5) Etkilenmemiş bölge.....	56
Şekil 4.1. Muayene açısı.	61
Şekil 4.2. Gözle muayenede kullanılan ekipmanlar.....	61
Şekil 4.3. Manyetik ve kaçak akı şematik gösterimi.....	63
Şekil 4.4. Farklı manyetizasyon yöntemleri a), b) ve c) dairesel manyetizasyon; d) ve e) boyuna manyetizasyon	63
Şekil 4.5. Penetrant testi işlem sırası.....	65
Şekil 4.6. Propla kaynaklı parçanın hata tespiti	66
Şekil 4.7. Osiloskop ekranı ve kontrol edilen parça	67
Şekil 4.8. X ışını ile yapılan muayene	68
Şekil 4.9. Endüstriyel bir radyografik filmin yapısı.....	69
Şekil 4.10. Çekme diyagramı.....	72
Şekil 4.11. Eğme deneyi düzeneği.....	73
Şekil 4.12. Çentik darbe deney düzeneği.....	73
Şekil 4.13. Makro örneği	74
Şekil 4.14. Mikroyapı örneği	75
Şekil 5.1. Deney programı akış şeması.....	78
Şekil 5.2. a) 45 ⁰ kaynak ağzı açılmış 4mm kalınlığında 6061 T6 serisi Al plaka, b) Kaynak öncesi altlık kullanımı ve sabitleme.....	79
Şekil 5.3. a) Fronius marka MIG ve b) Ewm marka TIG kaynak makineleri.....	81
Şekil 5.4. Hatalı bölge ve kesiti.....	82
Şekil 5.5. Servo-Robot marka Wiki-Scan lazerli kaynak ölçüm cihazı ve mercek... ..	83
Şekil 5.6. Penetrant ürün ailesi.....	83
Şekil 5.7. Radyografik muayene cihazı.....	84
Şekil 5.8. a) Struers marka welding expert 5 makroyapı inceleme cihazı, b) Olympus marka optik mikroskop.....	85
Şekil 5.9. Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı.....	86
Şekil 5.10. X-ışınları difraksiyon analizi cihazı.....	86
Şekil 5.11. Qness marka sertlik ölçüm cihazı.....	87
Şekil 5.12. Çekme numunesi temsili şekil	87
Şekil 5.13. Instron marka çekme test cihazı.....	88
Şekil 6.1. Kaynak dikişi ölçüleri gösterimi.....	89
Şekil 6.2. Penetrant uygulama.....	90
Şekil 6.3. a) Tamirat yapılmayan, b) 1. Tamir, c) 2. Tamir ve d) 3. Tamir yapılan parçaların PT sonuçlarına ait makro görüntüler.....	90

Şekil 6.4. a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG tamiri, c) 1. TIG tamiri, d) 2. MIG tamiri, e) 2. TIG tamiri, f) 3. MIG tamiri, g) 3. TIG tamiri yapılan parçaların radyografik muayene görüntüleri.....	91
Şekil 6.5. Çekme, eğme, sertlik, makroyapı ve mikroyapı inceleme numuneleri.	93
Şekil 6.6. a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG tamiri, c) 1. TIG tamiri, d) 2. MIG tamiri, e) 2. TIG tamiri, f) 3. MIG tamiri, g) 3. TIG tamiri yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri.....	94
Şekil 6.7. a) ve b) 0.0, c) ve d) 1.1, e) ve f) 1.2, g) ve h) 2.1, i) ve j) 2.2, k) ve l) 3.1, m) ve n) 3.2 numaralı numunelerin çekme ve eğme testi grafikleri.....	97
Şekil 6.8. a) Çekme ve b) eğme testi sonrası numunelere ait görüntüler.	98
Şekil 6.9. Sertlik ölçümü yapılan noktalar.....	100
Şekil 6.10. Kaynak tamiri yapılmamış ve tamir yapılmış numunelerin Vickers sertlik değerleri.....	102
Şekil 6.11. Kaynak tamiri yapılmamış MIG kaynağının ve MIG ve TIG kaynaklarıyla tamiratı yapılmış numunelerin 50X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	103
Şekil 6.12. Kaynak tamiri yapılmamış ve 3 kez tamiratı yapılmış numunelerin ITAB bölgelerinden alınan 500X büyütmedeki ve kaynak bölgelerinden alınan 500X ve 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri....	104
Şekil 6.13. 1.1 (birinci MIG kaynağı tamiratı) numaralı numunenin kaynak bölgesinin 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları.	106
Şekil 6.14. 1.2 (birinci TIG kaynağı tamiratı) numaralı numunenin kaynak bölgesinin 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları.	107
Şekil 6.15. 0.0 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması... ..	108
Şekil 6.16. 1.1 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması	109
Şekil 6.17. 1.2 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması.....	109
Şekil 6.18. 3.1 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması	110
Şekil 6.19. 3.2 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elemental haritalaması	110
Şekil 6.20. 0.0, 1.1, 2.1 ve 3.1 kodlu MIG kaynak numunelerine ait XRD analizi	111
Şekil 6.21. 1.2, 2.2 ve 3.2 kodlu TIG kaynak numunelerine ait XRD analizi	112

GAZALTI (MIG) KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN 6061 SERİSİ ALÜMİNYUM PLAKALARINA YAPILAN KAYNAK TAMİRİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ÖZET

6xxx serisi alüminyum alaşımları hafiflikleri, termal iletkenlikleri, işlenebilirlikleri, kaynağa elverişliliği ve korozyon direçlerinden dolayı otomotiv, ambalaj, yapı sektörleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kaynaklı imalat da bu alanlarda önemli ve kritik bir rol oynamaktadır.

Bilindiği üzere kaynak işlemi malzemeyi birleştirirken aynı zamanda malzemenin mekanik ve yapısal özelliklerini de değiştirmektedir. Bu değişimler malzemenin kullanım alanını ve ömrünü kısıtlamaktadır.

Kaynak işleminden sonra kaynak dikişinde yüzeysel ve hacimsel kusurlar meydana gelebilmektedir ve bu kusurlar servis şartlarını sağlamaya engel olduğundan kaynağın tamir edilmesi gerekmektedir. Isı girdisinden ötürü alüminyum kaynak tamiri malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde değiştirmektedir. Bu yüzden alüminyum kaynak tamiri tavsiye edilen bir proses olmamakla birlikte kaynak kabul kriterlerini sağlamak için kaçınılmaz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada amaç; minimum kaynak tamiriyle kaynağın sürdürülebilirliğini sağlamaktır. Bu düşüncelerden yola çıkarak tekrarlanan kaynak tamirlerinden sonra kaynağın mekanik özellikleri yüzeysel ve hacimsel kusurları değerlendirilmiştir.

Alüminyum alaşımının kaynak edilebilirliğinden yola çıkarak 4mm kalınlığında 45⁰ kaynak açzı açılmış 6061 serisi Al alaşım plakalar MIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Dolgu malzemesi olarak ER 5356 dolgu teli kullanılmıştır. Kaynaklı numuneye; gözle muayene, sıvı penetrant testi, radyografik test, çekme testi, eğme testi, makro inceleme, mikroyapı inceleme, sertlik testi, EDS ve XRD analizleri uygulanmıştır. Daha sonra aynı parçalardan tekrar kaynatılarak, kaynaklı bölgeler taşlanmış, temizlenmiş ve MIG kaynağıyla tamirat kaynağı yapılmıştır. Aynı tamirat işlemi TIG kaynağıyla da yapılmıştır. Tamirat işlemi üç kez tekrarlanmış ve her tamirattan sonra kaynaklı bölgeler aynı testlere tabi tutulmuştur.

Gözle muayene ve sıvı penetrant test sonuçlarına göre TIG kaynağı daha düzgün bir kaynak yüzeyi sergilemiştir. Kaynak kep ve kök yükseklikleri kabul seviyesindedir. Artan tamirat sayısı ile birlikte ısı girdisi de arttığından malzemede burulmalar meydana gelmiştir. Makroyapı sonuçlarına baktığımızda ise tamirat işleminin gözenek oluşumuna gözle görülür bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Sertlik testi sonuçlarına baktığımızda, en yüksek sertlik değerleri sırasıyla, ana metal, kaynak bölgesi ve ITAB şeklindedir. Çekme deneyi sonuçlarına baktığımızda MIG kaynağı TIG kaynağına göre daha yüksek mukavemetli sonuçlar sergilemiştir. Eğme deneyi sonuçlarında herhangi bir hataya rastlanmamıştır. EDS sonuçlarına göre tamirat sayısı arttıkça Mg₂Si oranının azaldığı görülmüştür. XRD sonuçlarında da alüminyum pikleri ile birlikte, Mg₂Si'nin ise düşük şiddette bir pik verdiği gözlemlenmiştir. XRD analizinde yapıda herhangi oksitli bir bileşiğe rastlanmamıştır.

Alınan sonuçlardan yola çıkarak alaşımın kaynak tamiri işlemi nedeniyle sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir. Kaçınıcı tamirattan sonra malzemenin servis şartlarında kullanılıp kullanılmayacağı tartışılmıştır.

EFFECT OF WELD REPAIR ON THE MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF 6061 SERIES ALUMINUM PLATES JOINED BY GAS (MIG) WELDING METHOD

SUMMARY

Welding is the joining of many similar and different metals, such as metals, alloys or plastics, using heat welding and with or without pressure. During the joining process, the parts to be joined are melted by a heat source and solidified to form a permanent joint with strength equal to or greater than the base metal. Depending on the thickness of the sheet to be welded, it can be welded with or without the addition of filler material, providing a strong connection between the welded joints. The weldability of any material to be joined depends on the metallurgical factors that occur during the welding process and cause a change in the underlying material property. Aluminum alloys are widely used and preferred materials in the aerospace, spacecraft, structural and military industries. Aluminum alloys have certain properties such as high elastic modulus, high specific strength, good fracture toughness and excellent corrosion resistance.

6061 Aluminum alloys are alloys that can be heat treated, whose strength can be increased by precipitation hardening, and phase transformation occurs during heat input in welding. It is a precipitation hardened Al alloy containing major alloying elements such as magnesium and silicon. It is one of the most common alloys used for good mechanical and weldability properties and also for general applications. At the beginning of the reasons why aluminum is an economical and widely used material and its usage area is wide; in addition to its suitable mechanical properties, it has features such as low weight, easy processing, easy formability, recyclability, high thermal conductivity and electrical conductivity and non-magnetic.

6xxx series aluminum alloys are used in many areas, especially in the automotive, packaging and construction sectors, due to their lightness, thermal conductivity, machinability, weldability and corrosion resistance. Welded manufacturing also plays an important and critical role in these areas. Magnesium and silicon are the main alloying elements in 6061 T6 aluminum alloys. They are alloys that are the mostly used in the manufacture of materials produced by extrusion and have a high shaping ability. Industrial demand for 6xxx series alloys is high. Two-thirds of extruded products are aluminum materials, and most of them consist of 6xxx series aluminum alloys. These series are the most commonly used alloys. These materials can be heat treated to provide aging at various stages. T6 heat treatment is applied, which is taken into solution and artificial aging is used as a heat treatment.

As it is known, while the welding process joins the material, it also changes the mechanical and structural properties of the material. These changes limit the usage area and life of the material.

After the welding process, superficial and volumetric defects may occur in the weld seam and since these defects prevent the service conditions, the weld must be repaired.

Due to heat input, aluminum welding repair negatively changes the physical and mechanical properties of the material. Therefore, although aluminum welding repair is not a recommended process, it is an inevitable situation to meet the welding acceptance criteria. The purpose here is; to ensure the sustainability of the welding with minimum welding repair. Based on these considerations, after repeated weld repairs, the mechanical properties of the weld, its superficial and volumetric defects were evaluated.

Based on the weldability of the aluminum alloy, 6061 series Al alloy plates with 4mm thickness, 45° weld bevel, were joined by MIG welding method. ER 5356 filler wire was used as filling material. Welded sample; visual inspection, liquid penetrant test, tensile test, bending test, macro examination, microstructure examination and hardness test were applied. Then, the same parts were welded again, the welded areas were grinded, cleaned and repair welding was performed with MIG welding. The same repair was done with TIG welding. The repair process was repeated three times, and after each repair, the welded areas were subjected to the same tests.

According to the results of visual inspection, no problem was found in the weld. Weld cap and root heights are at acceptance level. TIG welding is one step ahead in places where visibility rather than strength is desired according to the usage area of the welding process. When we look at the penetrant inspection results, it is seen that as the number of repairs in MIG welding increases, the porosity on the weld surface also increases. When we look at the results of the radiographic examination, no discontinuities were found in the weld seams. In the results of the macrostructure examination, it was observed that the porosity was mostly in the root region. The reason for this is that the pre-welding cleaning process is insufficient. The pore distribution and sizes were evaluated within the acceptance criteria. It is thought that the microcracks in the weld root as a result of the third repairs are due to the effect of increased heat input and thermal expansion. The dark black particles seen in the base metal in the microstructure images represent Mg_2Si particles. Since the filler metal is ER5356, there are Mg_2Si particles in the weld structure. As the heat input increased, the grain size also increased. As the repair number increases, the grains in the HAZ region become coarser. In accordance with the applied repair processes and mechanical strength tests, the tensile strengths decreased as the repair process was applied to the material, and it was observed that the yield and tensile strength values decreased with the welding repair. In addition, when the data in the tables are examined, it is seen that the tensile strength of MIG welding is higher than the tensile strength of TIG welding in the 1st, 2nd, and 3rd repairs. The lowest tensile strength was measured in MIG welding as 180 MPa (sample 3.1) and 175 MPa (sample 3.2) in TIG welding. As a result of TIG welding repair, the tensile strength value is out of the acceptance for the artificial aged material. In the tensile test, all fractures occurred in the HAZ region. It is thought that the dissolution of strength enhancing (Mg_2Si) precipitates in the heat affected zones in the welding of 6061 T6 aluminum alloy leads to a decrease in mechanical properties. This situation is similar to the studies in the literature. When we look at the results of the bending test, no fracture or crack was found in the material. The heat inputs are calculated as 214 J/mm in MIG welding and around 285 J/mm in TIG welding. Another conclusion based on the results obtained is that TIG welding causes more physical damage to the material. Due to the higher heat input, more distortion was observed in the material after repairs made with TIG welding. When we look at the hardness test results, it is seen that the highest hardness value is in the base material, then in the weld zone and the lowest value is in the HAZ

zone. In XRD results, it was observed that Mg_2Si gave low intensity peaks together with aluminum peaks. No oxide compounds were found in the structure. According to the results of the EDS analysis and mapping taken from the HAZ regions, a decrease in the amount of Mg was observed in parallel with the increasing number of repairs and heat input. It is thought that the tensile strength and hardness values also decrease in relation to this situation.

Based on the results obtained, the sustainability of the alloy due to the welding repair process was evaluated. It has been discussed whether the material can be used in service conditions after the number of repairs.

1. GİRİŞ

Kaynak; metaller, alaşımlar veya plastikler gibi benzer ve farklı birçok metalin ısı kaynağı kullanılarak ve basınçla veya basınçsız olarak birleştirilmesi için kalıcı bir birleştirme olayıdır. Birleştirme işlemi sırasında birleştirilecek olan parçalar bir ısı kaynağı ile eritilir ve ana metale eşit veya daha büyük mukavemete sahip kalıcı bir bağlantı oluşturmak üzere katılaştırılır. Kaynak yapılacak sac kalınlığına bağlı olarak dolgu malzemesi eklenerek veya eklenmeden kaynak yapılabilir ve kaynaklı bağlantılar arasında güçlü bir bağlantı sağlanır. Birleştirilecek herhangi bir malzemenin kaynak kabiliyeti, esas malzeme özelliğinde değişikliğe neden olan ve kaynak işlemi sırasında meydana gelen metalurjik faktörlere bağlıdır. Alüminyum alaşımları; havacılık, uzay araçları, yapısal ve askeri endüstrilerde yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen malzemelerdir. Alüminyum alaşımları, yüksek elastik modül, yüksek özgül mukavemet, iyi kırılma tokluğu ve mükemmel korozyon direnci gibi belirli özelliklere sahiptir. 6061 Alüminyum alaşımları, çökeltme sertleşmesi ile mukavemeti artırılabilen ısı işlem görebilen ve ayrıca kaynakta ısı girdisi sırasında faz dönüşümü meydana gelen alaşımlardır. Magnezyum ve silisyum gibi ana alaşım elementlerini içeren çökeltme ile sertleştirilmiş bir Al alaşımıdır. 1935 yılında geliştirilmiş ve Alloy 61S olarak adlandırılmıştır. İyi mekanik ve kaynak kabiliyeti özellikleri ve ayrıca genel uygulamalar için kullanılan en yaygın alaşımlardandır [1].

Alüminyumun ekonomik ve yaygın kullanım alanına sahip bir malzeme olmasına ve kullanım alanının geniş olmasının sebeplerinin başında; uygun mekanik özelliklerinin yanı sıra ağırlığının düşük olması, kolay işlenebilir olması, kolay şekillendirilebilir olması, geri dönüştürülebilir olması, yüksek ısı iletkenliği ve elektrik iletkenliği ve magnetik olmaması gibi özellikler gelmektedir [2].

Alüminyum kaynağına tamir yapmak, termal gerilmeler ve ısı girdisinden ötürü istenilen bir durum değildir. Tekrar eden ısı girdileri malzemenin dayanımını azaltmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğunca tamirat işleminden kaçınmak gerekmektedir. Bazı durumlarda ise kaynak parametrelerinin yanlış seçimi, ortam koşulları ve kullanılan malzemelerden ötürü çeşitli kaynak hatalarıyla

karşılaşılmaktadır ve tamirat işlemi kaçınılmaz bir hal almaktadır. Tamirat işlemi yaparken de malzemenin servis şartlarında ve güvenli bir şekilde kullanılması için maksimum hassasiyet gösterilmelidir. Bu çalışmanın amacı, yapılan kaynak tamirleri sonucunda malzemenin kabul kriterlerinin dışına çıkıp çıkmadığını ve alaşımın sürdürülebilirliğini incelemektir.

Bu çalışmada 6061 serisi alüminyum plakaların kaynaklı birleştirmeleri için dolgu malzemesi ve kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaynaklı birleşimlere tahribatlı ve tahribatsız muayene testleri yapılmış ve elde edilen muayene sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Farklı kaynak yöntemleriyle birden fazla kaynak tamiri yapılmış ve her bir tamirat sonrası sonuçlar değerlendirilerek karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada alüminyum plakaları kaynaklı birleştirmelerinde kullanılan kaynak yöntemleri hakkında ve bu birleştirmelerde kullanılan kaynak parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Füzyon kaynağı günümüzde endüstride en yaygın kullanılan kaynak tekniğidir ve öğrenmesi en kolay yöntemdir. İş sahasında çalışanlara büyük bir hareket kabiliyeti sunmaktadır. Alüminyumun keşfedildiği zamandan beri, ilk bilim adamları alüminyumun nasıl bir etkiye sahip olduğunu fark etmişlerdir. Bazı alaşımların yaşlandırılarak sertleşebilme özelliği, havacılık gibi endüstriler için önemli bir bulgu olmuştur. Çünkü bu alaşımların mukavemeti bazen çeliğinkine eşdeğer olabilmekte ve ağırlıkları çeliğinkinden çok daha az olabilmektedir. Alüminyumdaki büyük ilerleme İkinci Dünya Savaşı sırasında hemen hemen her uçağın bu malzeme kullanılarak üretilmesiyle gerçekleşmiştir. Artan kaynak ihtiyacıyla MIG (metal inert gaz) ve TIG (tungsten inert gaz) teknikleri daha yaygın uygulamalar haline gelmiştir. Çoğu alaşım için alüminyumun erime noktası 660 °C civarındadır. Bununla birlikte, kaynak işlemi sırasında, kabul edilebilir bir kaynak için oksit filminin (Al_2O_3) kaldırılması gerekmektedir. Bu film 2060 °C'ye kadar erimemektedir. İki erime noktası arasındaki 1400 °C'lik fark, parçaları birleştirenler için zorluklara neden olur ve bazen çatlama veya burulmalar meydana gelebilir. Alüminyumun kaynak işlemiyle birleştirilmesi nedeniyle ortaya çıkan diğer zorluklar, alüminyumun yüksek termal genişleme katsayısı, katılaşma büzülmesi ve erimiş haldeyken hidrojenin yüksek çözünürlüğüdür. Tüm bu faktörler, kaynak ve çevresindeki alan boyunca değişken

derecelerde mukavemet azalmasına neden olabilir. Isıl işlem uygulanabilen alaşımların yumuşaması da faz dönüşümü sırasında büyük bir sorun haline gelebilir. Havacılık ve otomobil gibi endüstrilerde kullanılan alüminyum alaşımlarının çoğu ısıl işlem uygulanabilir alaşımlardır.

Kumar ve arkadaşları (aktaran Steves, 2010) 2006'da alüminyum alaşımı 6061-T6 için kaynak parametrelerinin kaynağın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Isı girdisinin derecesi ve ITAB'ın bozulmasının, akım miktarına, boşluk mesafesine, kaynak hızına ve koruyucu gazın akış hızına bağlı olduğunu görmüşlerdir. 6061-T6'yı birleştirmek işlemi için dolgu malzemesi seçiminin sıcak çatlama olasılığını azaltabildiğini gözlemlemişlerdir. Kumar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma için 3,15 mm çapında tip 4043 dolgu malzemesi kullanılmıştır. Numunenin en iyi nihai gerilme mukavemetini vermek için ve gerekli parametreleri belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Yaptıkları deneyde parametreler; 1,6 mm birleştirme aralığı, 220 A kaynak akımı, 150 mm/dk kaynak hızı ve 16 L/dk koruyucu gaz debisi şeklindedir. Bu parametreler, kaynaklanmış durumda numune için 158.08 MPa'lık bir nihai gerilme mukavemeti ile sonuçlanmıştır ve bu değer ana malzemenin yaklaşık %50'si kadardır.

Kaynak endüstrisindeki en yeni gelişmelerden biri de sürtünme karıştırma kaynağı tekniğidir. Bu yöntem, tüm füzyon işlemlerinde olduğu gibi malzemeyi bir elektrik arkıyla eritmez, daha çok sürtünme kullanılarak eritme yapılır. Alüminyum alaşımlarını kaynatmada yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Sürtünme karıştırma kaynağının füzyon kaynağına göre avantajlarından biri, kaynak bölgesine giren ısı girdisi miktarıdır. Kaynak işlemi sırasında sürtünmeden üretilen ısı, ergitme kaynağından daha düşüktür ve bu da kaynak hattı boyunca ve ITAB boyunca daha iyi mekanik özellikler sağlamaktadır.

Kaynak işlemi sırasında sıcaklıktaki dalgalanma, ergitme hattına yakın malzemenin mekanik özelliklerinde azalmaya neden olmaktadır. En duyarlı alan, ısıdan etkilenen bölgedir. Isıdan etkilenen bölge, kaynak işleminden sonra kaynak bölgesi ile ana malzeme arasındaki alandır.

V. Malin (aktaran Steves, 2010) 1995'te yaptığı bir çalışmada, 4043 dolgu malzemesi ile gaz metal ark kaynağı kullanılarak kaynak yapılmış bir 6061-T6 parçası üzerinde sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. Mikrosertlik testleri, 100 gram yük ile bir Knoop

mikrosertlik test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri kaynağa paralel olarak ve kaynak merkez hattından 0.125 inç'lik artışlarla alınmıştır. Çalışma, ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik değerlerinin ana malzemenin yaklaşık %70'i olduğunu göstermiştir. Ana malzemenin kaynak öncesi akma dayanımı 44.35 ksi, kaynak sonrası ortalama değeri 30 ksi olarak ölçülmüştür. Çalışmada test edilen 12 numuneden 7'si, füzyon hattıyla ITAB arasındaki 0,01–0,4 inç arasında değişen bölgelerden kopmuştur.

Ambriz ve arkadaşları (aktaran Steves, 2010) 2009'da yürütülen bir çalışmada, gaz metal ark kaynağının 6061-T6 üzerindeki etkisini incelemiştir. Kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık, malzemenin tavlanması sağlayacak kadar yüksek olmadığından, ITAB'da tam tavlama olmamaktadır. Tipik olarak, ısı girdisi ne kadar yüksek olursa, ITAB'ın mekanik özellikleri o kadar düşük olmaktadır. Ambriz ve arkadaşları kaynak sırasında kaynak çatlamasının nedeninin, alüminyum alaşımının çok yüksek termal genişleme oranının yanı sıra geniş katılma sıcaklık aralığı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Hirose ve arkadaşları (aktaran Steves, 2010) 1999'da 6061-T6 için lazer kaynağının ısıdan etkilenen bölge üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kaynak işlemi sırasında daha fazla ısı girdisi, ısıdan etkilenen bölgede daha düşük sertlik değerine neden olduğundan ısı girdisinin en düşük olduğu bir kaynak işlemi istenmektedir. Kaynak sırasında yüksek ısı girdisinin dalgalanması ITAB'da çökeltilerinin çözünmesine neden olmaktadır. Hirose ve arkadaşları 1 mm kalınlığında bir 6061-T6 parçası üzerinde TIG kaynağı ve lazer kaynağını denemiştir. Lazer kaynağı için ısıdan etkilenen bölgenin TIG kaynağınıninkinin yaklaşık 1/7 ila 1/4'ü kadar azaldığını gözlemlemiştir. Sadece ısıdan etkilenen bölge küçülmekle kalmamış, aynı zamanda suni yaşlandırma ile sertlik neredeyse tamamen geri kazanılmıştır.

Kaynak işlemi sırasında, sürekli ısıtma ve soğutma malzemenin akma gerilmesine etki ederek kaynak hattı boyunca ve ITAB'da artık gerilimler oluşturmaktadır. Yüzeydeki veya kaynağa en yakın malzeme en son soğuduğundan, bu durum kaynak plakasının bir artık çekme gerilmesi oluşturmaya neden olmaktadır.

Withers (aktaran Steves, 2010) 2007'de bir malzemenin yüzeyindeki ısı girdisinin, o metalde oluşan artık gerilimler üzerindeki etkisini incelemiştir. Isı girdisi azaldığında

yüzeydeki alanın çok daha hızlı büzüldüğü ve malzemenin oda sıcaklığına dönmesine izin verdiği sonucuna varmıştır. Yüzey büzülme istediğinden ve malzemenin içi hala daha yüksek sıcaklıklar altında olduğundan, bu durum yüzeyin artık çekme gerilmeleri oluşturmasına neden olacaktır. Aynı teori kaynak için de geçerlidir. Kaynak hattı en son soğuyan bölge olduğundan, bu durum yüzeyde kaynak hattında artık gerilmelere neden olmaktadır [3].

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum ve alaşımları tarafından sağlanan üstün özellikler, alüminyumu, yumuşak ve son derece sünek folyolarından en zorlu mühendislik uygulamalarına kadar geniş bir kullanım alanı için çok yönlü, ekonomik ve çekici metalik malzemelerden biri haline getirmektedir.

Alüminyumun yoğunluğu sadece $2,7 \text{ g/cm}^3$, yani yaklaşık olarak çeliğin ($7,83 \text{ g/cm}^3$) üçte biri kadardır. Bu hafif ağırlık, bazı yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları ile birleştiğinde, hareket eden özellikle hafif yapıların tasarımına ve yapımına izin vermektedir. Uzay araçları ve uçaklar gibi her türlü karada ve suda taşınan araçlar bu tasarımlara örnek olarak verilebilir.

Alüminyum, çeliğin paslanmasına neden olan aşamalı oksitlenme türüne direnmektedir. Açıkta kalan alüminyum yüzeyi oksijenle birleşerek, daha fazla oksidasyonu engelleyen, 1 inç değerinin on milyonda biri kalınlığında inert bir alüminyum oksit filmi oluşturur. Demir pasının aksine, alüminyum oksit film, yeni bir yüzeyi daha fazla oksidasyona maruz bırakmak için pul pul dökülmez. Alüminyumun koruyucu tabakası çizilirse, anında kendini yeniden kapatır. İnce oksit tabakasının kendisi metale sıkıca yapışır ve renksiz ve şeffaftır. Çıplak gözle görünmez. Alüminyumda demir ve çelik pasının solması oluşmaz.

Alüminyum yüzeyler oldukça yansıtıcıdır. Radyan enerji, görünür ışık, radyan ısı ve elektromanyetik dalgalar güçlü bir şekilde yansıtılmaktadırlar. Eloksallı veya koyu eloksallı yüzeyler yansıtıcı veya emici olabilmektedirler. Geniş bir dalga boyu aralığında parlatılmış alüminyumun yansımaları, çeşitli dekoratif ve işlevsel kullanımlar için uygun hale gelmektedir.

Alüminyum tipik olarak mükemmel elektriksel ve termal iletkenlik göstermesinin yanında yüksek elektrik direncine sahip özel alaşımları da geliştirilmiştir. Yüksek torklu elektrik motorlarında da bu alaşımlar kullanılmaktadır. Alüminyum, eşit ağırlıklarda bakırın hemen hemen iki katı kadar elektrik iletkenliği sebebiyle tercih edilmektedir. Yüksek iletkenlik ve mekanik dayanım gereksinimleri, uzun hatlı,

yüksek voltajlı, alüminyum çelik çekirdekli takviyeli kablolar kullanılarak karşılanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliği, bakırın yaklaşık %50 ila %60'ı kadardır. Bu durum ısı eşanjörlerinde, buharlaştırıcılarda, elektrikle ısıtılan aletlerde ve kaplarda ve otomotiv silindir kapaklarında ve radyatörlerde avantajlı bir hale dönüşmektedir.

Alüminyum, elektrik ve elektronik endüstrilerinde önemli bir özellik olan ferromanyetik değildir. Yanıcı veya patlayıcı malzemelerin taşınması veya maruz kalmasını içeren uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Alüminyum ayrıca toksik değildir ve yiyecek ve içecek kaplarında rutin olarak kullanılır. Yumuşak ve parlak veya parlak olabilen doğal kaplamalarda çekici bir görünüme sahiptir.

Alüminyumun herhangi bir biçimde üretilebilme kolaylığı, önemli özelliklerinden biridir. Genellikle daha düşük işlenebilirlik derecesine sahip daha ucuz malzemelerle başarılı bir şekilde kıyas edilebilir. Alüminyum, dökümcülerin bildiği herhangi bir yöntemle dökülebilir. Kağıttan daha ince folyoya kadar istenilen kalınlıkta haddelenebilir. Alüminyum levha; çekilebilir, bükülebilir veya rulo şeklinde oluşturulabilmekte ve ayrıca dövülebilmektedir. Haddelenmiş çubuktan çekilen alüminyum tel, istenilen boyut ve tipte kabloya bükülebilir. Alüminyumun ekstrüde edilebileceği farklı profillerin neredeyse sınırı yoktur [4]. Tablo 2.1'de alüminyumun fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri [5].

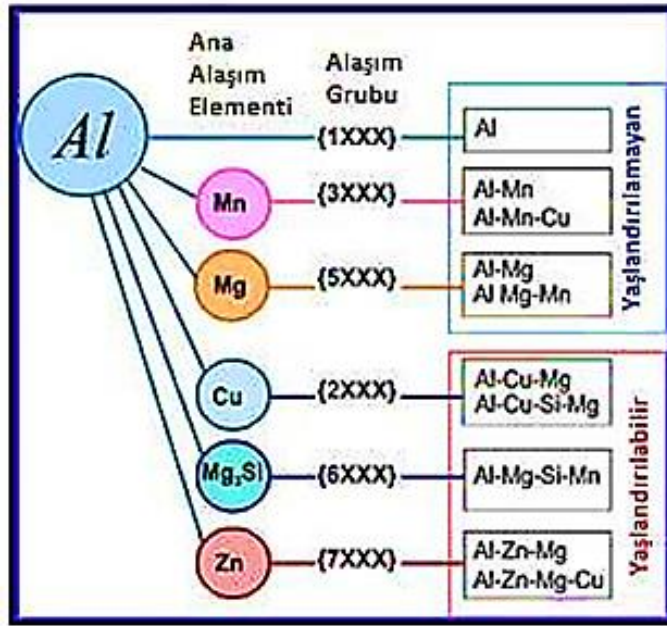
Sembol	Al
Atom No	13
Atom Ağırlığı	26,98
Element Serisi	Metal
Maddenin Görünümü	Gümüş metalik
Dökme Al Özgül Ağırlığı	269 g/cm ³
Çekme Al Özgül Ağırlığı	2,7 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	658 °C
Kaynama Sıcaklığı	1800 °C
Özgül Isısı	0,211 cal/g
Erime Isısı	93 cal/g
Çekme Direnci	4-8 kg/mm ²
Akma Direnci	1-3 kg/mm ²
Sertlik (HB 2,5)	12-20 kg/mm ²
Elastiklik Modülü	7,2x10 ²² kg/cm ²
Yeniden Kristelleşme	250-300 °C
Isı Kapasitesi (25°C)	5,82 cal/mol °C

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Dövme ve döküm alaşımları olarak alüminyum iki gruba ayrılmaktadır. Dövme alaşımları genellikle kütük halinde dökülürler ve sonrasında plastik deformasyona maruz bırakılarak istenilen formu alırlar. Döküm alaşımları, ergitme işleminden sonra üretimi yapılacak parça şeklindeki kalıba dökülür ve katılaştırma işlemi gerçekleşir [6]. Tablo 2.2’de alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması verilmiştir. Alüminyum alaşımlandırma şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [5].

Dövme Alüminyum Alaşımları		
Alüminyum Birliği No	Başlıca Alaşım Elementi	Isıl İşlem
1XXX	Saf Alüminyum (Al)	Uygulanamaz
2XXX	Bakır (Cu)	Isıl işlem yapılabilir
3XXX	Manganez (Mn)	Uygulanamaz
4XXX	Silisyum (Si)	Uygulanamaz
5XXX	Magnezyum (Mg)	Uygulanamaz
6XXX	Magnezyum ve Silisyum	Isıl işlem yapılabilir
7XXX	Çinko (Zn)	Isıl işlem yapılabilir
8XXX	Lityum (Li)	Isıl işlem yapılabilir
Döküm Alüminyum Alaşımları		
Alüminyum Birliği No	Başlıca Alaşım Elementi	Isıl İşlem
1XX.X	Saf Alüminyum (Al)	Uygulanmaz
2XX.X	Bakır (Cu)	Isıl işlem yapılabilir
3XX.X	Si+Cu ve/veya Mg	Isıl işlem yapılabilir
4XX.X	Silisyum (Si)	Isıl işlem yapılabilir
5XX.X	Magnezyum (Mg)	Uygulanmaz
6XX.X	Kullanılmayan Seri	-
7XX.X	Çinko (Zn)	Isıl işlem yapılabilir
8XX.X	Kalay (Sn)	Uygulanmaz



Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlandırma şeması [9].

2.2.1. 6XXX serisi alüminyum alaşımları

6xxx serisi alaşımlardaki sertleştirici bileşen magnezyum silisit (Mg_2Si)'dir. Bu alaşımlar, tipik olarak her biri %1'den az olmak üzere küçük miktarlarda silisyum ve magnezyum içerir ve ayrıca eşit derecede az miktarda manganez, bakır, çinko ve krom ile alaşımlanabilir. Alaşımlar, özellikle kaynak metali, kaynağın kök geçişinde olduğu gibi ana metal açısından zengin olduğunda, kaynak metali çatlamasına karşı hassastır. Çatlama, 4043 gibi daha yüksek oranlarda silisyum içeren dolgu metalleri veya biraz daha yüksek sıcak çatlama riski ile 5356 gibi daha yüksek magnezyum alaşımlı dolgu telleri kullanılarak kolayca önlenir [7].

6xxx serilerindeki alaşımlar silisyum ve magnezyumu, yaklaşık olarak magnezyum silisit (Mg_2Si) oluşumu için gereken oranlarda içerirler ve böylece ısıl işlem yapılabilir hale getirilirler. Birçoğu 2xxx ve 7xxx alaşımı kadar güçlü olmasa da, 6xxx serisi alaşımları iyi şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik, kaynaklanabilirliğin yanı sıra korozyon direncine de sahiptirler [4].

Alüminyum-silisyum-magnezyum alaşımı, ısıl işlem görebilen alaşımlardan biridir. Isıl işlem sonrası mukavemeti, ısıl işlem öncesi özelliklerine kıyasla üç kat artırılabilir. Alüminyum 6xxx'in mukavemetini etkileyen iki ana faktör alaşım elementleri ve ısıl işlem aşamalarıdır. 6xxx serisi alaşımların mukavemet artışından sorumlu ana elementler magnezyum ve silisyumdur. 6xxx alaşımları, ısıl işlem sırasında, esas olarak çökelme sertleştirme fazı olan Mg_2Si 'den güç kazanır. 6061-T6

alaşımı ayrıca, alaşıma olumlu özellik sağlayan manganez, krom, bakır ve demir gibi diğer bazı elementleri de içerir [8]. Tablo 2.3'te AA6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi, Tablo 2.4'te alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün halleri ve uygulama alanları verilmiştir.

Tablo 2.3. AA6061 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi [5].

Fe	Si	Cr	Mn	Mg	Zn	Cu	Ti	Diğer	Al
0,5	0,6-1,0	0,1	0,2-0,8	0,8-1,2	0,25	0,6-1,1	0,1	0,15	Kalan

Tablo 2.4. Alüminyum ve alaşımlarının ürün halleri ve uygulama alanları [7].

Alüminyum Alaşımı	Ürün Hali	Kullanım Alanı
Saf Alüminyum	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon	Ambalaj ve folyo, çatı kaplama, kaplama, düşük mukavemetli korozyona dayanıklı kaplar ve tanklar.
2xxx Serisi (Al-Cu)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme	Yüksek gerilimli parçalar, havacılık ve uzay ürünleri, ağır iş dövme parçaları, ağır yük taşıt tekerlekleri, silindir kafaları, pistonlar.
3xxx Serisi (Al-Mn)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme	Paketleme, çatı kaplama ve kaplama, kimyasal variller ve tanklar, proses ve gıda işleme ekipmanları
4xxx Serisi (Al-Si)	Tel, döküm	Dolgu metalleri, silindir kafaları, motor blokları, valf gövdeleri, mimari amaçlar.
5xxx Serisi (Al-Mg)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme, tüp ve boru	Kaplama, gemi gövdeleri ve üst güvertesi, yapısal boru ve boru elemanları, gemiler ve tanklar, taşıtlar, vagonlar, mimari amaçlar.
6xxx Serisi (Al-Si-Mg)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme, tüp ve boru	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, taşıtlar, vagonlar, denizcilikte boru ve boru uygulamaları, mimari uygulamalar.
7xxx Serisi (Al-Mg-Zn)	Haddelenmiş levha ve plaka, ekstrüzyon, dövme	Yüksek mukavemetli yapısal elemanlar, ağır iş uçakları için dövme parçalar, askeri köprüler, zırh plakası, ağır yük taşıtı ve vagonlar.

2.2.1.1. 6061 T6 alüminyum alaşımları

Magnezyum ve silisyum temel alaşım elementlerindedir. Çoğunlukla ekstrüzyonla üretilen malzemelerin imalatında kullanılan ve şekillendirme kabiliyeti yüksek olan alaşımlardır. 6xxx serisi alaşımlarına endüstriyel anlamda talep fazladır. Ekstrüzyonlu ürünlerin üçte ikisi alüminyum malzemelerdir ve bunların çoğu 6xxx serisi alüminyum alaşımlarından oluşmaktadır. Bu seriler en yaygın kullanılan alaşımlardır. Bu malzemeler çeşitli kademelerde yaşlandırma sağlamak için ısıtılabilirler. Isıl işlem olarak çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırma kullanılmış T6 ısıtılabilir işlemi uygulanmaktadır.

6061 T6 Alüminyum alaşımları uygulama alanları [10] :

- Otomotiv ve denizcilik
- Mobilya
- Genel yapısal ve yüksek basınç uygulamaları
- Boru hatları
- Ağır yüklü yapılar
- Demiryolları
- Tank donanımı
- Havacılık sektörü

AA6061 T6 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri Tablo 2.5'te, AA6061 T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.5. AA6061 T6 Alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri [11].

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
Kütlece %	0.68	0.44	0.24	0.14	0.94	0.18	0.06	0.04	0.03	Kalan

Tablo 2.6. AA6061 T6 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri [11].

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Vickers-HV)
T6	270	310	16	86

2.3. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ısı işlem yoluyla geliştirilebilmektedir. Isıl işlem, metal ve alaşımlarının ısıtılıp soğutulması ve metalin kimyasal bileşimi değiştirmeden alaşımların mevcut mekanik özelliklerinin geliştirilmesini sağlayan uygulamalar olarak bilinmektedir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler genellikle çökelme sertleştirilmesi ısı işlemleri ile sınırlıdır ve malzemenin sertliğini ve dayanımını artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Alüminyum alaşımları ısı işlem uygulanabilen alaşımlar ve ısı işlem uygulanamayan alaşımlar olarak ikiye ayrılabilir. Isıl işlem sonucu sertliğinde ve dayanımında artış göstermeyen alüminyum alaşımları soğuk deformasyon ile sertleştirilebilir [5]. Tablo 2.7'de T temper kodları, Tablo 2.8'de ise H temper kodları verilmiştir.

Tablo 2.7. T temper kodları [5].

Kod	İşlem Basamakları
T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, doğal yaşlandırma
T2	Sıcak şekil verme sonrası soğutma, soğuk şekillendirme, doğal yaşlandırma
T3	Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme, doğal yaşlandırma
T4	Çözeltiye alma, doğal yaşlandırma
T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, yapay yaşlandırma
T6	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma
T7	Çözeltiye alma, aşırı yaşlandırma
T8	Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme, yapay yaşlandırma
T9	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma, soğuk şekillendirme

Tablo 2.8. H temper kodları [5].

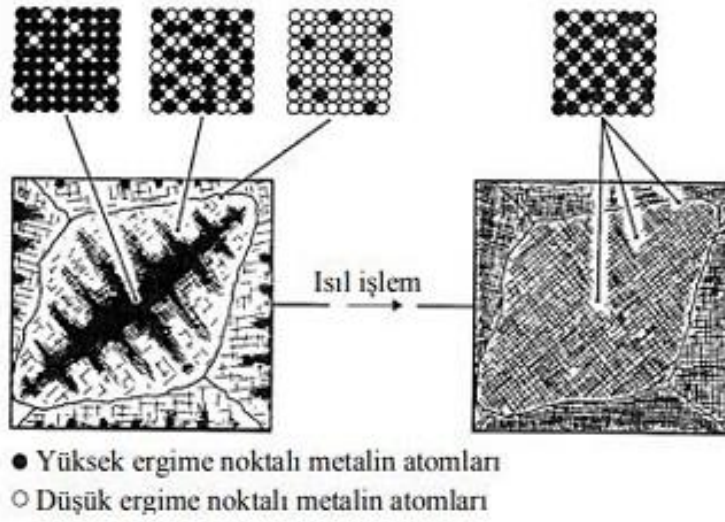
Kod	İşlem Basamakları
H1	Deformasyon sertleştirilmesi
H2	Deformasyon sertleştirilmesi, kısmi tavlama
H3	Deformasyon sertleştirilmesi, stabilize etme
H4	Deformasyon sertleştirilmesi, vernikleme ya da boyama

2.3.1. Çökeltme sertleşmesi

1906 yılında Alman bilim adamı Alfred Wilm az miktarda silisyum, magnezyum ve bakır ihtiva eden bazı alüminyum alaşımlarına su verme işlemi ile mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini incelemiştir. Su verme işlemi yapılan deney numunelerinde oda sıcaklıklarında birkaç gün beklemeyle mukavemetlerinin kendi kendine arttığını gözlemlemiştir.

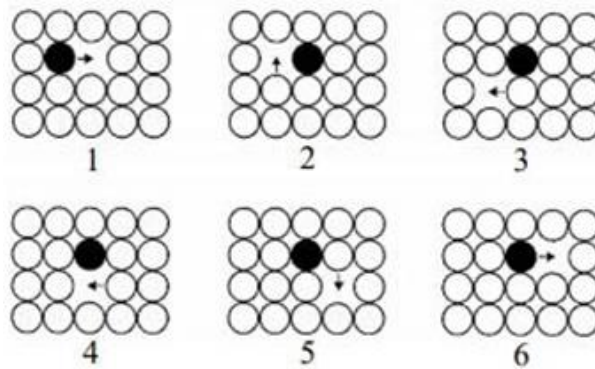
Bazen sıvı halde birbirleri içinde tamamen çözünür olan iki metal, katılaşma sırasında ve sonrasında katı çözelti oluşturarak, birbirleri içinde çözünmüş halde kalırlar. Bu genellikle, ilgili iki metalin özellikleri bakımından benzer olduğu ve yaklaşık olarak eşit büyüklükte atomlara sahip olduğu durumlarda geçerlidir. Katılaşma sırasında, oluşan kristaller her iki metalin atomlarından yapılırlar. Kaçınılmaz olarak birinin erime noktası diğerinden daha yüksek olacaktır ve bu metalin daha düşük erime noktasından daha hızlı katılaşma eğiliminde olmasına sebep olacaktır. Sonuç olarak ortaya çıkan bir dendritin çekirdeği, daha yüksek erime noktasına sahip metalden daha fazlasını içerir ve kristalin dış kenarları buna uygun olarak daha düşük erime noktasına sahip metali içerecektir. Çekirdeklenme olarak bilinen bu etki döküm durumundaki tüm katı

çözeltilerde yaygın olarak mevcuttur [12]. Şekil 2.2’de çekirdeklenmiş bir katı çözeltide bileşimin farklılıkları görülmektedir.



Şekil 2.2. Çekirdeklenmiş bir katı çözeltide bileşimin farklılık göstermesi [12].

Katı çözeltiler yeterli miktarda ısıtıldığında, atomlar hareket etmeye başlayarak kristal yapının içerisinde yer değiştirmeye başlarlar ve yapı homojen bir hal alır. Bu durum difüzyon olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 2.3’te gösterildiği gibi bir hareket gerçekleşmektedir. Siyah renkte görünen yüksek ergime noktasına sahip metal öncelikle yapıda bulunan boş atom yerine doğru harekete başlar ve şekildeki hareketlerini tekrar ederek tamamlar. Şekil 2.3’te difüzyon sırasında atomların hareketi görülmektedir.



Şekil 2.3. Difüzyon sırasında atomların hareketi [12].

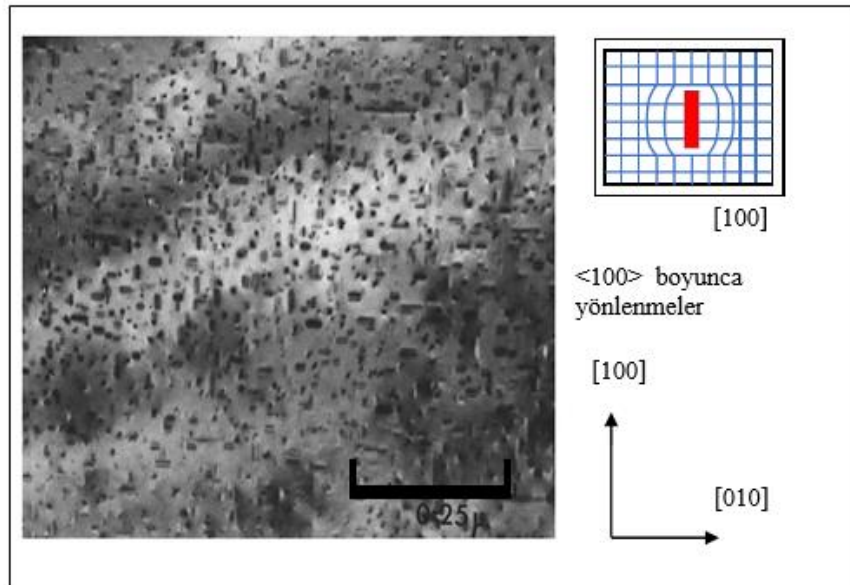
Çökeltme sertleşmesi, ısıl işlemle elde edilen, ana faz matrisinde ikinci bir fazın çok küçük dağılmış parçacıklarının düzenlenmesidir. Al6061-T6’nın kimyasal bileşimi, alaşımın ikili Al-Mg₂Si sistemini oluşturmak için belirli bir Mg:Si oranı (1.73:1) ile oluşturulduğunu ve β Mg₂Si fazı dengesinden önce yarı kararlı β'' çökeltilmesiyle

mukavemetini arttırdığını göstermektedir. Bu nedenle, yapay yaşlandırma sırasında faz dönüşüm sırasını anlamak, kapsamlı bir anlayış ve kaynak termal geçmişinin alaşımın mekanik davranışı üzerindeki etkisini tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Genel olarak, Al-Mg-Si içeren alaşımların çökelme sırası aşağıdaki aşamalara ayrılabilir: α (SSS) \rightarrow GP bölgeleri $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ [20]. Al-Si-Mg alaşımlarının yaşlanması sırasında faz dönüşümü Tablo 2.9'da verilmiştir

Tablo 2.9. Al-Si-Mg alaşımlarının yaşlanması sırasında faz dönüşümü [13].

Faz	Tutarlılık	Açıklamalar
GP zonu	Tutarlı	Küresel
β''	Tutarlı	Yuvarlak kesitli ve alüminyum matriste tamamen uyumlu iğne şekli
β'	Benzer Tutarlı	Elipsoidal kesitli ve genellikle uyumlu fakat çubukların ucu matrise uyumsuz çubuklar
β	Tutarsız	Tabaklar; alüminyum matris için tamamen tutarsız

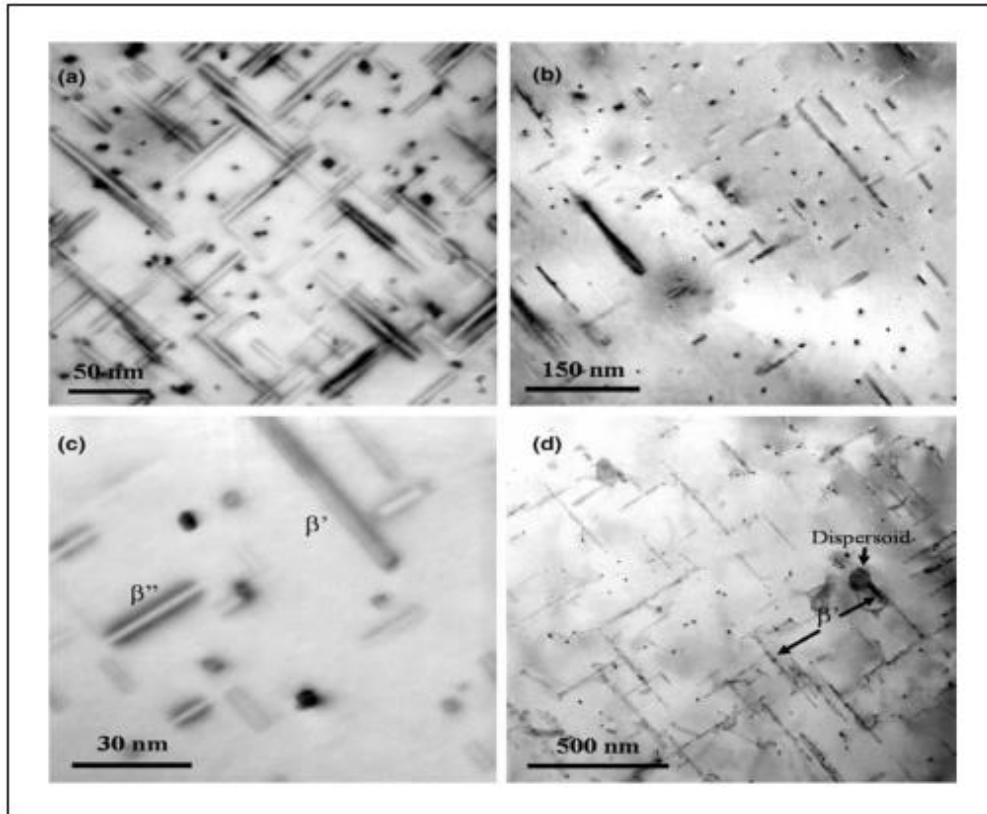
Toplam çökelme sırası Tablo 2.9'da gösterildiği gibi kristal yapılar, morfoloji ve metastabil fazlar ile özetlenmiştir. Isıl işlem sırasında, önce su verme işleminden sonra oluşan süper doymuş katı çözelti olan α (SSS) oluşur. Atomlar daha sonra Şekil 2.4'te gösterildiği gibi Guinier-Preston (GP) bölgelerini (kümeler olarak da adlandırılır) oluşturur [13]. Şekil 2.4'te Al-Mg-Si (6xxx) GP Zonu verilmiştir.



Şekil 2.4. GP Zonu Al-Mg-Si (6xxx) [14].

Yapay yaşlandırma sırasında, β'' fazı, alaşımın maksimum mukavemetine katkıda bulunan ince iğne şekilli çökeltiler olarak oluşmaya başlar. Yapay yaşlanmanın devam etmesi, büyüyen bir β'' ile sonuçlanır ve çubuk benzeri çökeltileri temsil eden β' fazını oluşturur (dairesel kesit). Bu fazdaki kristal yapı daha belirgindir ve çözücünün matrisi ile daha az kohezyonludur. β'' 'nin büyümesi, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi tipik olarak oluşturulan bir denge β fazı (Mg_2Si) ile sonuçlanır [15].

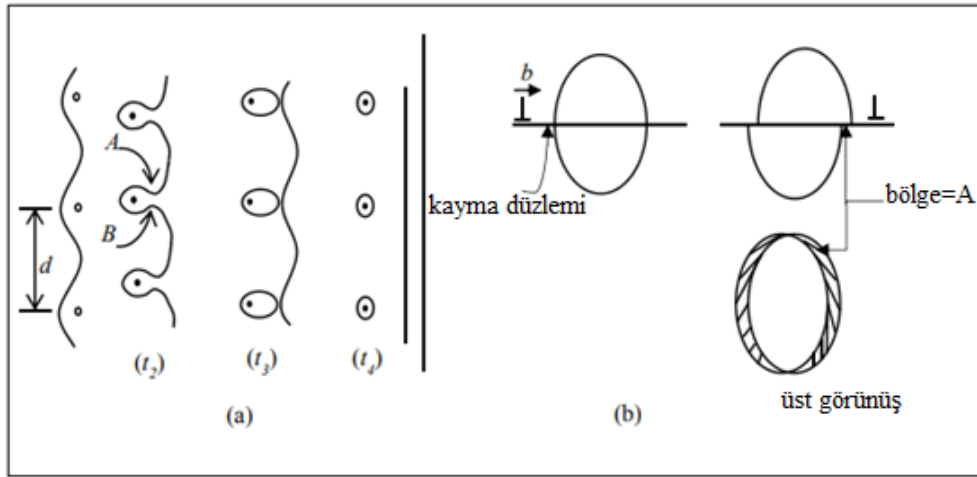
Üç fazlı dönüşümler ve çökeltme sertleşmesi ile malzemenin aşırı yaşlanması arasındaki kısa zaman aralığını ayıran ince bir çizgi vardır. Malzemeyi yapay yaşlandırma sırasında gerekenden daha uzun süre sıcaklığa maruz bırakmak, çökeltilerin çok büyümesine, dağılmasına ve malzeme matrisiyle tamamen tutarsız hale gelmesine neden olabilir [16,17]. Bu dönüşüm malzemenin mukavemetini kaybetmesine ve daha yumuşak olmasına neden olur. Şekil 2.5'te a, c) β'' (iğne şeklinde) ve b, d) β' (çubuk şeklinde) çökeltilerini gösteren transmisyon elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.5. (a), (c) β'' (iğne şeklinde) ve (b), (d) β' (çubuk şeklinde) çökeltilerini gösteren transmisyon elektron mikroskop görüntüsü [18].

2.3.2. Isıl işlem görebilen alaşımlarda sertleştirme mekanizmaları

Yaşlandırılarak ısı işlem uygulanabilen bir alaşımın özellikleri, dağılmış çökelti fazının dislokasyon etkileşimi ile belirlenir. Dislokasyonlar ve dağıtılmış parçacıklar arasındaki etkileşim kayma gerilimini yükseltecektir. Dislokasyonun çökelen partiküllere nasıl nüfuz ettiğine bağlı olarak iki grup oluşturulabilir. Dislokasyon partikül etrafında dönebilir veya çökeltiye kesebilir [24]. Şekil 2.6'da Parçacık ve dislokasyon arasındaki etkileşim (a) Orowan döngüsü, (b) parçacık kesme şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Parçacık ve dislokasyon arasındaki etkileşim (a) Orowan döngüsü, (b) parçacık kesme [19].

Parçacık döngüsü durumunda (Orowan döngüsü olarak bilinir), dislokasyon döngü şeklinde dışarı çıkar ve daha sonra Şekil 2.6'da gösterildiği gibi çökeltinin etrafında bir döngü bırakarak halkalı alandan ayrılır. Döngü, dislokasyon parçacığı geçtiğinde her parçacığın etrafında şekillenir. Bu tür bir mekanizma, parçacıklar küçük çaplara sahip olduğunda ve aralarındaki boşluk küçük olduğunda faydalı olur. Buna karşılık, parçacıklar küçük ve tutarlıysa, dislokasyonlar parçacığın içinden kaydığına ve Şekil 2.6 b'de gösterildiği gibi parçacık-dislokasyonu meydana gelir. Yapay yaşlandırma prosedürü sırasında, önce çöken küçük parçacıklar sayesinde parçacık kayma mekanizması çalışır. Isıl işlem devam ettikçe, çökelti boyutu büyür ve parçacıkların etrafındaki döngü daha kolay hale gelir [20].

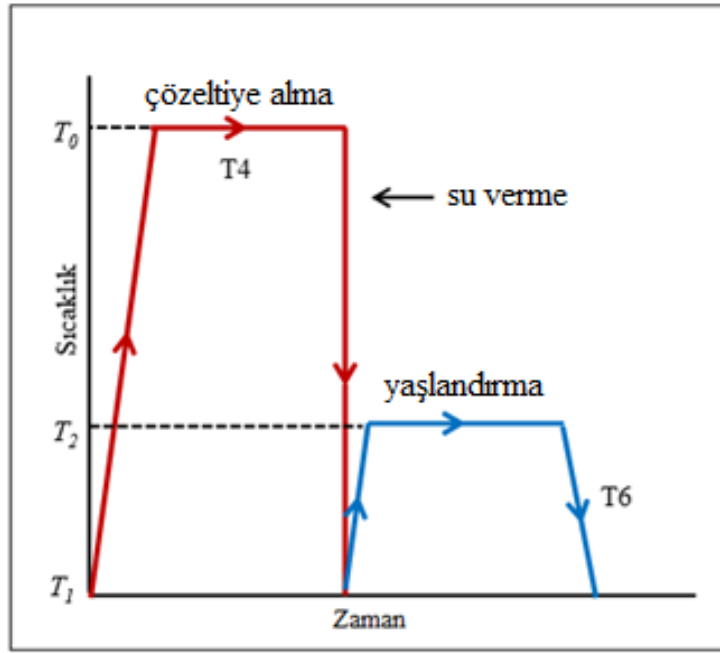
2.3.3. 6061-T6 Alüminyum alaşımının çökeltme sertleşmesi

Yaşlanma sertleşmesi terimi, malzemenin mukavemeti zamanla arttığında kullanılır. Al 6061-T6'nın çökeltme sertleşmesi iki aşamada gerçekleştirilir. Şekil 2.7 ve Şekil

2.8’de gösterildiği gibi ilk aşama çözeltiliye alma ısıl işlemi ve ikinci aşama yaşlandırma ısıl işlemidir.

2.3.3.1. Çözeltiliye alma ısıl işlemi

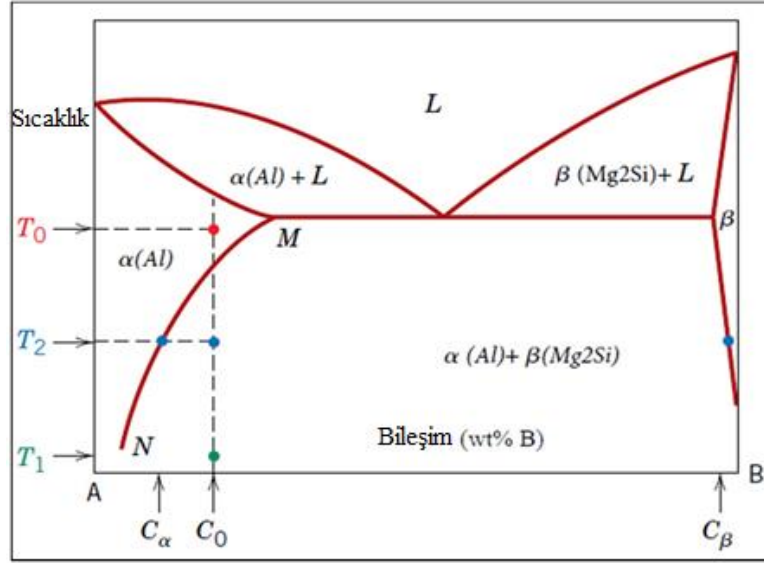
Çökeltme sertleştirme prosedürünün ilk adımı çözeltiliye alma ısıl işlemidir. Alüminyum silisyum magnezyum çözeltilisi, α fazı içinde belirli bir sıcaklığa, T_0 ’a ısıtılır ve tüm β fazı (Mg_2Si) tamamen çözünene kadar tutulur. Süperdoymuş katı çözeltili daha sonra magnezyum, silisyum ve alüminyum matriste oluşturulmuş diğer bazı elementlerin aşırı doymuş katı çözeltilisi oda sıcaklığına soğutulur [21].



Şekil 2.7. T6 ısıl işleminde çökeltme sertleşmesinin iki aşaması. [21].

2.3.3.2. Yaşlandırma ısıl işlemi

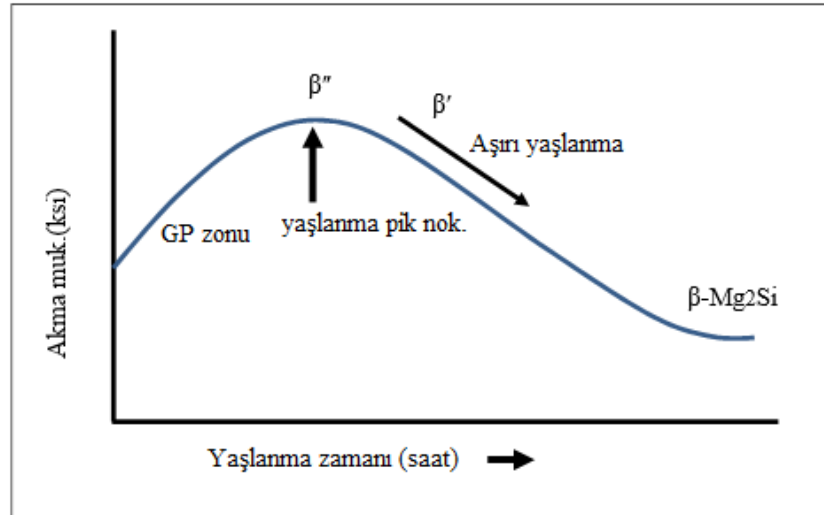
T6 çökeltme sertleştirme prosesindeki ikinci aşama çökeltme ısıl işlemidir. Bu aşama sırasında, aşırı doymuş α fazı çözeltilisi, $\alpha + \beta$ faz bölgesi içinde belirli bir süre boyunca $175^\circ - 195^\circ C$ arasında bir ara sıcaklığa ısıtılır. Yaşlandırma için $200^\circ C$ ’de bir saat, $175^\circ C$ ’de beş saat veya $165^\circ C$ ’de sekiz saat olmak üzere üç farklı zaman-sıcaklık döngüsü kullanılabilir. Üç döngüde de aynı sonuç (T6) elde edilebilir [20].



Şekil 2.8. Çökeltmeyle sertleşebilen Mg_2Si alüminyum fazı için faz diyagramı [21].

Birincil yaşlanma süresi boyunca, Mg_2Si atomlarının mikroskobik kümeleri veya GP bölgeleri, Şekil 2.9'daki mukavemet yaşlanma şemasında gösterildiği gibi, α fazında sayısız pozisyonda oluşur. Yaşlanma süresi arttıkça, Mg_2Si 'nin sabit difüzyonu, bölgelerin boyutlarını arttırarak parçacıkların oluşturmaya neden olur.

Çöken parçacıklar, denge fazı β , Mg_2Si 'nin ince dağılmış parçacıkları olarak oluşmadan önce, β'' ve β' olarak gösterilen iki aşamadan geçer. β'' fazı, uygun yaşlandırma süresinde ortam sıcaklığına soğutulduktan sonra yaşlandırılmış alaşımın en yüksek mukavemetini gösterir [21].



Şekil 2.9. Mukavemet ve yaşlanma süresi [21].

3. KAYNAK YÖNTEMLERİ

Dolgu malzemesi kullanılarak veya kullanmadan, ısı ve/veya basınç aracılığıyla malzemelerin atomik ve moleküler seviyede birleştirilmesi işlemine kaynak denir.

Kaynak, çelik yapılar, araba parçaları ve gemiler gibi birçok endüstride kullanılan en önemli bilimsel gelişmelerden biridir. Aslında, genel olarak kaynak bağlantıları, civatalama veya perçinleme gibi diğer mekanik bağlantı yöntemlerinin çoğundan daha güvenilirdir. Ayrıca, farklı ark kaynağı yöntemlerinin varlığı, zamandan tasarruf, efor ve maliyette azalma gibi birçok sorunu çözmek için fayda sağlamaktadır [22].

Kaynak yöntemlerinin çeşitliliğine rağmen, kaynak yöntemi seçimini etkileyen bir takım sınırlamalar vardır ve kaynak yöntemi seçimini etkileyen en önemli faktörler şunlardır:

- 1- İstenilen kaynak makinesi ve aksesuarları için farklı tiplerin bulunması.
- 2- Aynı kaynak yöntemini tekrar tekrar kullanmak.
- 3- Gerekli kaynak verimliliği ve kalitesi.
- 4- İş yeri (yüksek ve dar yerler gibi).
- 5- Kaynak yapılacak metal türü.
- 6- Ürünün şekli.
- 7- Kaynak yapılacak parçaların boyutları.
- 8- Kaynak işlemini tamamlamak için gereken süre.
- 9- Gereken deneyim, beceri ve kaynakçı sertifikasyonu.
- 10- Maliyet.
- 11- Spesifikasyonlara göre gereksinimler.

Kaynak yöntemlerinin karşılaştırılması için belirtilen noktalar, bir yöntemin diğerine tercih edilmesini belirler:

- 1- Düşük kusurlu mükemmel bir kaynak türü için Metal İner Gaz (MIG) kaynağı, kullanılacak en iyi yöntemlerden biridir. Aynı zamanda metal ark kaynağına kıyasla

hızlı bir yöntemdir ve yine koruyucu gaz kullanan Tungsten İner Gaz (TIG) kaynağına göre daha fazla kaynak metaline sahiptir.

2- Dar ve yüksek yerler için, Metal Ark Kaynağı en iyi yöntemdir. Çünkü düşük ağırlıklı koruyucu gaz kullanmaya ihtiyaç duyulmamaktadır ve bu da taşımayı ve kaldırmayı kolaylaştırır.

3- Düşük kalınlıktaki boruların ve tüplerin kaynağı için Tungsten İner Gaz (TIG) kaynağı, kaynak sırasında ısı girdisi üzerinde daha fazla kontrollü olduğu için kullanılacak en iyi yöntemlerden biridir.

4- Yüksek kalınlıkların kaynağı için Tozaltı Ark Kaynağı en iyi yöntemlerden biridir. Çünkü yüksek oranda kaynak biriktirme metali verir, bu da bu yöntemi diğer elektrik ark kaynağı yöntemlerine göre daha hızlı ve daha verimli hale getirir.

5- Daha düşük maliyetler için Korunmalı Metal Ark Kaynağı, koruma gazı kullanmadığı ve özel ekipman gerektirmediği için en ucuz kaynak yöntemlerinden biridir.

6- En iyi biriktirme şekli için TIG ve MIG, Metal Ark Kaynağı ile karşılaştırıldığında daha düzgün görünümlü kaynak vermektedir.

7- MIG ve TIG kaynağının kullanılması Metal Ark Kaynağı ve Tozaltı Ark Kaynağından daha düşük distorsiyon sağlar.

Tasarımcının önemi sadece temel tasarımda değil, bu belirleyicilerin varlığından kaynaklanan problemlerin çözümünde de ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle tasarımcı, belirli tasarımı bu belirleyicilere göre değiştirmek zorundadır. Örneğin, double-V yerine single-V kaynaklı bağlantı tipi kullanılabilir.

Ayrıca kaynak işlemi, MIG kaynak yöntemini kullanmadaki herhangi bir zorluk gibi birçok sorunu tamir etmek için deneyim gerektirir. Sorunun çözümlerinden biri, bu sorunu yetenekli bir kaynakçı ile manuel kaynak ile tamir etmektir [23].

Birleştirme işlemi, metal safsızlıklarının etkinliği, yüzey pürüzlülüğü ve metallerin kendisinin çeşitli özellikleri nedeniyle karmaşık hale gelir. Bu zorluklarla yüzleşmek için, genellikle basınç ve ısı kullanımını dahil edilerek bazı kaynak prosedürleri geliştirilmiştir [24].

Aslında, kaynak işlemlerinin çoğu, kaynak yapılacak ana metale ısı uygulanarak yapılır. Bu durumda, malzeme kenarını atomlar arası çekim için başka bir iş parçasıyla

beraber yeterince eritmek için ısıtmak gerekir. Ayrıca ihtiyaç duyulan bu ısı, birleştirilecek olan malzeme mikroyapısını da etkilemektedir. Metallerin doğal bir özelliği olarak, metal sıcak olduğunda oksitlenmeye neden olur. Oksidasyona karşı uygun bir koruma sağlanmalıdır. Bazı metaller diğerlerinden daha hassas olduğu için oksidasyona karşı korumak önem arz etmektedir. Bu tür proseslerde bilgi sahibi olmak son derece önemlidir. Uygun kaynak ve kesme işlemlerinin seçilmesinde bir takım hususlar dikkate alınmalıdır. Bu hususlar [25]:

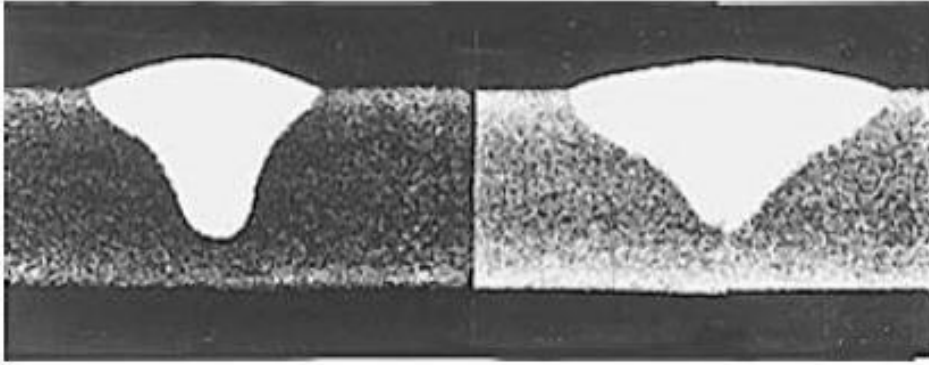
- 1- Beceri gereksinimleri
- 2- Kalifiye işçi
- 3- Kaynaklanabilirlik
- 4- Metalin kalınlığı
- 5- İhtiyaç duyulan uygun kaynak sarf malzemeleri
- 6- Kaynak bağlantı tasarımı
- 7- Isı girdisi
- 8- Proses maliyeti
- 9- Güvenlik

3.1. MIG - MAG Kaynağı

Bu kaynak yöntemi, bir ergitme kaynağı türüdür. MIG kaynağında, kaynak alanını dış atmosferden korumak için inert bir koruma gazı kullanıldığından, bu yöntem manuel kaynak gibi diğer birçok ark kaynağı yöntemine kıyasla yüksek kaliteli bir kaynak yöntemi olarak kabul edilir. Ayrıca bu yöntem yarı otomatik veya otomatik olabilir. Bu durum besleme açısından daha fazla verimlilik sağlar ve akım ve voltaj açısından kaynak sırasında işlemi kolaylaştırır. Koruma gazı tek gaz veya gaz karışımından oluşabilir. Kaynak DC veya AC akım kullanılarak yapılabilir. Koruyucu gaz ve elektrot tipi seçimi kullanılan metalin cinsine bağlıdır ve elektrot makara şeklindedir [23].

Erimiş kaynak havuzu ve ark bölgesi, argon veya helyum gibi asal gazlarla korunur. Metal inert gaz (MIG) kaynak yöntemi alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve dengeli bir ark ile düşük sıçrama kaybı ve iyi kaynak penetrasyonları ile pürüzsüz bir metal transferi elde edilebilir. Koruyucu gazlar göz

önüne alındığında; argon, helyum ve bunların karışımları, paslanmaz ve alaşımlı çeliklerin yanı sıra demir dışı metaller için de kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ark enerjileri karşılaştırıldığında, argon arkındaki enerji, argon gazının daha düşük ısı iletkenliği sebebiyle helyum arkından daha az düzgün bir şekilde dağılır. Bu durumun bir sonucu olarak, argon ark plazması çok yüksek bir enerji çekirdeğine ve bir dış mantoya sahiptir. Daha az termal enerji ve bu sayede argon ark plazması yoluyla metal damlacıklarının stabil, aksenal transferi elde edilebilir. Damlacıkların şekillerinin bir örneği Şekil 3.1’de görülebilir [26].



Şekil 3.1. MIG, argon gazı (solda) ve %75 He-%25 Ar (sağda) [26].

Avantajları:

- 1- Farklı kalınlıklarda birçok metal türünü kaynak yapabilme.
- 2- Yüksek biriktirme ile hız ve mükemmel kaynak verimliliği.
- 3- Her pozisyonda kaynak yapılabilirlik.
- 4- Kaynak dumanları, diğer yöntemlere göre daha sınırlıdır.
- 5- Cüruf olmadan daha az sıçrama.
- 6- Diğer kaynak yöntemlerine göre ısı girdisi düşüktür.
- 7- Düşük hidrojen kaynağı tortusu.
- 8- Kaynak boncuklarının mükemmel görünümü.
- 9- Yüksek hızlı robotlarla rahatlıkla kullanılabilir.

Dezavantajları:

- 1- Ekipman karmaşıktır.
- 2- Yüksek veya dar yerlerde kaynak yapmak zordur.

3- Kaynak torcu ölçüsü gereklidir.

4- Koruyucu gazın kaynak bölgesini koruyabilmesi için kaynak sırasında torç parçaya yakın olmalıdır.

5- Ark hava akımlarına karşı korunmalıdır [23].

MIG için ana ekipmanlar şunlardır:

- torç
- elektrik güç kaynağı
- koruyucu gaz kaynağı
- tel tahrik kontrollü tel makarası

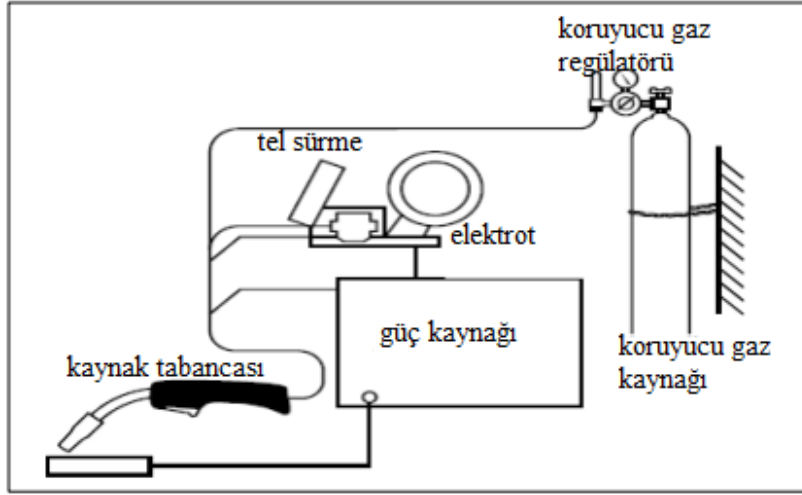
Kaynak birleştirmesi, iş parçası ile sürekli bir sarf malzemesi teli arasında bir elektrik arkının oluşmasıyla sağlanır. Bir elektrot besleme cihazı, hortum aracılığıyla torca sürekli olarak bir metal elektrot sağlar. Bir torç ve kablo, elektrot telini, akımı ve koruyucu gazı arkaya taşır. Torç elektrot beslemesini ve gaz akışını başlatmak ve durdurmak için bir tetik anahtarına sahiptir.

MIG temel kaynak parametreleri (doğrudan kaynakçı tarafından kontrol edilir) voltaj, tel besleme hızı, amper ve hareket hızıdır. İşlemin diğer kritik yönleri arasında torç açısı, kılavuz açısı ve kaynak konumu (kaynağın yerçekimine göre konumu) bulunur. MIG, robotik kaynak uygulamaları için en sık kullanılan işlemdir ve tamir atölyelerinde en yaygın kullanılan işlemlerden biridir.

Avantajları nedeniyle, MIG Kaynağı, metal imalat endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan işlemdir.

3.1.1. Ekipman

Endüstrideki MIG temel tasarımı, Şekil 3.2'de gösterilen temel bileşenlerden oluşmaktadır.



Şekil 3.2. MIG sisteminin basit formu [27].

Aslında, her sistemin tasarımı, en iyi ark performansına ulaşmak için, güç kaynakları seti ve bağlantı teli sürücüleri dahil olmak üzere bu bileşenlerden oluşur. Yaklaşık 135-350 amper ile çalışabilen makine Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



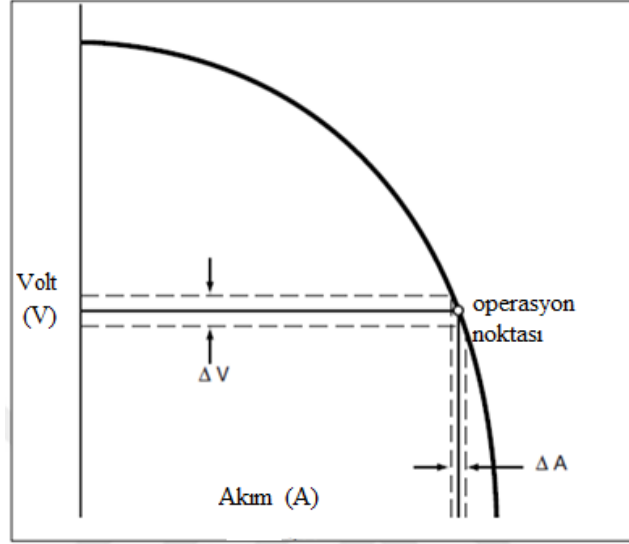
Şekil 3.3. MIG 350MP ünitesinin güç kaynağı [27].

3.1.1.1. Güç kaynağı

MIG işlemiyle yapılan bir kaynak için güç kaynakları, yüksek ark performansını optimize etmek için tasarlanmış karışık çıkış özelliklerini ayarlar. Burada çıkış özellikleri iki ana gruba ayrılır. Bunlar:

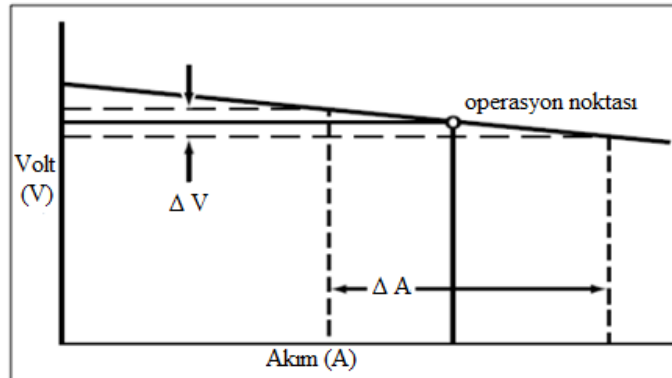
- Sabit akım
- Sabit voltaj

Sabit akım ve sabit voltajın çıkış eğrilerinin karşılaştırması için Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 çizilmiştir. Geçmiş zamanlarda, sabit akım güç kaynakları, günümüzde kullanılan MIG kaynağından daha yaygın olarak yararlanılıyordu. Ancak alüminyum kaynağında kullanılmaya halen devam edilmektedir. Şekil 3.4 sabit akımlı güç kaynağının volt-amper özelliklerini göstermektedir.



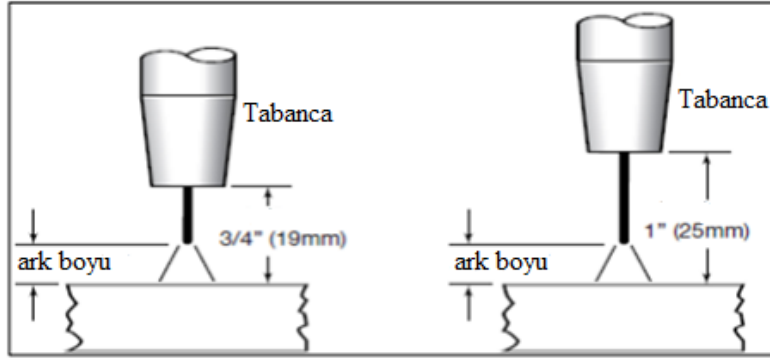
Şekil 3.4. Sabit Akım Güç Kaynağı Volt-Amper özellikleri [27].

Ark uzunluğu, temas ucu ile çalışma mesafesi tarafından belirlenir. Doğru orantılı olarak mesafe ve ark uzunluğu birbirine bağılıken, mesafedeki artışla ark uzunluğunun da arttığı görülmektedir. MIG kaynağında, aynı mesafeyi korumak oldukça zor olduğundan, yarı otomatik kaynak için bir sorunla karşı karşıya kalınır. Bu sorunla başa çıkmak için, ark voltajının kontrollü tel besleyicisi, ark uzunluğundaki değişiklikleri telafi edecek şekilde tasarlanmıştır. Daha önce olduğu gibi, mesafe azaldıkça tel besleme hızı da artacaktır, ters ilişkide arttıkça tel besleme hızı düşecektir.



Şekil 3.5. Güç Kaynağının Sabit Voltajı Volt-Amper özellikleri [27].

Güç kaynağı (sabit voltaj), belirli bir tel besleme hızı için belirli ark voltajını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Nispeten, volt-amper eğrisi düzdür ve bu tür güç kaynaklarında temas ucu ile çalışma mesafesi artarken, kaynak akımı azalır. Ters ilişkide mesafe azalırken kaynak akımı yükselir. Bu durumda mesafe akıma direnç sağlar ve seri devre olur. Şekil 3.6 gerilim ve ark uzunluğunun aynı kaldığı tüm senaryoyu göstermektedir.



Şekil 3.6. Güç kaynakları (sabit gerilim ve ark uzunluğu) [27].

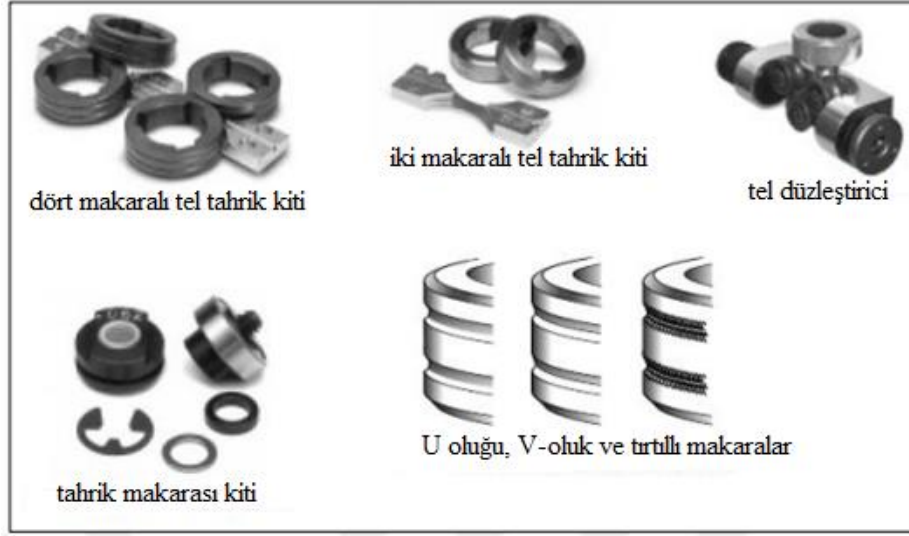
3.1.1.2. Tel ve aksesuarlar

MIG kaynak makinesinin tel tahriki, metal özlü elektrot setleri için kullanılmak üzere tasarlanmıştır. İyi bir kaynak kontrolü için hassas bir tel hızı sağlama yeteneği önemlidir. Kaynak için tel sürücülerin çoğunda sabit bir mıknatıslı motor tarafından yapılan besleme sisteminin hızlı başlatılmasını ve durdurulmasını sağlayan bir sistem vardır. Kaynağın sonunda, ateşleme kontrolünün bir işlevi olan elektrotun kratere yapışmasını durdurmaya ihtiyaç vardır. Koruyucu gaz sisteminin arkından önceden sağlanan gaz akışı isteğe bağlı olarak tahliye kontrolü ile yapılabilmekte ve üniteye giren havanın yerini almaktadır. Tel tahrik ünitesinde, gaz solenoidi, MIG torç tetiğine basıldığında etkinleştirme sağlar. Su soğutmalı MIG tabancalarında isteğe bağlı su bağlantıları kullanımı mevcuttur. Tel doğrultma cihazı, tel sürme yeteneği kazandırarak ark için bazı önemli özellikler sağlar. Bunlar:

- Kaynak birleştirme arkının elektrot yerleşimini iyileştirir.
- MIG torcunun erken aşınmasını azaltır ve kanaldaki sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olur.

Kullanım sırasında elektrotun korunması için bir dizi muhafaza tasarımı yapılmıştır. Kullanım sırasında, makara montaj mili tasarımı, elektrot paketi için gerilim faktörlerini uzatır ve makara standında, elektrotun çözülmesini önlemek için bir frenleme eylemi içerir. Şekil 3.7, kablolu sürücüler için bazı aksesuarları

göstermektedir. Dört makaralı tel tahrik kiti, iki makaralı tel tahrik kiti, tel düzleştirici, U oluğu, V-oluk ve tırtıllı makaralar ve tahrik makarası kitini içerir.



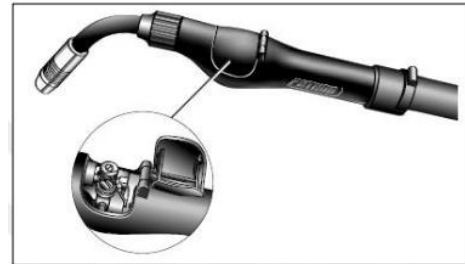
Şekil 3.7. Tel sürme aksesuarları [27].

3.1.1.3. Tel besleme tabancası

Tasarım, alüminyum makara tabancaları ve ark için diğer küçük elektrot paketlerinden oluşmaktadır. MIG makinesinin Şekil 3.8a’da gösterildiği gibi makara tabancası, rahat ve hafif bir tasarımda bir tel besleme hızı kontrolü, bir tel tahrik motoru ve bir elektrot muhafazası içerir. Makara tabancası ünitesi, standart bir el tipi MIG tabancasından daha güvenilir bir şekilde alüminyum dolgu metallerini beslemektedir. Şekil 3.8.b’de gösterildiği gibi makara tabancası ünitesi, en iyi şekilde güvenilir beslemeye sahip bir yardımcı tip besleme ünitesi ile gerçekleştirilir ve ayrıca elektrotun tel tahrikinden ark için kat etmesi gereken mesafeyi azaltır.



a)

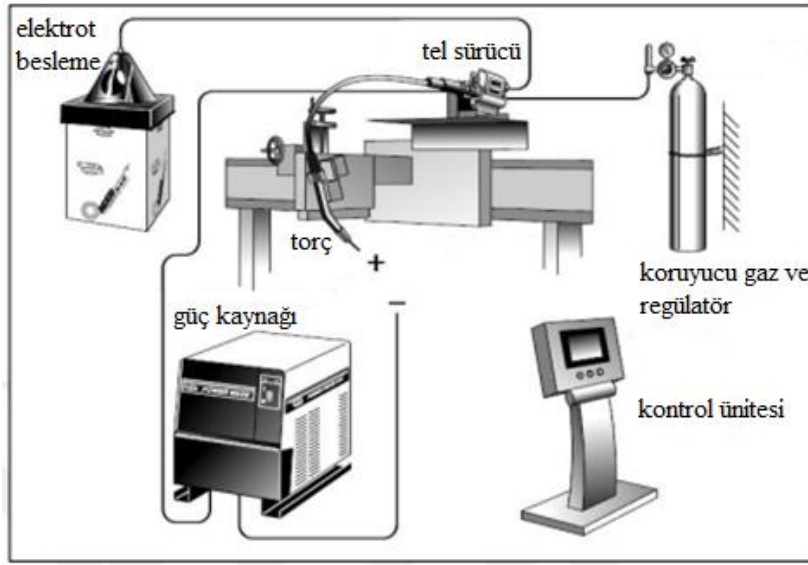


b)

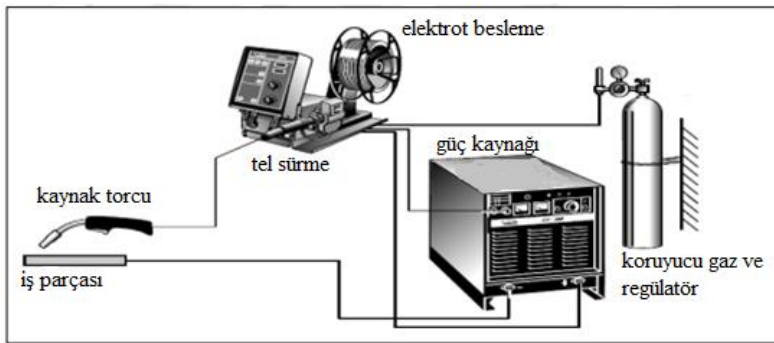
Şekil 3.8. a) Makara tabancası, b) İtme-çekme ünitesi [27]

3.1.1.4. Koruyucu gaz

Yüksek kaliteli kaynak ve ark için koruyucu gaz iletimi oldukça önemlidir. MIG kaynağında, bir manifold ünitesinden regülatör tarafından gaz akış hızının ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla tasarlanmış debimetre ile akış okumaları da önemlidir. Burada ilk okuma, kaynakçının silindirde kalan gazı yönetmesini sağlamak için dahili silindir basıncını ölçer. İkincisi, koruyucu gazın akış hızını ölçer. Şekil 3.9’da otomatik MIG sisteminde görüldüğü gibi, hortumlar regülasyon makinesini tel sürücü içerisinde bulunan gaz solenoidine bağlar. Şekil 3.10 ise yarı otomatik MIG sistemini göstermektedir.



Şekil 3.9. Otomatik MIG ünitesi [27].



Şekil 3.10. Yarı otomatik MIG ünitesi [27].

3.1.2. MIG kaynağı uygulama alanları

- Otomotiv Endüstrisi
- Basınçlı Kap Üretimi
- Endüstriyel Boru Tesisatı

- Boru Hatları
- Metal Yapılar
- Gemi Yapımı
- Demiryolu Taşıtları
- Uçak Endüstrisi
- Ağır Teçhizat Endüstrisi
- Doldurma ve Tamir Kaynağı

3.1.3. Kaynak proses parametreleri

MIG kaynak prosesini önemli ölçüde etkileyen bazı proses değişkenleri vardır, bunlar:

- Elektrot çapı
- Gerilim
- Tel besleme hızı ve akımı
- Kaynak hızı
- İndüktans
- Elektrot konumu
- Koruyucu gaz ve gaz akış hızı
- Torç ve bileşenlerin konumu

3.1.3.1. Elektrot çapı

Elektrot çapı, elektrot boyutunun kaynak akımına göre seçildiği proses kaynağında etkili parametrelerden biridir. Bununla birlikte, örtülü elektrotların aksine, her elektrot geniş bir akım aralığına sahiptir.

3.1.3.2. Voltaj

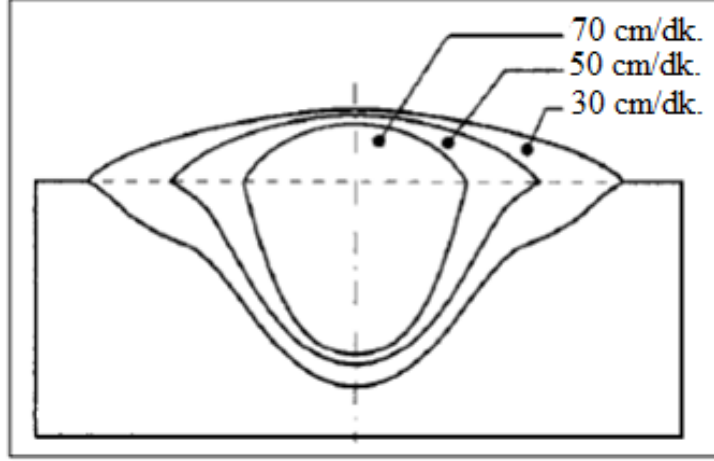
Daha büyük damlalar ve daha fazla sıçrama, kısa ark kaynağı ile üretilebilir. Daha yüksek bir voltaj kullanılırsa kısa devre frekansını azaltır. Aslında voltaj ve ark uzunluğu arasındaki pozitif ilişki vardır. Voltajı yükselterek ark uzunluğunun da artması sağlanabilir.

3.1.3.3. Tel besleme hızı ve akımı

Tel besleme hızı ve çapı, akım üzerinde doğrudan etkilidir ve akım kaynak için ana parametredir. Ayrıca, akım, kaynak kalitesine göre en çok levha kalınlığına ve kaynak hızına göre seçilir.

3.1.3.4. Kaynak hızı

Aslında, son parametrelerde olduğu gibi, kaynak hızı da kaynağın şekli ve penetrasyonu üzerinde önemli bir etkin parametreye sahiptir. Daha fazla ayrıntı Şekil 3.11’de verilmiştir. Kaynak hızının artmasıyla sabit akım ve gerilim değerleriyle kaynak alanının azaldığı görülmektedir.



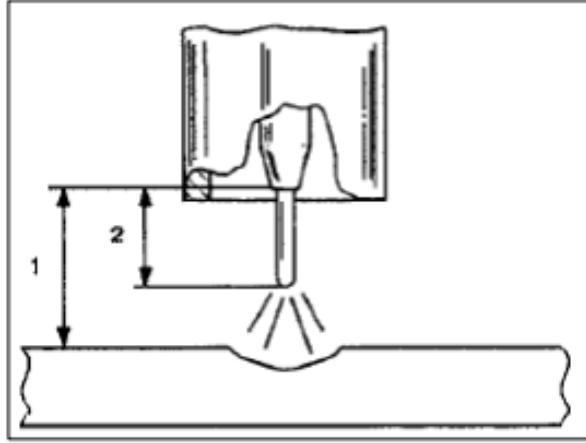
Şekil 3.11. Kaynak hızının kaynak görünümü üzerindeki etkinliği [27].

3.1.3.5. İndüktans

İndüktansın ayarlanması önemli parametrelerden biridir. Tel boyutuna uyacak ve doğru kaynak özelliklerini verecek şekilde güç kaynağı ile ayarlama yapılabilir. Kısa ark kaynağı en hassas olandır ve burada düşük değer belirgin ve yoğun bir ark verir. Yüksek değer, daha yumuşak kaynak davranışı, biraz daha geniş bir damlacık ve daha yumuşak bir ses üretebilirken, indüktansta daha fazla artış, sapma eğilimi ile kötü stabilite üretir.

3.1.3.6. Elektrot

Normal bir mesafenin elektrotun çapının 10-15 katı olduğu bilinmektedir. Kısa kaynak çubuğu geri yanma riskini artıracaktır. Bunun aksine, iş parçasına uzun bir mesafe, özellikle başlangıçta kaynak kökündeki riski artıracaktır. Şekil 3.12’de temas ucu-iş mesafesi ve elektrot uzantısı görülmektedir.



Şekil 3.12. Temas ucu-iş mesafesi ve elektrot uzantısı [27].

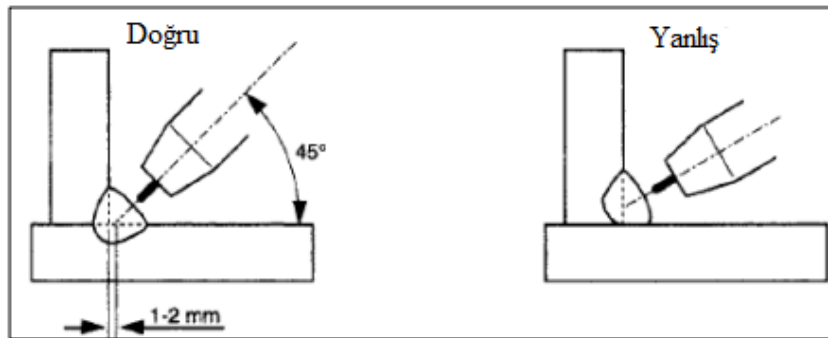
3.1.3.7. Koruyucu gaz ve gaz akış hızı seçimi

Düşük alaşımlı çeliklerin kaynağı için en popüler olanı, %5-20 karbondioksit CO₂ içeren argon karışımlarıdır. Düşük CO₂ içeriği, püskürtme ve darbeli ark kaynağı için bir avantaj olabilir. Saf CO₂, füzyon eksikliğine karşı iyi penetrasyon sağlayan ancak sıçrama miktarını artıran kısa ark kaynağı için bir alternatif olabilir.

Genel olarak, gaz akışının ark kaynağına uyarlanmış olması gerekir, burada düşük akımda dakikada 10 litre yeterli olabilirken, daha yüksekte gerekli veriler 20 litreye kadar olabilir. Bazı durumlarda, alüminyumda kaynak yapmak, çelikten daha fazla gaz gerektirir.

3.1.3.8. Torç ve birleştirme pozisyonu

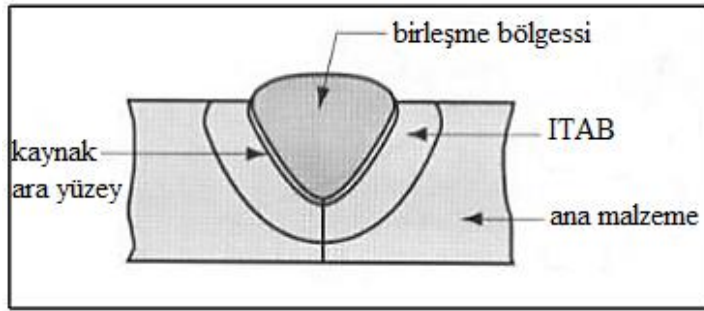
Torç açısı, füzyon eksikliği riski üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Şekil 3.13'te, köşe kaynağı, tabanca açısı ve elektrotun bu tür kalın plakalar üzerinde olduğu kaynak yönü gösterilmektedir. Torç genellikle taban plakası üzerinde 1-2 mm mesafe ofset vererek konumlandırılmıştır.



Şekil 3.13. Kaynak torç açısı ve konumu [27].

Kaynak işlemi sırasında, metaller birleşme sıcaklığı aralığının üzerinde ısınır. Ardından kaynaktan sonra ortam sıcaklığına soğutulur. Kademeli ısıtma ve transfer nedeniyle, kaynak bölgesinden uzaktaki ana metal yüksek sıcaklıkla ısınacaktır. Kaynak parçasına kademeli olarak yaklaşıldığında daha yüksek sıcaklıklarda, ısıdan etkilenen bölge olarak bilinen karmaşık mikroyapılı bölge oluşacaktır. Katılaşmanın sonucu olarak, daha sonraki ısıtma ve soğutma sonucunda, kaynakta iç gerilmeler ve plastik şekil değiştirmeler olacaktır. Şekil 3.14’te gösterildiği gibi, sıcaklık eğimine göre, kaynaklı bağlantıda üç farklı bölge tanımlanabilir, bunlar:

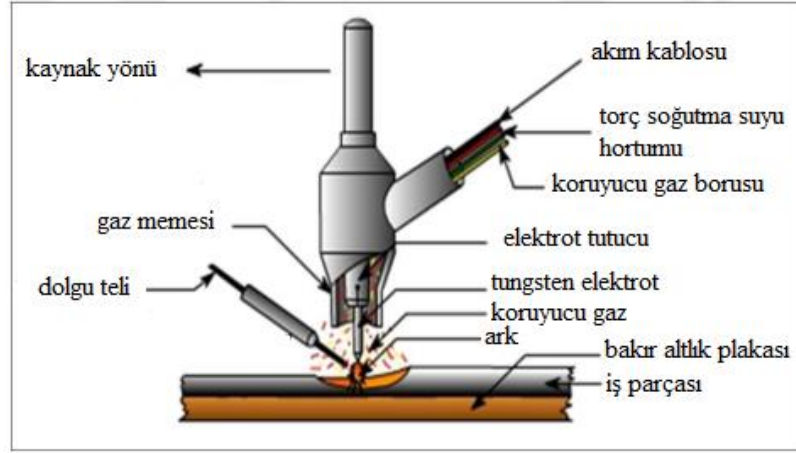
- Ana metal
- Isıdan Etkilenen Bölge (ITAB)
- Kaynak metali.



Şekil 3.14. Kaynak birleşim bölgeleri [27].

3.2. TIG Kaynağı

Koruyucu gaz olarak genellikle argon gazı kullanıldığı için, TIG ark kaynağına “Argon-Ark” kaynağı da denir. Bir elektrik ark kaynağı yöntemi olan TIG ark kaynağı yönteminde kaynak için gereken ısı, erimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektrik arkı ile sağlanır. Ark bölgesi genellikle argon gazı gönderilerek korunur. Kaynak yapılacak ana metale göre kaynak ilave metali kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir. Bu yöntem 1940-1944 yıllarında ABD’de özellikle havacılık endüstrisinde alüminyum ve magnezyum gibi hafif metal alaşımlarının kaynağında kullanılmıştır. O dönemde Amerika Birleşik Devletleri’nde doğal gaz kaynaklarından bol miktarda elde edilen helyum gazı da kullanılmıştır. Şekil 3.15’te TIG kaynak işleminin şematik gösterimi verilmiştir [28].



Şekil 3.15. TIG kaynak işlemi [28].

TIG ark kaynağı yöntemi endüstride yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Bazı özel çelik malzemelerin kaynağında kullanılabilir ancak çoğunlukla demir dışı metallerin her pozisyonunda bu yöntemle yapılır. İnce metallerin kaynağında çok daha başarılı olan TIG, orta kalınlıktaki metallerin kaynağında da kullanılmaktadır.

TIG ark kaynağında ark ve kaynaklı bağlantı kaynakçı tarafından kolayca görülebilir. Cüruf temizleme ve cüruf kalıntıları sorunu olmaz. TIG ark kaynağı önemi giderek artan ve günümüzde uzay, havacılık, gıda, otomotiv sektörlerinde uygulanabilen bir kaynak yöntemidir.

TIG kaynağı yöntemi çelik, paslanmaz çelik, nikel alaşımları, bakır alaşımları, titanyum alaşımları, alüminyum ve magnezyum alaşımları ile birlikte sorunsuz bir şekilde uygulanır. Bu malzemeler bakım onarım işlerinde, otomotiv sanayinde, gemi inşa sanayinde, uçak ve uzay sanayinde, kimya sanayinde, metal imalat sanayinde, gıda sanayinde, boru hatlarında, kazanlarda ve basınçlı kaplarda sıklıkla kullanılmaktadır.

3.2.1. TIG kaynağı temelleri

Elektrot ucu ile güç kaynağı makinesi tarafından kaynaklanacak iş parçası arasında bir plazma arkı oluşturulur. Ateşleme darbesi, birkaç MHz' ye kadar büyük olan yüksek frekanslı bir jeneratöre sahip güç kaynağı ile üretilir. Frekans ve voltaj, kaynak hücresinin çevresinde güçlü elektriksel girişim oluşturur. Elektrik enerjisi, taban ve dolgu malzemesinin erimesini sağlayan termal enerjiye dönüştürülür.

Kaynak havuzunda yüksek sıcaklık bulunduğu için oksijen ile reaksiyona girme eğilimi gösterir ve ana metalin yüzeyinde oksidasyon oluşturur. Oksidasyonu önlemek

için prosese gaz koruyucu uygulanır. Koruyucu gaz, önceden ayarlanmış bir akış hızında gaz memesine beslenir. Ayrıca koruyucu gaz, kaynak torçunun aşırı ısınmasını önlemek için de fayda sağlamaktadır.

3.2.1.1. Arkın karakteristiği

Tungsten elektrot ile parça arasında bir ark oluşturulacağı zaman, bu boşluk elektriksel olarak iletken hale getirilmelidir. Ark tutuşması sırasında oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle koruyucu gaz elektriği ileten hale gelir. TIG kaynak yönteminde arkın kaynağa başlarken tutuşması önemli konulardan biridir.

Bu yöntemde ateşleme sırasında kaynak metalinde tungsten kalıntıları oluşabilmektedir. Elektrot alaşımıdır ve bu nedenle ark kararsız hale gelir. Yardımcı bir plaka üzerinde ateşlenerek tungsten kalıntılarından sakınılabılır. Bu yöntem sadece doğru akımda mümkün olmaktadır.

Alternatif akım uygulamalarında kullanılan hem doğru akım hem de yüksek frekans ile ateşlemede, yüksek gerilim arkı, elektrot ile iş parçası arasındaki gazı iyonize ederek kaynak arkını hemen oluşturur. Bu durum, alternatif akımda her çevrimde tekrarlanır. Arkın yüksek voltaj darbesi ile ateşlenmesinde, elektrot iş parçasına yaklaştırıldığında, yüksek voltajlı bir akım darbesi elektrot ile iş parçası arasındaki gazı iyonize ederek bir kaynak arkı sağlar. Bu yöntem genellikle doğru akımla kaynak yapan otomatik TIG kaynak ekipmanlarında kullanılır.

TIG kaynağı avatajları:

- 1- Cüruf oluşturmaz ve temizlik gerektirmez.
- 2- Her zaman ek metal gerekmez.
- 3- Her yöne kaynak yapılabilir.
- 4- İnce parçaların kaynağında mükemmel sıcaklık kontrolü, ısı kaynağı ve ilave metal ayrı ayrı kontrol edilebilir.
- 5- Ark ve kaynaklı bağlantılar görülebilir.
- 6- Kaynak yapılacak bölgeye istenildiği kadar ilave metal gönderilebilir.

TIG kaynağı dezavatajları:

- 1- Kaynak hızı yavaştır.
- 2- Tungsten elektrot kirlenir.
- 3- Düşük doldurma oranı sebebiyle zaman ve maliyet fazladır.

4- Tungsten elektrottan gelen parçacıklar kaynak banyosuna girebilir.

5- 9,5 mm'den daha kalın kesitler için sarf elektrotlu ark kaynağından daha az ekonomiktir.

3.2.2. Elektrotlar

TIG kaynak yönteminin diğer elektrik ark kaynak yöntemlerinden en önemli farkı, ilave kaynak metalinin elektrottan değil harici olarak sağlanması ve elektrotun sadece ark oluşturma görevini üstlenmesidir. Elektrot malzemesi olarak erime sıcaklığı yaklaşık 3500°C olan tungsten seçilir. Yüksek erime sıcaklığına ek olarak, tungsten, ark kolonunda güçlü bir elektron akımı yayan ve ark stabilitesini sağlamak için ark kolonundaki atomları iyonize eden çok güçlü bir elektron yayıcıdır.

Günümüz endüstrisinde ticari saflıkta tungsten (%99,5 W) ve toryum, zirkonyum ve lantan ile alaşımlı elektrotlar kullanılmaktadır. Pratikte TIG kaynak elektrotlarını saf tungsten elektrotlar, alaşımlı elektrotlar ve şeritli elektrotlar olmak üzere üç grup altında toplamak mümkündür. TIG kaynak elektrotları AWS A5.12 ve DIN 32528' de bileşimlerine göre sınıflandırılır ve birbirlerinden kolayca ayırt edilmeleri için renk kodları kullanılır. Standart uzunluktaki tungsten elektrotların nominal ağırlığı Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Standart uzunluktaki tungsten elektrotların nominal ağırlığı [28].

Standart çaplar	Standart uzunluklar için gram cinsinden elektrot başına nominal ağırlık (g)		
	75 mm	150 mm	175 mm
1.0	1.1	2.3	2.7
1.2	1.6	3.3	3.8
1.5	2.6	5.1	6.0
1.6	2.4	5.8	7.0
2.0	4.5	9.1	10.6
2.4	6.5	13.1	15.3
3.0	10.2	20.5	23.9
3.2	11.7	23.3	27.2
4.0	18.2	36.4	42
4.8	26.2	52	61
5.0	28.4	57	66
6.0	41	81	95
6.4	47	93	109
7.0	56	111	130
8.0	73	145	170
10.0	114	227	256

Yedi inçten daha fazla olanlar sadece mekanize ve otomatik kaynak yöntemlerinde kullanılır. Pratikte elektrot çapı, elektrotun maksimum akım yükleme kapasitesi dikkate alınarak seçilmelidir. Bu değere yaklaştıkça arkın ısı yoğunluğu artar ve dikiş yüksekliğinden daha yüksek penetrasyona sahip bir kaynak dikişi elde edilebilir.

3.2.2.1 Elektrot tipinin tanımlanması

Elektrotlar renkle tanımlanır ve DIN standardı ile tanımlanan bir renk kodu atanmıştır. Bununla birlikte, özellikle turuncu, pembe ve kırmızı olmak üzere bazı renkleri birbirinden ayırt etmek genellikle zordur. Bu nedenle belirli bir tip kullanılmalıdır.

Elektrotları bir standarda göre renklendirme girişimi mükemmel bir fikirdir, ancak bunun evrensel olarak kullanılması için, karışıklığı önlemek için çeşitli renklere kabul edilebilir bazı uluslararası standartlar da gerekmektedir. Şekil 3.16'da renklerine göre DIN standardı ile tanımlanan elektrotlar gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Renklerine göre DIN standardı ile tanımlanan elektrotlar [28].

3.2.3. Ark kaynak makinesi seçimi (AC veya DC)

Bir akımın seçimi metalin kalınlığına, bağlantı pozisyonuna ve elektrot tipine bağlıdır.

Doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) olmak üzere iki tür akım vardır.

3.2.3.1. Doğru akım (DC)

Doğru akım, alternatif akımdan daha yaygın olarak kullanılır. İki tür doğru akım vardır:

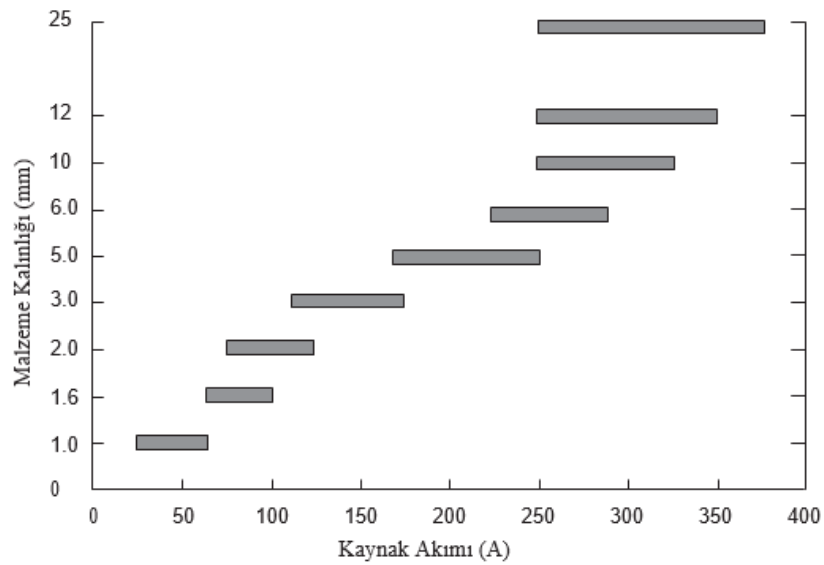
- Doğru akım elektrotu negatif. Elektrot akımı negatif ve iş parçası pozitifdir. Bu akım ince metallerde kullanılır.
- Doğru akım elektrotu pozitif. Elektrot için akım pozitif bir akımdır ve iş parçası için negatifdir. Bu akım, derin penetrasyon için kalın metal ile kullanılır.

3.2.3.2. Alternatif akım (AC)

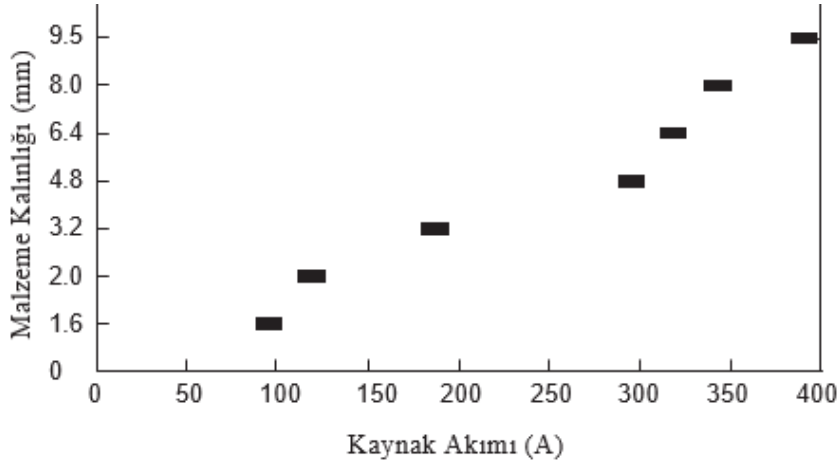
Alternatif akımların kullanımı kolaydır ve düşük maliyetlidir. Alternatif akımın penetrasyon gücü, a ve b maddelerindeki akımların arasında yer alır [23].

3.2.4. Kullanılan koruyucu gazlar

Alüminyumun TIG kaynağı için tercih edilen gaz argondur, ancak helyum ve argon-helyum karışımları da kullanılmaktadır. Argon; geniş, sıg nüfuziyetli bir kaynak dikişi verirken, kaynağın parlak ve gümüşü bir görünümde olmasına sebep olmaktadır. En kolay ark tutuşması ve en kararlı ark da argon ile elde edilmektedir. Koruyucu gaz olarak argon ile kullanım için önerilen kaynak parametreleri tablosu Tablo 3.2’de yer almaktadır. Bir dizi levha kalınlığı için tipik akım aralıkları, Şekil 3.17’de alın kaynakları için ve Şekil 3.18’de iç köşe kaynakları için grafiksel olarak gösterilmektedir [30].



Şekil 3.17. Çeşitli malzeme kalınlıkları için tipik TIG akım aralıkları [30].



Şekil 3.18. İç köşe kaynağı için tipik TIG kaynak parametreleri [30].

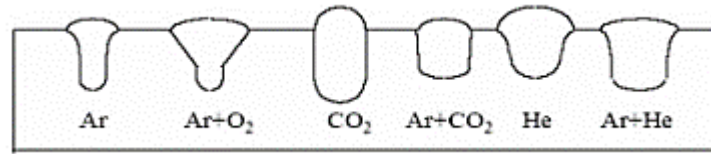
Tablo 3.2. Argon ile kullanım için önerilen kaynak parametreleri [30].

Kalınlık (mm)	Akım (A)	İlave tel kalınlık (mm)	Kaynak hızı (mm/dk.)
0.8	55	1.6	300
1.2	100	2.4	400
1.5	130	2.4	470
1.5	100	2.4	250
2	160	3.2	380
2.5	170	3.2	300
2.5	140	3.2	250
3.2	180	3.2	300
3.2	175	3.2	300
5	250	4.8	200
5	240	4.8	250
6.5	320	4.8	150
6.5	290	4.8	250
8	340	4.8	165
10	350	6.4	180
10	370	6.4	250

Helyum, arkı daraltma etkisi ile ark gerilimini ve penetrasyonu artırır ancak ark tutuşmasını zorlaştırır ve ark stabilitesini olumsuz etkiler. Modern kaynak makineleri, kaynağı argonla başlatmak ve kararlı bir ark oluşturulduktan sonra otomatik olarak helyuma geçiş yapmak üzere donatılmıştır. Helyum, argondan beş ila altı kat daha fazla pahalı bir gazdır ve çok az ark temizleme işlemi sağlamaktadır. Gerçekten de bazı durumlarda helyum kullanımı ITAB'da kurum birikmesine neden olabilir ve bu normalde tel fırçayla giderilebilse de çıkarılması zor olabilir. Bu nedenlerle manuel TIG kaynağında %100 saf helyum nadiren kullanılmaktadır. Helyuma argonun eklenmesi ark stabilitesini geliştirmektedir. Kaynak hızları ve penetrasyon saf

helyuma göre daha az, argona göre daha fazla olacaktır. Karışımdaki argon miktarını değiştirerek boncuk genişliğini ve penetrasyonu kontrol etmek mümkündür. En popüler karışım argonda %25 helyumdur.

Şekil 3.19’da kullanılan gazların ve karışımlarının kaynak dikişi ve nüfuziyete etkisi gösterilmiştir [30].



Şekil 3.19. Farklı gazların ve karışımlarının kaynak dikişi ve nüfuziyete etkisi [29].

Gazaltı kaynaklarında kullanılan gazların kimyasal davranışları ve uygulama alanları Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan gazların kimyasal davranışları ve uygulama alanları [29].

Koruyucu Gaz	Gazın Kimyasal Davranışı	Koruyucu Gaz Kullanım Alanı
Ar	Soy	Çelikler dışında kalan tüm metal ve alaşımların kaynak uygulamalarında.
He	Soy	Al ve Cu alaşımlarında gözenek oluşumunu azaltmak için ve yüksek sıcaklık isteyen uygulamalarda.
CO ₂	Oksitleyici	Az karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynak uygulamalarında.
N	Redükleyici	Bakır kaynaklarında güçlü ark isteyen uygulamalarda.
Ar + He %20-80 / %50-50	Soy	Sakin ve kontrollü ark istenilen kaynaklarda, Al ve Cu alaşımlarında, gözenek hatası istenmeyen uygulamalarda.
Ar + %25-30 N	Redükleyici	Bakır kaynağının yumuşak ve kontrollü ark isteyen uygulamalarında.
Ar + %3-5 O ₂	Oksitleyici	Paslanmaz ve karbonlu çelik kaynaklarında yüksek oranda deokside edilmiş tel elektrot ile olan uygulamalarda.
Ar + %20-30 CO ₂	Oksitleyici	Çeşitli çeliklerin kaynağında kısa ark ile olan uygulamalarda
Ar + %5 O ₂ + %15 CO ₂	Oksitleyici	Deokside edilmiş tel elektrot ile çeşitli çeliklerin kaynak uygulamalarında.

MIG kaynağında da koruyucu gazlar, TIG kaynağında olduğu gibi inert gazlar, argon ve helyum veya bu ikisinin kombinasyonlarıdır. Oksijen veya azot gibi diğer aktif gazlar, küçük miktarlarda bile gözeneklilik ve kurumlanma sorunlarına neden olmaktadır. En yaygın kullanılan gaz, hem manuel hem de bazı otomatik kaynaklarda

kullanılan argondur. Helyumdan önemli ölçüde daha ucuzdur ve mantar şeklinde bir kaynak kesiti vermek için parmak benzeri bir penetrasyon ile geniş, pürüzsüz bir kaynak parçası vererek düzgün, sessiz ve kararlı bir ark üretir. Bununla birlikte argon, en düşük ısı girişini ve dolayısıyla en yavaş kaynak hızlarını verir. Bu nedenle kalın kesitlerde birleşme hatası ve porozite olması riski vardır. Argon ayrıca kaynak yüzeyinde siyah kurumlu bir tortu verebilir. Bu, tel fırçalama ile kolayca giderilebilir. Helyum, ark voltajını argona kıyasla %20'ye kadar arttırmaktadır. Bu da çok daha sıcak bir ark, artan penetrasyon ve daha geniş kaynak dikişi ile sonuçlanır. Daha geniş damlacıklar, arkın daha az kritik konumlandırılmasını gerektirir ve penetrasyon tipi kusurların olmamasından kaçınmaya yardımcı olur. Daha sıcak, daha yavaş soğuyan kaynak havuzu aynı zamanda hidrojenin erimiş kaynak metalinden yayılmasını sağlayarak gözenek miktarını azaltmak için kullanılabilir bir durum haline gelir. Artan ısı, koruyucu gaz olarak argon kullanılarak yapılan benzer bir bağlantıya göre üç kat daha yüksek kaynak hızlarının elde edilmesini de sağlamaktadır. Ancak helyum pahalıdır ve argondan daha az kararlı bir ark vermektedir. Manuel kaynak ve bazı mekanize uygulamalar için argon ve helyum karışımları, iki gaz arasında orta özelliklerle iyi sonuçlar verir. Bu karışımlar, ısı girdisini artırdıkları ve saf argondan daha geniş kabul edilebilir kaynak parametreleri tolerans aralığı sağladıkları için daha kalın malzemeler üzerinde kullanışlıdır. Ayrıca daha hızlı hareket hızlarının kullanılmasını sağlayarak üretkenliği artıracaklardır. En popüler kombinasyonlar argondaki helyumun %50 ve %75' i dir [30].

3.3. Kaynak Pozisyonları

Tüm ark kaynağı faaliyetleri için düz veya aşağı pozisyonda kaynak yapılması tercih edilir. Düz konumda kaynakçının yüksek kaliteli kaynak metalini yüksek birikim oranlarında biriktirmesi diğer konumlardan herhangi birine göre daha kolaydır. Kaynak havuzu bu konumda daha büyüktür ve daha yavaş katılma ve soğuma hızları ile havuzdan gazların çıkmasına izin verir ve gözenek miktarını azaltır. Bununla birlikte, yatay-dikey gibi konumlardaki yerçekimi kuvveti, kaynak havuzunun sarkma eğiliminde olduğu ve kabul edilebilir bir kaynak profili elde etmeyi daha zor hale getirdiği anlamına gelir. Bu etkiler MIG'de TIG'den daha belirgindir. Düz konum kaynağı bu nedenle en düşük maliyetle en kaliteli kaynak metalini verir.

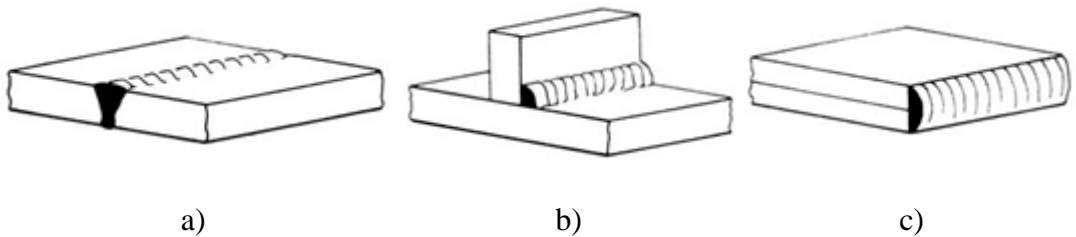
Tasarımcı, bir yapının tasarımını düşünürken bu noktaları dikkate almalıdır. Mümkün olan her yerde kaynak düz konumda yapılmalıdır. Bu, daha kolay ayarlanabilen alt montajların imalatını sağlayabilir. Döndürücüler veya ön plakayı ayarlama ekipmanları, elle taşınamayacak kadar büyük parçalar için kullanışlıdır. Bununla birlikte, bu ekipmanın kullanımı, bileşenin altlığa takılmasını kolaylaştırmak için bileşene geçici bağlantıların kaynaklanmasını gerektirebilir. Bu kaynaklarda kalıcı bağlantılara uygulandığı kadar özen gösterilmelidir.

3.4. Kaynak Birleştirme Yöntemleri

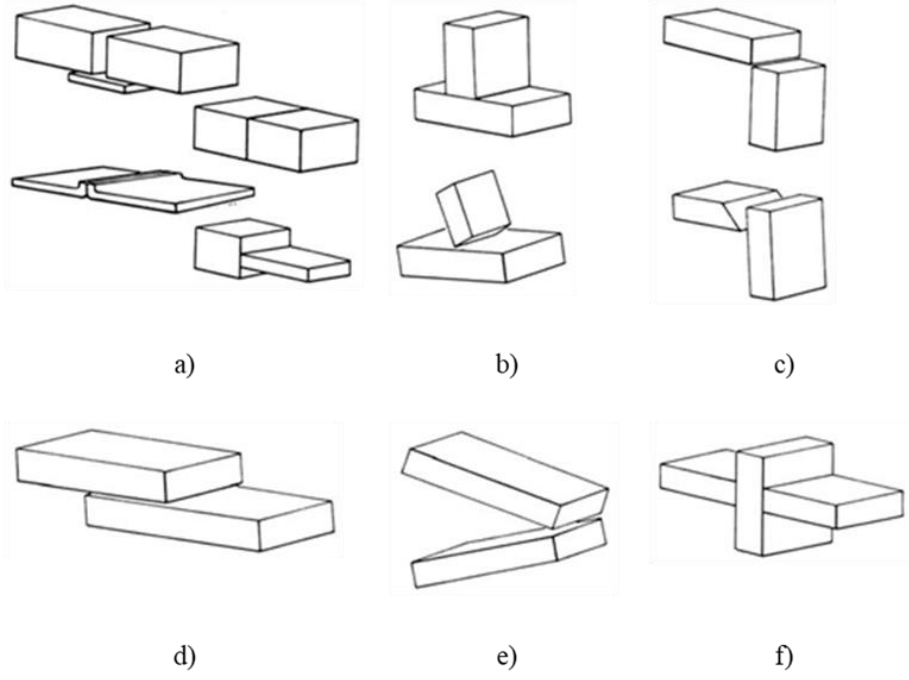
Doğru bağlantı tasarımından çok, kaynağın başarısını etkileyen birkaç önemli karar daha vardır. Kaynak kalitesi veya performansı ile ilgili problemler genellikle kenar hazırlığının yanlış tasarımına bağlanabilir. Bağlantı tasarımı, mukavemet gereksinimleri, alaşım, malzemenin kalınlığı, bağlantının türü ve konumu, kaynak erişimi ve kullanılacak kaynak işlemi ile belirlenir.

Şekil 3.20’de gösterilen alın, köşe ve kenar kaynağı olmak üzere üç temel kaynak biçimi vardır ve bunlardan altı temel bağlantı türü geliştirilebilir. Bunlar, Şekil 3.21’de gösterilen alın, T-eklem, köşe, çapraz, kenar ve bindirmedir.

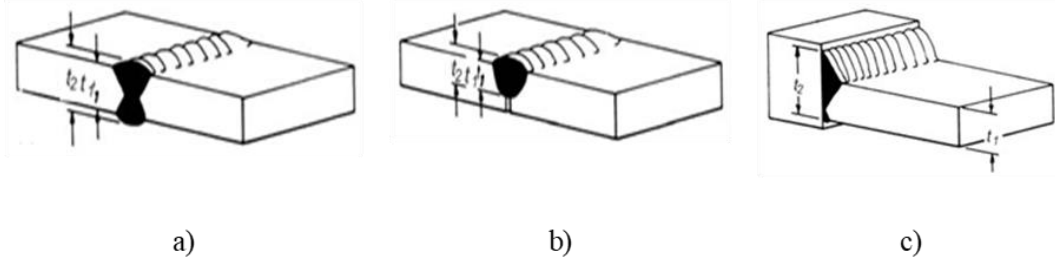
Bu kaynak türlerinin statik çekme mukavemeti boğaz kalınlığına göre belirlenir (Şekil 3.23). Tam nüfuziyetli bir alın kaynağının boyutu, Şekil 3.23’te levha veya borunun düzlemi içinde biriken kaynak metalinin kalınlığı, t_1 ile belirlenmiştir. Aşırı kaynak metali için bir alın veya köşe kaynağının izin verilen statik tasarım gerilmesinin hesaplanmasında, yani bir alın için ana metalin yüzeyinin üstünde veya (t_2-t_1) tarafından verilen bir köşe kaynağının ikizkenar üçgeninin dışında tolerans alınmamaktadır.



Şekil 3.20. a) Alın, b) köşe ve c) kenar kaynakları [30].

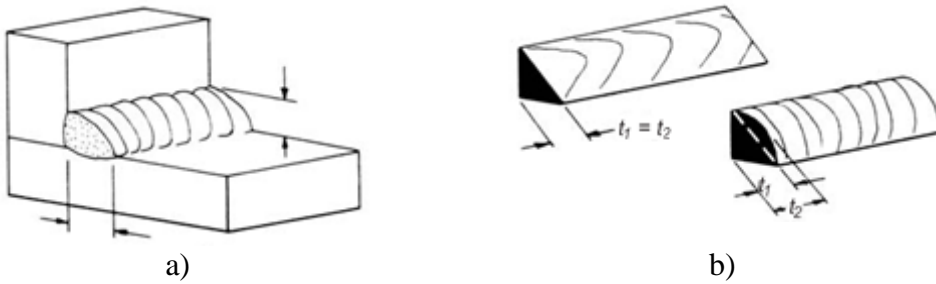


Şekil 3.21. Alın, dolgu ve kenar kaynağından geliştirilen bağlantı türleri. a) küt b) T c) köşe d) bindirme e) kenar f) çapraz [30].



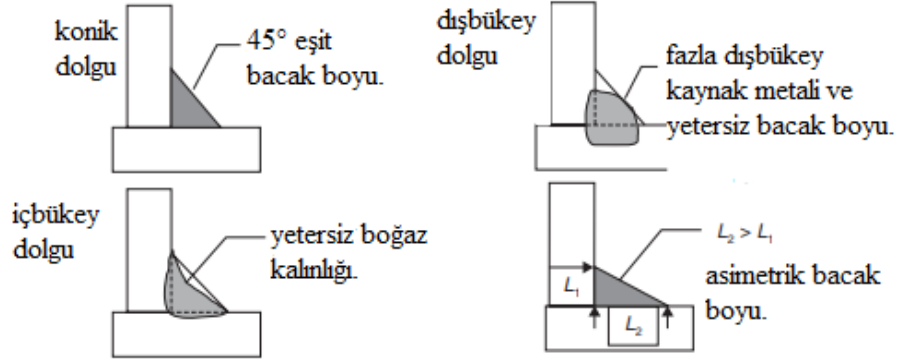
Şekil 3.22. Alın kaynağında boğaz kalınlığı: (a) tam kalem alın kaynağı, (b) kısmi alın kaynağı, (c) T-alın kaynağı [30].

İç köşe kaynağı için, kaynağın şekli ve köke nüfuz etme miktarı boğaz kalınlığını etkileyecektir. Efektif boğaz kalınlığı Şekil 3.23'te t_1 'dir.



Şekil 3.23. Köşe kaynağında boğaz kalınlığı: a) İç köşe kaynağı, b) köşe ve dışbükey dolgu kaynağı [30].

Dolgu kaynağının boyutu tasarımcı tarafından belirlenmeli ve yükü taşıyabilecek boyutta olmalıdır. Boğaz bu nedenle malzeme kalınlığından tamamen farklı olabilir. Dolgu kaynağı ayrıca köşe, içbükey veya dışbükey dolgu olarak da tanımlanabilir. Ek olarak, iç köşe kaynağı eşit olmayan bacak uzunluklarına sahip olabilir. Bu dört dolgu kaynağı türü Şekil 3.24'te gösterilmektedir [30].



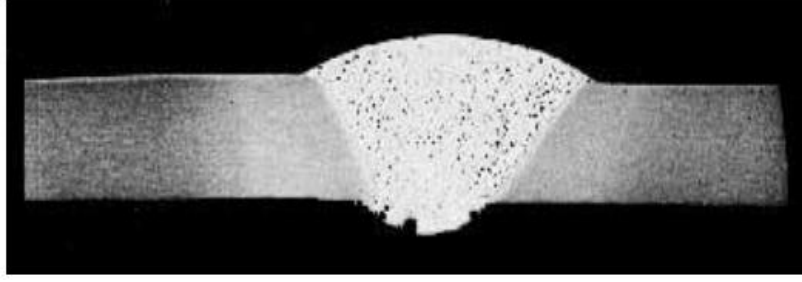
Şekil 3.24. Köşe, dışbükey, içbükey ve eşit olmayan bacak boyu gösterimi [30].

3.5. Kaynak Hataları

3.5.1. Alüminyum kaynak süreksizlikleri

Alüminyum alaşımlarının çok geniş uygulama alanları olmasına rağmen alüminyum alaşımlarının kaynağı düşünüldüğünde sınırlı bir işlem olduğu bilinmektedir. Bu sınırlamaların nedeni esas olarak füzyon ve katılaşma ile ilişkili içsel kusurlardan (sıcak yırtılma, inklüzyonlar ve hidrojen çatlama) kaynaklanmaktadır. Gözenekler, penetrasyon eksikliği, ark çarpması, eksik birleşme, örtüşmeler, büzülme boşlukları, oksit kapanımları gibi kaynak işleminin kendisinden kaynaklanan süreksizlikler de görülebilir.

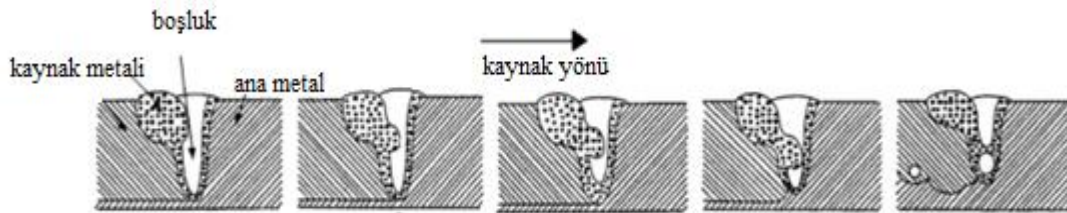
Esas olarak kaynak metali ile ilgili bir problem olan ve ergimiş kaynak metali içindeki çözünmüş gazın katılaşırken hapsolmesi sonucu oluşan alüminyum alaşımlı kaynaklarda gözeneklilik bir süreksizlik olarak Şekil 3.25'te görüldüğü gibi karşımıza çıkmaktadır [26].



Şekil 3.25. İnce dağılmış gözeneklilik [26].

3.5.1.1. Porozite

Al alaşımlarında kaynak sırasında gözenekliliğin ana nedeninin hidrojen olduğu bilinmektedir. Alüminyum, erimiş halde yüksek bir hidrojen çözünürlüğüne sahiptir, ancak katı halde değildir. Bu da kaynak sırasında kolayca gözeneklere neden olabilir. Çünkü hidrojen soğumadan önce kaçmaya çalışır. Eğer kaynak havuzu çok hızlı soğur, hidrojen kaynak malzemesinde kalırsa gözeneğe neden olur. Kaynak malzemesindeki gözeneklilik, gazların katılmış malzeme içinde tutulmasıyla oluşturulmuş gibi görünmektedir. Nem hidrojenin bir kaynağıdır. Oksit tabakası içindeki hidrojen bir diğer kaynaktır. Azot ve oksijen gibi diğer gazlar, AlN ve Al₂O₃ olarak Al ile bağlanır. Kaynak sırasında oluşan iki tür gözeneklilik vardır; bunlar makro ve mikro gözeneklerdir. Aralarındaki fark, boyutlarıdır. Kaynaklı kökte gözenek oluşumunu gösteren şematik diyagram Şekil 3.26'da gösterilmektedir [31].



Şekil 3.26. Kaynaklı kökte gözenek oluşumunu gösteren şematik diyagram [31].

a. Makroporozite

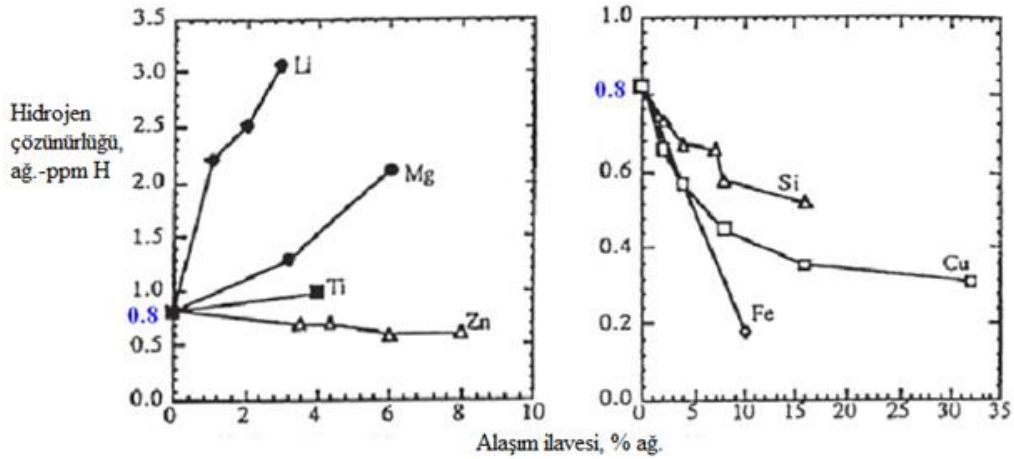
Makro gözenekler, çapı 200 mikrometreden büyük olan gözeneklerin tanımıdır. Kaynak malzemesinde makro gözeneklerin nasıl ortaya çıktığı farklı durumlara bağlıdır. Makro gözeneklerin ana nedenleri yağ, gres ve kirdir, bu nedenle kaynak öncesi iş parçasının temizlenmesi önemlidir.

b. Mikroporozite

Mikro gözenekler, çapları mikrometre ölçeğinde, genellikle birkaç mikrometre boyutunda olan gözeneklerdir. 1 mikrometreden küçük boyutlu gözenekler, sadece optik mikroskopta görülebilir [32].

3.5.1.2. Hidrojen kaynaklı gözenek

Erimiş Al alaşımlarında hidrojenin maksimum çözünürlüğü, diğer malzemelerden çok daha yüksektir. Kaynaklı Al alaşımlarında gözenek oluşumu, alaşım elementlerinin türü ve miktarı ile ilgilidir. Al-Si, Al-Cu, Al-Fe ve Al-Zn alaşımları hidrojenin çözünürlüğünü azaltırken Al-Li, Al-Mg ve Al-Ti alaşımları daha yüksek çözünürlük sağlar. Bu, Şekil 3.27’de görülebilir. Örneğin Al-Cu alaşımları, Cu ilavesi ağırlıkça %3’ün üzerindeyse hidrojenin çözünürlüğünde büyük bir azalma sağlar. Bununla birlikte, Al-Mg alaşımları artan bir hidrojen çözünürlüğü sağlar. %0 Mg ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %6 magnezyumlu Al-Mg alaşımı, hidrojen çözünürlüğünü ağırlıkça neredeyse iki katına çıkarmaktadır. Alaşım elementleri ayrıca katılma aralığını etkileyerek kaynaklı malzemede gözenek oluşumunu da etkilemektedir [33].



Şekil 3.27. Alaşım elementlerinin sıvı alüminyum içinde 1246 °C ve 1 atm basınçta hidrojen çözünürlüğüne etkisi [31].

En önemli hidrojen kaynakları şunlardır:

- Hidrokarbonlar, dolgu malzemesi ve ana malzeme üzerinde yağ, kir ve gres şeklinde bulunabilen hidrojen kaynaklarıdır.
- Nem (H₂O) hidrojen içerir ve istenmeyen su, saf olmayan koruyucu gaz ve plaka üzerinde yoğunlaşma nedeniyle mevcut olabilir.

- Gözeneklilik, hidrojen absorpsiyonu ve reddi arasındaki bir dengedir. Yüksek oranda hidrojen emilimi ve yavaş oranda reddedilme varsa gözenek oluşumu meydana gelir. Hidrojenin absorpsiyon/reddetme oranını kontrol etmek kolay bir iş değildir. Katılma modu, soğutma hızı, kaynak parametreleri, damlacık şekli, koruyucu gaz ve dış basınç, bunların tümü kaynak sonucunu etkilemektedir. Al alaşımlarındaki hidrojen içeriği bir eşik seviyesinden düşük olduğunda gözeneklilik oluşmaz. Eşik seviyesi, hidrojen çözünürlüğündeki farklılıklar nedeniyle farklı Al alaşımları için değişmektedir [34].

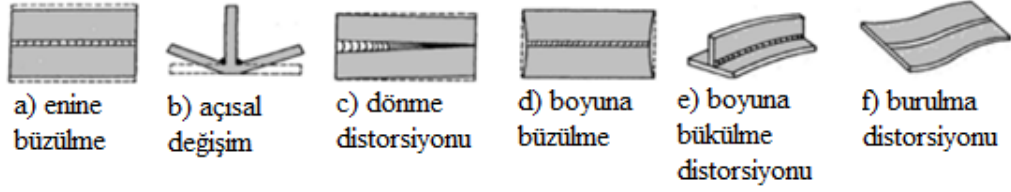
a. Gözenekliliğin azaltılması

Kaynak sırasında gözenekliliğin azaltılması, kaynak yöntemlerine, çevre ortamlarına ve kaynak malzemelerinin geometrisine bağlı olarak farklı şekillerde yapılabilir. Gözeneklilik seviyesini azaltmak koruyucu gaz olarak argon veya helyum ile sağlanabilmektedir. Bunun için yapılması gereken ilk şey, iş parçasını temizleyerek hidrojen kaynaklarını ortadan kaldırmaktır. Dolgu malzemesinin kalitesi ve saflığı da önemli bir unsurdur [35].

3.5.1.3. Deformasyon

Al, kaynaktan sonra kolayca deformasyona neden olabilen yüksek termal genleşme ve termal iletkenliğe sahiptir. Kaynak tasarımında alın bağlantıları, T-bağlantıları, bindirme bağlantıları vb. dahil olmak üzere kullanılabilen ve çeşitli bozulma türleri veren çeşitli bağlantı türleri vardır. Şekil 3.28’de görüldüğü gibi enine büzülme, açısız değişim, dönel distorsiyon, boyuna çekme, boyuna eğilme distorsiyonu ve burkulma distorsiyonu vardır. Ergitme kaynağında, ana malzemenin sıkıştırılmasından kaynak malzemesinin büzülmesi meydana gelebilir. Bu, kaynak hacmini yaklaşık %7 değiştiren katılmanın bir sonucudur. Isınan malzeme büzülür ve plastik deformasyona neden olur. Alüminyumun termal genleşme katsayısının yüksek olması sebebiyle, alüminyumun kaynağı çeliğe göre daha problemlidir [36].

Alüminyumdaki deformasyon ve sıcak çatlama aslında aynı olgunun sonucudur. Alüminyum geniş bir sıcaklık aralığına maruz kalırsa malzemedeki kolaylıkla deformasyon meydana gelebilir. Deformasyon çok yüksek olduğunda çatlama oluşmaya başlar [37].



Şekil 3.28. Çeşitli kaynak distorsiyonu türleri [37].

a. Deformasyonun etkisi

Malzemenin deformasyonu bir bozulma olarak görülebilir. Kaynaklı yapıların çarpıklıkları, tipik olarak tasarımda belirsizliğe ve yüksek üretim maliyetine yol açar. Bozulmalar, bağlantı tasarımı, kaynak işlemi ve parametreler gibi birçok şeyden etkilenebilir. Malzemenin yerel büzülmesi, deformasyona neden olabilecek gerilmelere neden olur. Büzülme gevrek kırılmaya neden olabilir. Gerilme, yorulma davranışında da değişikliğe neden olabilir.

3.5.1.4. Burkulma distorsiyonu

Çeşitli bozulma türleri Şekil 3.28'de görülebilir. Genel olarak ince levhalar kaynatıldığında, kaynak sırasında çekme gerilmeleri ve kaynak sonrası basınç gerilmeleri meydana gelir. Bu burkulma distorsiyonuna neden olur. Gerilmelerin ve sıcaklığın malzemeyi nasıl etkilediği Şekil 3.29'da görülebilir [38]. Bozulmanın büyüklüğü kaynak işleminden kaynaklanan spesifik termal ısı girdisine bağlıdır. Büzülme ve bükülme, kaynak işleminde açısız bozulmayı etkileyen ana faktörlerdir [39].

Açısız bozulma kaynağı farklı yönlerden etkilemektedir:

- Bileşenlerin termal genişmesi sıcaklık aralığı.
- Sıcaklık artışı nedeniyle akma gerilimi kaybı.
- Plastik deformasyon veya büzülme nedeniyle genişleme.
- Sıcaklık aralığına bağlı olarak soğutma işlemi sırasında bileşenlerin büzülmesi.

3.5.1.5. Kaynak gerilmeleri

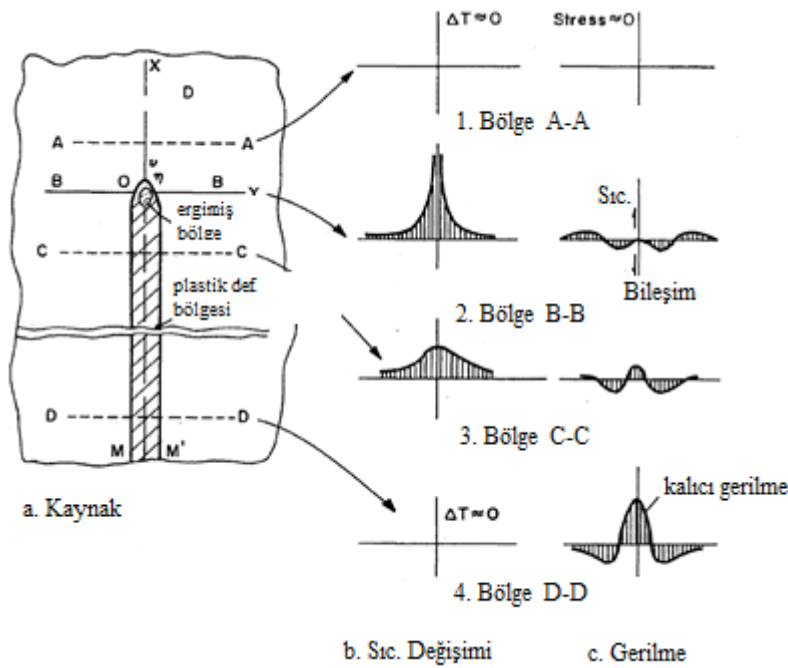
Özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımaları, kaynak yapıldığında deformasyona karşı hassastır. Kaynak sırasında ana malzeme yerel olarak neredeyse erime noktasına kadar ısıtılır ve bu da kaynakta uniform olmayan genişlemeye neden olur. Hareketli bir torç ile torcun arkasındaki malzeme soğumaya başlar ve bu da büzülmeyle neden olur. Şekil 3.29.a. X yönünde kaynak, b. kaynak bölümü boyunca sıcaklık dağılımını, bölüm A-

A kaynak arkının önündeki mesafeyi göstermektedir. Kaynak arkının neden olduğu termal gerilimler sıfırdır.

Bölüm B-B kaynak arkını gösterir. Bu bölümde sıcaklık en yüksektir ve dolgu malzemesi ark altında eritilir. Eriyen malzeme herhangi bir yük taşımaz ve kaynak arkı altındaki gerilmeler sıfırdır. Erimiş malzemenin yakınındaki alan, bu alanların genişlemesi, sıcaklıkların daha düşük olduğu çevredeki malzeme tarafından sınırlandırıldığından, her yönde bir sıkıştırma gerilimi gösterir. Basınç gerilimi çok yüksek olduğunda (kritik değeri aşıyor) ince plakalarda bir sapma deformasyonu olacaktır [40].

Bölüm C-C, soğumaya başladıklarında kaynak malzemesini ve ana malzeme alanını gösterir. Kaynağın yakınındaki alanda çekme gerilmeleri oluşturmaktadır.

D-D kesiti, kesit boyunca gerilim dağılımlarını göstermektedir [37].



Şekil 3.29. Kaynak sırasında sıcaklıklardaki ve termal gerilimlerdeki değişikliklerin şematik gösterimi [37].

3.5.1.6. Deformasyonun azalması

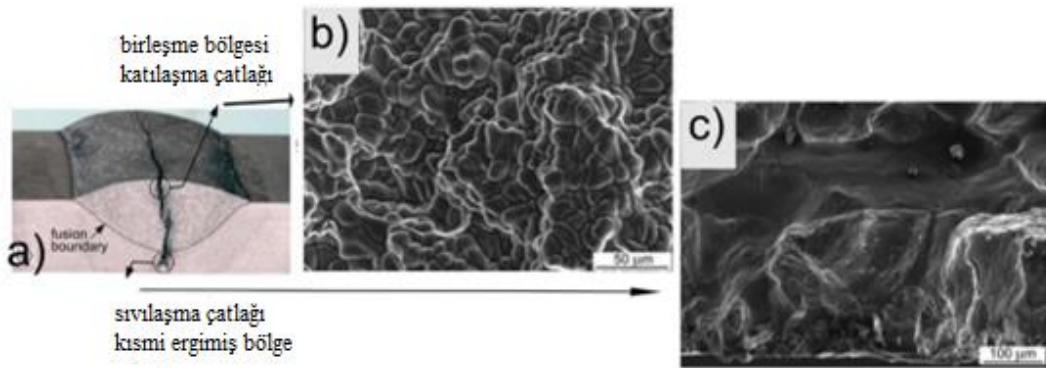
Büzülme seviyesi esas olarak malzeme kalınlığına, kaynak yöntemine, bağlantı hazırlığına ve ısı girdisine bağlıdır.

Büzülmeyi önlemek için ilk adım birleştirme tasarımı hakkında düşündürmektir. V-bağlantısında daha fazla kaynak malzemesi (erimiş malzeme) olduğu için büzülme, I-

bağlantısından çok daha yüksektir. Malzemedeki deformasyonu en aza indirmek için genel olarak düşük ısı girdisi kullanılmalıdır. Kaynak hızı mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. MIG kaynağı bu açıdan TIG kaynağından daha iyidir [36]. Bileşenin geometrisine büyük ölçüde bağlı olmasına rağmen; bozulmayı en aza indirmek için kaynak simetrik bir şekilde yapılmalıdır.

3.5.1.7. Çatlak

Nispeten yüksek termal genişleme katsayıları, büyük katılma büzülmesi ve geniş katılma sıcaklık aralığı nedeniyle birçok Al alaşımının kaynak sırasında sıcak çatlamaya duyarlı olduğu bilinmektedir. Sıcak çatlama, alüminyum kaynağındaki hemen hemen tüm çatlamların kaynağıdır. Al kaynağı sırasında birleşme bölgesinde katılma çatlama ve kısmen erimiş bölgede sıvılaşma çatlama olarak iki ana tip sıcak çatlama vardır. Kaynak malzemesinde tipik bir sıcak çatlak görüntüsü Şekil 3.30'daki gibidir.



Şekil 3.30. Kaynak malzemesinde tipik bir sıcak çatlak. AA6061'in kısmi nüfuziyetli kaynağı: a) kaynak enine kesiti, b) katılma çatlama, dendritik kırılma yüzeyi, c) sıvılaşma çatlama, kırılma yüzeyi [41].

a. Katılma Çatlama

Katılma çatlama genellikle füzyon bölgesine yakın katı-sıvı ara yüzeyinde görülebilir. Katılma çatlama, dendritlerin neredeyse tamamen tanelere dönüştüğü katılmanın son aşaması sırasında meydana gelir. Dendritler veya hücresel dendritler birbirinden ayrılır. Bu aşamada metal zayıflar ve çekme gerilmelerine nedeniyle çatlaklar ortaya çıkar.

Katılma çatlama etkileyebilecek birkaç faktör vardır;

- Katılma sıcaklık aralığı (mikrosegregasyonların oluşumunu etkilemektedir).

- Katılaşmanın son adımındaki sıvının miktarı ve dağılımı (mikrosegregasyonu etkilemektedir).
- Birincil katılaşma aşaması.
- Tane sınırı yüzey gerilimi.
- Tane yapısı.
- Katılaşan kaynak malzemesinin sünekliği.
- Kaynak malzemesinin büzülme eğilimi [31].

b. Sıvı hal çatlak

Sıvılaşma çatlama kaynağı kenarı çatlama, ana metal çatlama, ısıdan etkilenen bölge çatlama gibi birçok adı vardır. Ana metal çatlama, çatlamanın nerede meydana geldiğini açıklayan uygun bir isimdir.

Isı ötektik sıcaklığın üzerinde olduğunda, tane sınırları boyunca sıvılaşma çatlama meydana gelir. Al alaşımlarının yüksek termal genişlemeye sahip olması katılaşma sırasında çatlaklara yol açma eğiliminde olan yüksek çekme gerilmelerine neden olur [41].

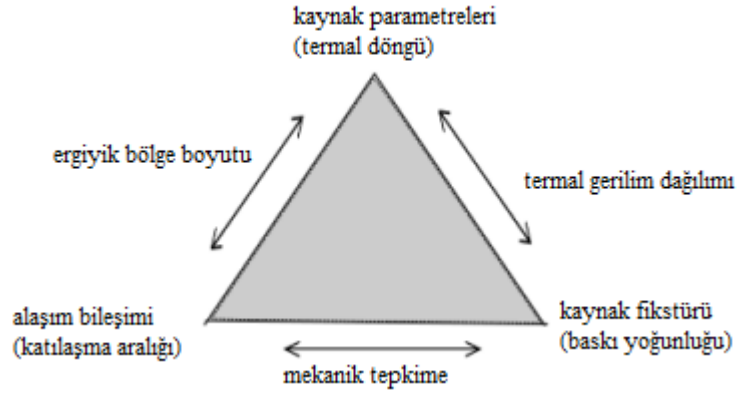
Sıvılaşma çatlama hassasiyeti; sıcaklık aralığından, temel malzeme bileşiminden ve yapı tasarımının türünden etkilenir. Artan soğutma sıcaklığı aralığı ile sıvılaşma çatlama duyarlılığı artmaktadır. Örneğin; AA7075 alaşımı, katılaşma sıcaklık aralığında AA6061' den daha yüksek bir sıvı miktarına sahiptir ve bu nedenle AA7075 alaşımı, sıvılaşma çatlama bakımından daha risklidir [42].

Kaynak malzemesinin bileşimi, temel malzeme ile dolgu malzemesinin karışımından meydana gelir. Seyreltme oranı, erimiş malzemedeki dolgu malzemesi ve temel malzemenin bir karışım seviyesidir. AA6061 alaşımının AA5356 (Al-Mg) dolgu malzemesi ile yüksek seyreltme oranında MIG/MAG kaynağı, sıvılaşma çatlama neden olabilir. Ancak dolgu malzemesi AA4043 (Al-Si) ile değiştirilirse çatlama riski azalabilir. Bu, ana malzeme ve dolgu malzemesinin sıvılaşma çatlama için bir öneme sahip olduğu anlamına gelir ve silisyumun yüksek seyreltme oranının magnezyumdan daha iyi olduğu görülebilir [43].

c. Çatlak etkisi

Çatlama, malzemedeki sertlik, akma dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerden etkilenir. Malzemedeki deformasyon çatlamanın başlangıcı olabilir ve

deformasyon çok yüksek olduğunda malzeme çatlak. Çatlamlar kaynak parametreleri, alaşım bileşimi ve kaynak fikstüründen etkilenir. Kaynak sırasında çatlak, kaynak havuzundaki peltemsi bölge sonundaki tane sınırında meydana gelme eğilimindedir. Peltemsi bölge, alaşımların faz diyagramında katı-sıvı denge bölgesidir. Şekil 3.31 kaynak sırasında oluşan sıcaklık gradyanları tarafından yönlendirilen metalurjik ve mekanik faktörler arasındaki karmaşık bir etkileşimi göstermektedir [44].



Şekil 3.31. Kaynakta katılma çatlamasını etkileyen proses parametreleri arasındaki etkileşimi gösteren diyagram [44].

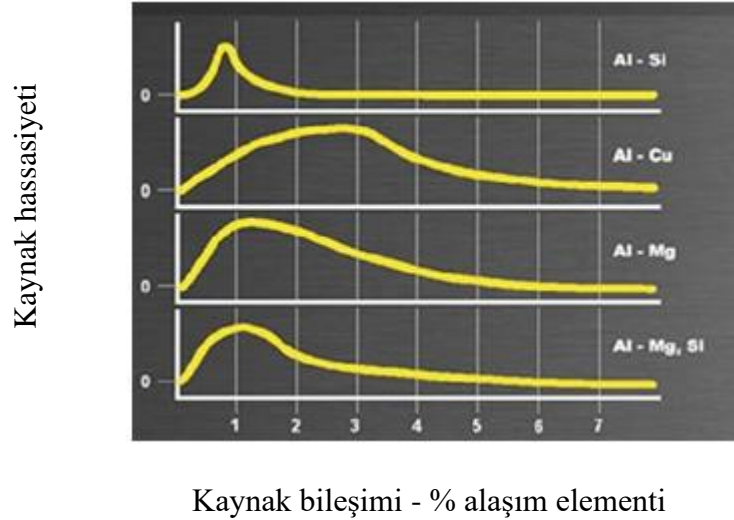
d. Çatlamanın azaltılması

Çatlamayı azaltmak için önemli faktörler şunlardır:

- Uygun bir dolgu malzemesi.
- Temel malzemenin katılma noktasına yakın veya altında katılma noktası olan dolgu malzemesini seçimi.
- Tane inceltici olarak işlev gördüklerinden, örneğin; titanyum veya zirkonyum içerikli alaşım gibi çatlamaı önleyebilecek dolgu malzemesi seçimi.
- Kaynak malzemesinde ince taneli yapı oluşumu.
- Kalıntı gerilimi en aza indiren tekniklerin seçimi.
- Kaynak sırasında çatlama mekanizmasını önlemek için kaynak bağlantısına basınç kuvveti uygulanması.

Kaynaklı Al alaşımlarında sıcak çatlamaı etkileyebilecek üç faktör vardır. Bunlar: alaşım kimyası, dolgu malzemesi ve bağlantı tasarımıdır. Örneğin; temel malzeme bileşimi dolgu malzemesi bileşimine yakın kalırsa, 6xxx alaşımları çatlamaı karşı çok hassastır. AA6xxx alaşımlarında, kaynak işlemi sırasında uygun bir dolgu malzemesinin eklenmesi çatlamaı önleyebilir. Yaygın kullanılan dolgu malzemeleri,

ağırlıkça %5 Mg içeren AA5356 ve ağırlıkça %5 Si içeren AA4043'tür. Bu, Şekil 3.32'de dolgu malzemesi ilavesiyle ana malzemenin çatlama hassasiyetinin nasıl azaltılabileceği görülmektedir. Ancak AA4043 dolgu malzemesi silisyum içerdiğinden koyu kaynak malzemesi vermesi nedeniyle kaynak sonrası renklenme sorunu yaşamaktadır. Koyu renk aralığı, içinde ne kadar Si olduğuna bağlıdır [36].



Şekil 3.32. Dört farklı alaşım ilavesinin alüminyumun çatlak duyarlılığı üzerindeki etkileri [36].

Katılaşma çatlamasını önlemek için başka bir teknik de Al üzerine ince bir Ni tabakası kaplamaktır. Ancak bu kaplama işleminden kaynaklanan hidrojen gözenekliliğinin oluşması nedeniyle imalat sırasında bir sorun oluşturabilir. Aynı zamanda oldukça pahalı bir işlemdir [41].

3.5.1.8. Korozyon

Korozyon, malzeme ömrü boyunca çok sayıda ve agresif bir şekilde gelişen süreci tanımlamaktadır. Al, daha fazla oksidasyonu önleyen ince ve etkili bir oksit tabakası ile kaplandığı için çoğu ortamda iyi bir korozyon direncine sahiptir. Oksit tabakası mekanik olarak hasar görürse, anında yeni bir oksit tabakasına dönüşür. En önemli korozyon riski, korozyonun başlaması için uygun bir ortam olan katılaşma çatlaklarıdır. Füzyon kaynağı Al alaşımlarının mikro yapısını etkiler ve kısmen korozyon direncini azaltan kaba taneli bir yapı ile sonuçlanır. Alüminyumda üç yaygın korozyon türü vardır; bunlar galvanik korozyon, çukur korozyonu ve aralık korozyonudur [36].

3.6. Kaynak Sonrası Mukavemet

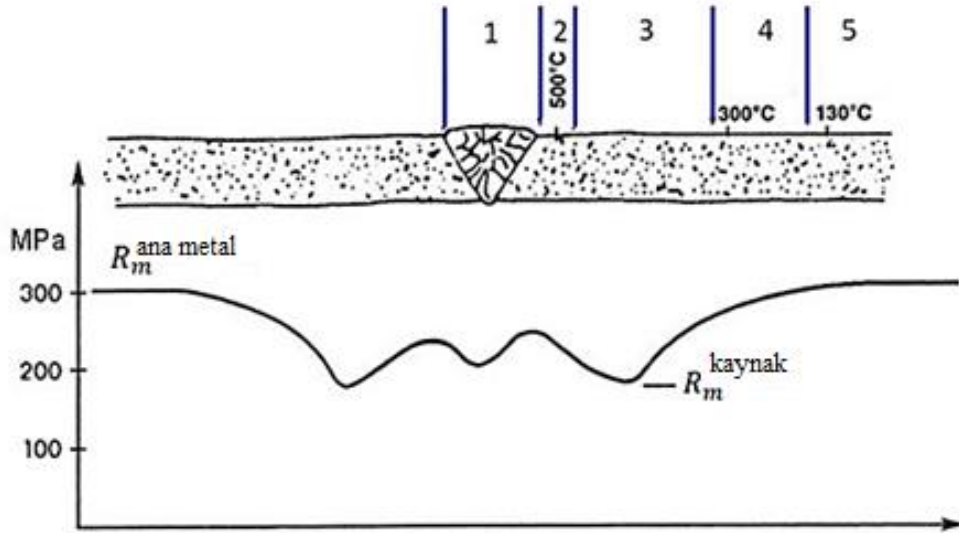
Kaynaktan gelen ısı her zaman Al alaşımlarının mikroyapısını etkilemektedir. Mikroyapı soğuma hızına bağlı olarak değişir. Şekil 3.33 sertleştirilebilir alaşımların kaynak dikişinden uzaklığa göre mukavemetin nasıl değiştiğini şematik olarak göstermektedir. Tablo 3.4'te kaynak öncesi ve sonrası tipik çekme dayanımı değerleri gösterilmektedir. Yumuşak tavlama bölgesinde malzeme, ısı işlem nedeniyle minimum dayanıma sahiptir [36].

Isıl işlem görmeyen alaşımların (AA1xxx, AA3xxx, AA5xxx alaşımları) ergitme kaynağından sonra yumuşak tavllanmış bölgedeki kaynak plakasının dayanımı, ana malzeme ile hemen hemen aynı seviyededir. Isıl işlem görebilen alaşımların (AA2xxx, AA6xxx, AA7xxx alaşımları) tamamen sertleştirilmiş durumda (T6) kaynak yapıldığında, ITAB bölgesinde düşük bir mukavemet gözlenmektedir. ITAB'da malzeme, temel malzemeye göre zayıftır. Eritme kaynağında kaynak malzemesi genellikle ana malzemedен daha zayıftır. Kaynak malzemesi, taban/dolgu malzemesinin bileşim oranına ve kaynak dikişinin geometrisine bağlı olarak ITAB'dan daha zayıf veya daha güçlü olabilir [45]. Kaynak malzemesinin çekme mukavemeti denklem 3.1'deki gibi r faktörü ile tanımlanabilir.

$R_{m\text{kaynak}}$ = kaynak sonrası malzemenin minimum çekme mukavemeti.

$R_{m\text{ana metal}}$ = malzemenin kaynak öncesi gerilme mukavemeti.

$$r = \frac{R_{m\text{ kaynak}}}{R_{m\text{ ana metal}}} \quad (3.1)$$



Şekil 3.33. Sertleştirilebilir bir alaşımda ısıdan etkilenen bölgelerin kaynak boyunca enine kesiti 1) Kaynak bölgesi (katılaşma yapısı), 2) Çözeltiyeye alma işlemi uygulanmış bölge, 3) Yumuşak tavllanmış bölge, 4) Yaşlandırılmış bölge, 5) Etkilenmemiş bölge [36].

3.6.1. Mukavemeti azaltan etkenler

Genel olarak ana malzeme, kaynak yapılan alanda bir mukavemet azalmasına sahiptir. Malzemenin ne kadar etkilendiği kaynak yöntemine, temel ve dolgu malzemelerine bağlıdır. Malzemelerin mukavemeti, akma mukavemeti, nihai çekme mukavemeti, uzama, yorulma mukavemeti, vickers sertliği ve kesit alanında azalma gibi ölçülerle ifade edilir. Akma mukavemeti ve nihai gerilme mukavemeti genellikle ITAB ve kaynaklı alanda azalır. Sertlik kaynak bölgesinde düşüktür ve ITAB'daki sertlik ana malzemeye göre daha düşüktür.

Kaynak bölgesindeki dayanımın neden daha zayıf olduğu şunlara bağlıdır:

- Kaynak bölgesindeki mikro yapı ana malzemedan farklıdır. Örneğin, MIG/MAG ve TIG kaynağının birleşme bölgesinde, dikiş kaynağı dendritik yapı içerir ve bu, erimiş malzemenin hızlı ısınması ve hızlı soğuması nedeniyledir. MIG/MAG ve TIG kaynağı arasındaki fark, dendritlerin boyutudur. MIG/MAG kaynağında dendritler TIG kaynağından daha geniştir.
- Kaynak dikişi tane sınırlarında daha fazla çökelti oluşumuna ve iri tanelere sahiptir. Bu nedenle tane sınırlarında taneler arası bir kırılma kolayca meydana gelmektedir.
- Kaynak malzemesi kaynaktan sonra daha az sünek olma eğilimindedir [36].

Tablo 3.4. Farklı yöntemlerle yapılan kaynak öncesi ve sonrası ana metallerin mukavemet değerleri. MIG/MAG, FSW=Sürtünme karıştırma kaynağı, EBM= Elektron ışın kaynağı, TIG [36].

Ana malzeme ve kaynak metodu	Akma dayanımı (MPa)	Nihai çekme mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Kesit daralması (%)
AA2219	390	470	15	10.5
TIG	220	242	8.8	6.2
FSW	305	342	12.2	8.6
EBW	265	304	10.4	7.5
AA6061	302	335	18	12.24
MIG/MAG	141	163	8.4	5.8
TIG	188	211	11.8	8.25
FSW	224	248	14.2	9.56
AA7075	537	570	-	-
MIG/MAG	110	118	-	-

3.7. Kaynak Sonrası Kontrol

Kaynak kalitesini kontrol etmek için genellikle kaynaklı malzemenin kontrolü yapılır. Kontrol, tahribatlı veya tahribatsız muayene şeklinde olabilir. Geleneksel tahribatlı muayene teknikleri; kopma testi, eğilme testi, sertlik testi, çekme testini içerir. Tahribatsız muayene teknikleri ise; mikroskop kullanarak veya kullanmadan görsel muayeneler, sıvı penetrant muayenesi, radyografik muayene, ultrasonik muayene ve manyetik muayene testidir [46].

4. KAYNAKLI İMALATTA TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Tahribatlı ve/veya tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak kaynak muayenesi yapılabilmektedir.

Tahribatlı kaynak testi, tamamlanmış kaynağın özelliklerini değerlendirmek için malzemenin fiziksel olarak tahrip edilmesini içeren bir kaynak test tekniğidir.

Tahribatsız muayene, parça veya sistemin servis şartlarını bozmadan malzemedeki süreksizlikleri veya özelliklerdeki farklılıkları belirlemek için muayene, test veya değerlendirme sürecidir.

4.1. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene, bir ürünün kalite kontrol sürecinde önemli bir rol oynamaktadır.

Bir ürünün imalatının tüm aşamalarında kullanılır ve

- a. Ürünün yapımında kullanılan hammaddelerde,
- b. Ürünü imal ederken,
- c. Hizmete sunulmadan önce bitmiş üründe malzemenin kalitesini izlemek için kullanılır.

Tahribatsız muayenenin üretimin tüm aşamalarında kullanılmasının faydaları:

- a. Çalışma sırasında ürünün güvenliğini ve güvenilirliğini artırır.
- b. Hurdayı azaltarak malzeme, işçilik ve enerji tasarrufu sağlayarak ürünün maliyetini düşürür.
- c. Üreticinin kaliteli mal üreticisi olarak itibarını artırır.
- d. Yeni ürünlerin tasarlanmasını sağlar.

En yaygın tahribatsız muayene türleri şu şekilde listelenebilir;

- a. Görsel Test (VT)
- b. Manyetik Parçacık Testi (MT)

- c. Penetrant Testi (PT)
- d. Ultrasonik Test (UT)
- e. Radyografik Test (RT)

4.1.1. Gözle muayene yöntemi

Görsel test, kaynakta yüzey süreksizliklerini belirlemek için gözle veya yardımcı bir ekipman kullanarak yapılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Prosedürlerin takip edilmesini ve hataların erken tespit edilmesini sağlamaktadır.

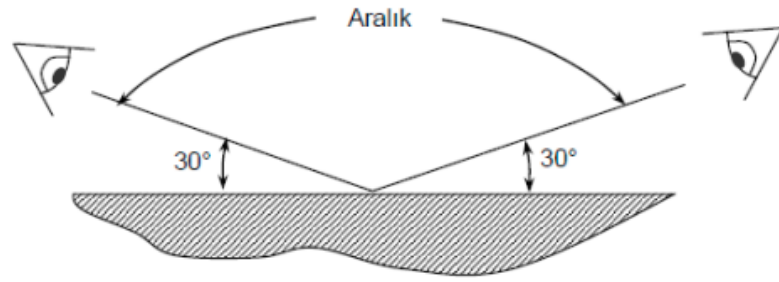
Bir kaynaklı parçanın üretim döngüsü boyunca görsel inceleme yapılır. Genel olarak, görsel inceleme üç kategoriye ayrılabilir:

- a. Kaynak öncesi görsel incelemeler: çizimler, malzeme özellikleri, kenar hazırlığı, ölçümler, kaynak bağlantısı temizliği vb.
- b. Kaynak sırasında görsel inceleme: kaynak işlemi, elektrot seçimi, çalışma koşulları, ön ısıtma gereksinimleri, kaynakçı performansı vb. tümü kaynak işlemi sırasında görsel olarak incelenir.
- c. Kaynak boyutu (kaynak ölçüleri kullanılarak), kusurlar (yüzey çatlakları, krater çatlakları, yüzey gözenekliliği, eksik kök penetrasyonu, eksik dolgu), eğrilme, ana metal kusurları ve tamamlanmış kaynağın diğer görsel incelemeleri.

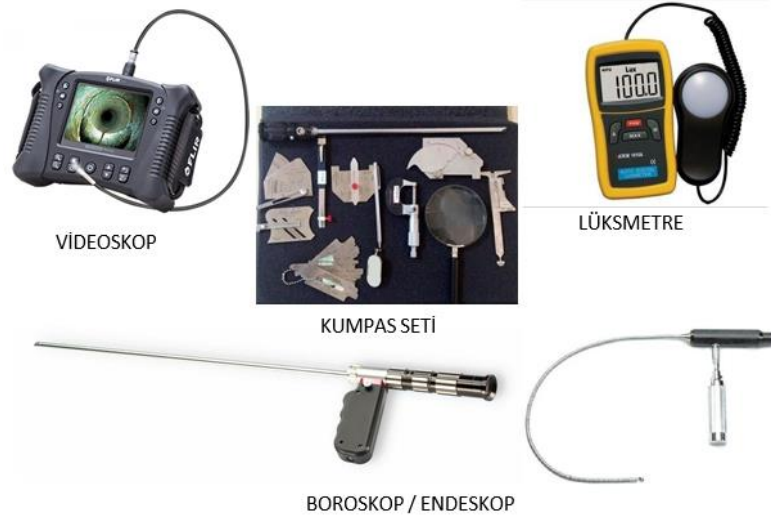
Görsel testler, test yüzeyinin yeterli şekilde aydınlatılmasını ve test cihazının uygun şekilde görülmesini gerektirir. En etkili görsel test için diğer eğitimlerin yanı sıra ürün ve süreç, beklenen hizmet koşulları, kabul kriterleri, kayıt tutma bilgisi gerekir. Görsel test uygulamaları şunları içerir [47] :

- a. Bileşenin yüzey durumunun kontrol edilmesi.
- b. Kaynak dağılımının kontrol edilmesi.
- c. Eşleşen yüzeylerin hizalanmasının kontrolü.
- d. Bileşenin şeklinin kontrol edilmesi.
- e. Sızıntı veya sızıntı kanıtının kontrol edilmesi.
- f. Kaynakta cüruf bulunmadığının kontrol edilmesi.
- g. İç yan kusurları ve gözenekliliği kontrol etme.

TS EN 13018 (Genel Kurallar) standardına göre, genel gözle muayene için en az 160 lux, yerel gözle muayene için en az 500 lux aydınlatma gerekmektedir. TS EN ISO 17637 (Kaynaklar için Genel Kurallar) standardına göre muayene yüzeyinin aydınlanma şiddeti en az 350 lüks olmalıdır; ancak bu değerin 500 lüks olması tavsiye edilmektedir. Doğrudan muayene yapılırken, muayene yüzeyi ile göz arasındaki mesafe 600 mm'yi geçmemiş olması gerekmektedir. Dolaylı gözle muayenede bu şart gözetmeksizin muayene yapılabilmektedir. Muayene açısı Şekil 4.1'de gösterildiği gibi olmalıdır. Gözle muayenede kullanılan ekipmanlar Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Muayene açısı [48].



Şekil 4.2. Gözle muayenede kullanılan ekipmanlar [48].

Avantajları :

- Ucuz ve hızlıdır (genellikle sadece işçilik gideri).
- Düşük maliyetli ekipman.
- Güç gereksinimi yok.

d. Erken fark edilmeyen sorunlar nedeniyle kusurların ve sonraki onarım maliyetlerinin hızlı tespiti.

Dezavantajları :

- a. Uzman eğitimi gereklidir.
- b. İyi görme yetisi gerektirir.
- c. İç kusurları görmek mümkün değildir.
- d. Rapor uzman tarafından kaydedilmelidir.
- e. İnsan hatasına açıktır.

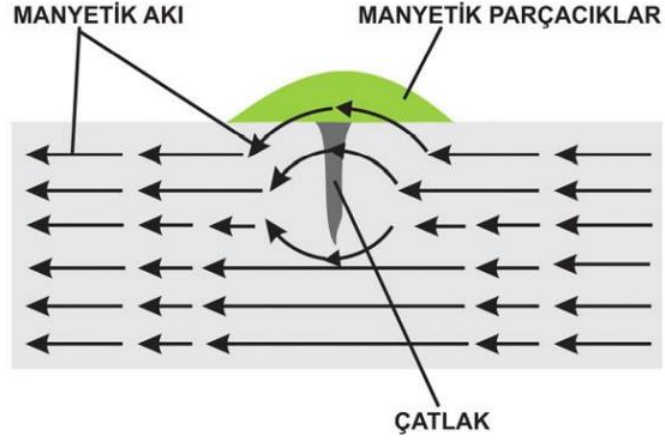
4.1.2. Manyetik parçacık muayenesi

Manyetik parçacık testi, ferromanyetik parçacık uygulaması ile doğru manyetizasyon yöntemlerini kullanarak, çelik metal ve manyetik alaşımların yüzeyinde veya yüzeyin yakınında kusuru bulmak için hızlı bir yöntemdir.

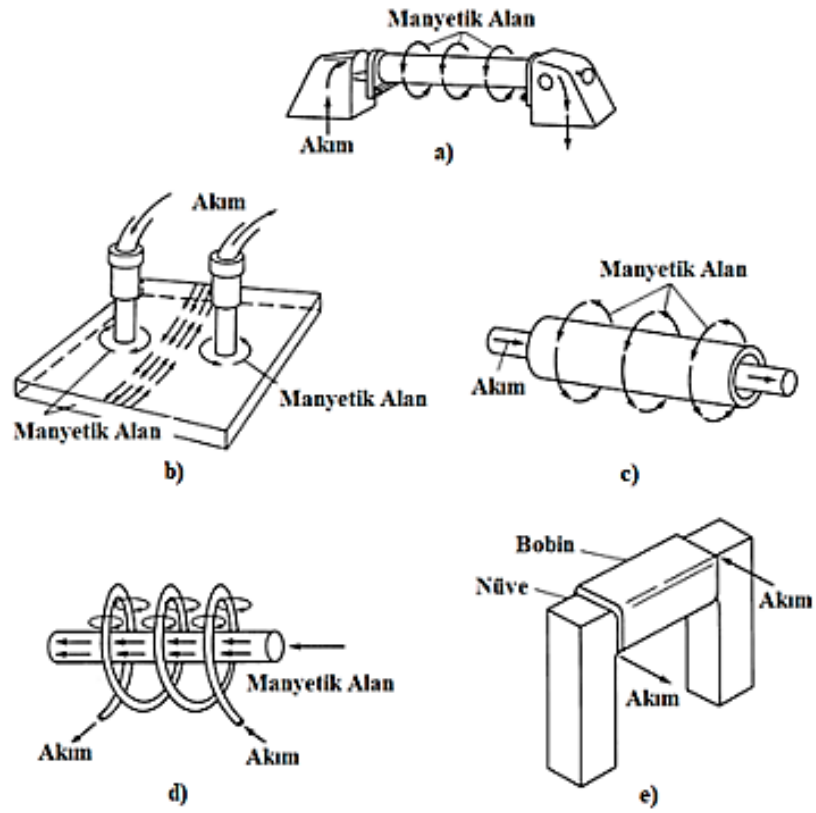
Yöntem iki prensibe dayanmaktadır:

- a. Bir metalden elektrik akımı geçtiğinde bir manyetik alan üretilir.
- b. Manyetik alanların bozulduğu veya yön değiştirdiği yüzeyde minik kutuplar oluşur.

Ferromanyetik malzeme, manyetize parçanın yakınına getirildiğinde, doğası gereği bu kutuplara güçlü bir şekilde çekilir ve orada sıkıca tutulur ve görünür bir işaret oluşturur. Mıknatısların yalnızca kuvvet çizgilerinin mıknatısa kutuplardan girip çıktığı yerlerde malzemeleri çekeceğini unutmamak önemlidir. Bir mıknatıs bükülürse ve iki kutup kapalı bir döngü oluşturacak şekilde birleştirilirse dış kutuplar olmayacak ve sonuç olarak manyetik malzemeyi çekiciliği olmayacaktır. Bu, manyetik parçacık testinin temel ilkesidir [47]. Manyetik ve kaçak akı şematik gösterimi Şekil 4.3'te, farklı manyetizasyon yöntemleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Manyetik ve kaçak akı şematik gösterimi [48].



Şekil 4.4. Farklı manyetizasyon yöntemleri a), b) ve c) dairesel manyetizasyon; d) ve e) boyuna manyetizasyon [48].

Avantajları :

- Operasyon ve uygulama kolaydır.
- Çok sıkı bir ön temizleme işlemi gerektirmez.
- Ferromanyetik malzemedeki ince, sığ yüzey çatlaklarının tespiti için en iyi yöntemdir.

- d. İnce kaplama ile çalışabilir (50 mikrona kadar).
- e. Karmaşık geometrilerin incelenmesi mümkündür.
- f. Taşınabilir bir yöntemdir.

Dezavantajları :

- a. Bu test sadece demir, nikel, kobalt ve diğer bazı alaşımlar gibi ferromanyetik malzemelerde kullanılabilir. Alüminyum, magnezyum gibi çoğu demir dışı malzemeleri ve paslanmaz çeliği inceleyemez.
- b. Yüzey veya yüzeye yakın kusurlarla sınırlıdır.
- c. Manyetik alanın yönü ve gücü önemlidir. Uzunlamasına ve çevresel olarak iki kez mıknatıslanmaya ihtiyaç vardır.
- d. Bazen büyük akımlar gerekir ve test parçalarının yanması bir olasılıktır.
- e. Test sırasında manyetize edilen ferromanyetik parçalar, belirli bir miktarda artık manyetizma tutabilir. Test nesnesi testten sonra demanyetize edilmelidir.

4.1.3. Sıvı penetrant muayenesi

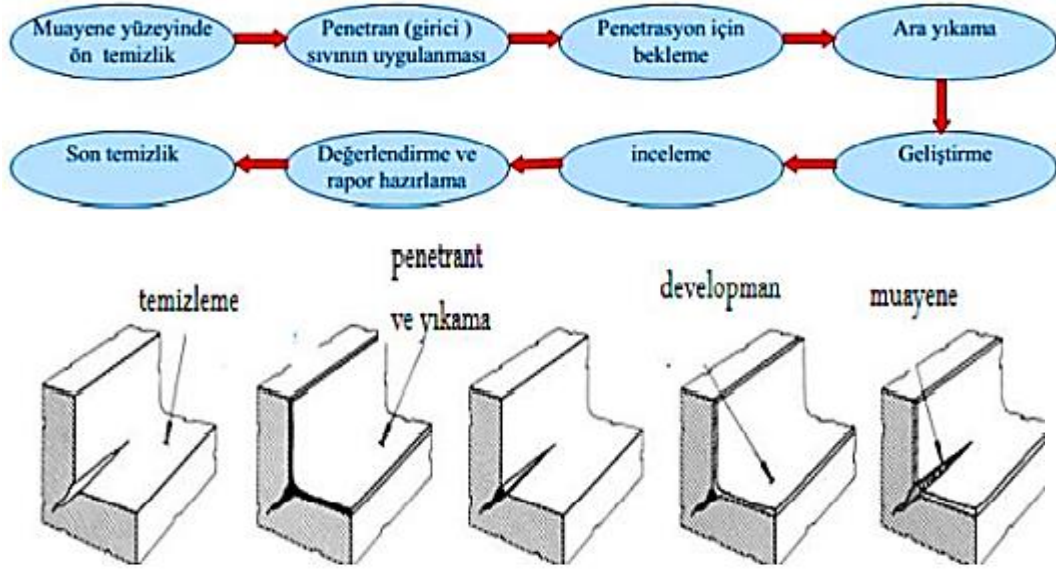
Sıvı penetrant testi, malzemelerdeki veya kaynak yüzeyindeki küçük sızıntıları, çatlakları, gözenekleri ve süreksizliği tespit etmek için tasarlanmıştır. Alüminyum ve çelik gibi malzemeler için her tür kaynaktan sızıntı olup olmadığını tespit etmek için kullanılan bir test yöntemidir.

Bu prosedürde, önceden belirlenmiş bir süre boyunca ürün yüzeyine sıvı nüfuz edici bir boya püskürtülür. Penetran daha sonra kılcal etki yoluyla en küçük çatlaklara veya gözeneklere sürünerek girer. Basınç gerekliliği yoktur. Yüzey kurduktan sonra, kusurda kalan penetrantı emen ve konumu, boyutu ve türü de dahil olmak üzere tüm kusurları gösteren bir geliştirici uygulanır.

Sıvı penetrant testi, görünür ışık veya floresan aydınlatma ortamında yapılır.

- a. Görünür penetrant muayenesi için, yüzeye genellikle parlak kırmızı renkli bir boya ve beyaz geliştirici uygulanır. Son muayene düzenli ışık altında yapılır ve sahada rahatlıkla kullanılır.
- b. Floresan incelemesi için, UV ışığı veya karanlık koşullar altında görünür ışık yayan bir ultraviyole floresan boya kullanılır. Bağlantının bir tarafına bir floresan penetrant

uygulanır ve kaynağın karşı tarafında sızıntı olup olmadığını kontrol etmek için taşınabilir bir UV ışığı kullanılır. Görünür boyadan daha fazla kontrast sağlar [47]. Penetrant testi işlemi Şekil 4.5'teki sıra izlenerek yapılır.



Şekil 4.5. Penetrant testi işlem sırası [48].

Avantajları :

- Düşük maliyetlidir.
- Süreç ve yorumlanması kolaydır.
- İnce, sıkı süreksizliklere karşı oldukça hassastır.
- Çok fazla eğitim gerekli değildir.
- Demir ve demir dışı metaller için kullanılır. Demir dışı metallerde yüzey çatlakları tespiti için en iyi yöntemdir.

Dezavantajları :

- Yalnızca yüzey süreksizliklerini algılar. Yüzeyin altındaki sorunu atlayabilir.
- Çok pürüzlü veya kırılğan yüzeylerde çalışmaz.
- Testi takiben tüm penetrant malzemelerin çıkarılması genellikle gereklidir.
- Önemli miktarda sarf malzemesi kullanır.
- Kalıcı kayıt üretmenin daha kolay bir yöntemi yoktur.

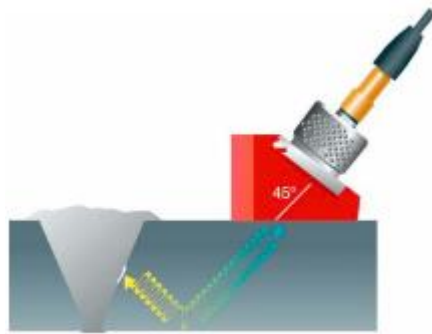
4.1.4. Ultrasonik muayene

Ultrasonik test, bir bileşenin içinin görülmesini sağlar. Döküm veya malzemenin içindeki çatlaklar ve gözenekler gibi kusurları tespit etmek için kullanılır. Bu yöntem, işitilebilir aralıktan çok daha yüksek olan yüksek frekanslı ses dalgalarının yansımalarını ve iletimini kullanır ve daha sonra bu dalgalar muayene için kaynak parçasından geçirilir. Süreksizliklerin varlığı ve konumu, yansıyan ışının algılanması ve analiz edilmesiyle belirlenir.

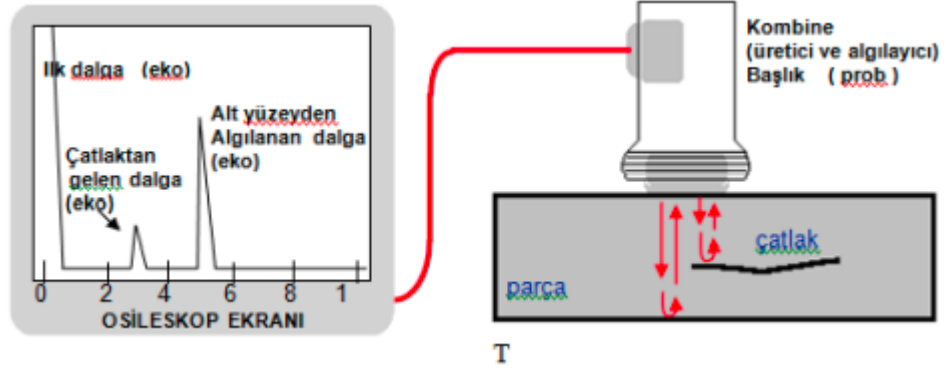
Sistem, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir dönüştürücü kullanır. Dönüştürücü, bir kristalin mekanik olarak titreşmesine neden olan yüksek frekanslı bir voltaj tarafından uyarılır. Kristal prob bir bileşenin yüzeyi üzerinde hareket ettirilir ve onun tarafından yayılan ultrasonik dalgalar veya yansımaları bir katod ışınli osiloskopun ekranında izlenir. Ultrasonik dalgaların darbesi, test parçasında bir süreksizliğe çarptığında, başlangıç noktasına yansır. Dönüştürücü, yansıyan enerji için bir alıcı görevi görür.

Daha kolay yorumlamaya izin veren bir aşamalı dizi görüntüleme testi de gerçekleştirilebilir. Hem düzlemsel hem de hacimli kusurlar incelenebilir. Yüzey kusurları durumunda genellikle radyografik testten üstündür [47]. Propla kaynaklı parçanın hata tespiti Şekil 4.6’da, osiloskop ekranı ve kontrol edilen parça Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

Bu test yöntemi, ferromanyetik ve demir dışı malzemelerdeki iç kusurları bulmak için kullanılabilir. Bu teknik, malzeme kalınlığını ve malzemelerin mekanik özelliklerini ve tane yapısını belirlemek için de uygulanabilir.



Şekil 4.6. Propla kaynaklı parçanın hata tespiti [49].



Şekil 4.7. Osiloskop ekranı ve kontrol edilen parça [49].

Avantajları :

- Küçük kusurlarda bile yüksek hassasiyete sahiptir ve kusurların yerinin ve boyutunun kesin olarak belirlenmesine olanak tanır.
- Radyografiden daha fazla nüfuz etme kabiliyetine sahiptir ve test nesnesindeki hataları daha derin bir seviyede (yaklaşık 7 metre derinliğe kadar) bulabilir.
- Kusur konumu ve boyutu için yüksek bir ölçüm doğruluğuna sahiptir.
- Hızlı ve otomatik denetime izin veren hızlı tepkiye sahiptir.
- Numunenin yalnızca bir yüzeyine erişmesi gerekir.

Dezavantajları :

- Yüksek operatör becerisi gerektirir.
- İyi yüzey kalitesi gereklidir.
- Kusur tanımlama gereklidir.
- Kalıcı kayıt yoktur.
- Kalibrasyon gereklidir.
- Test nesnesinin uygun olmayan geometrisi, inceleme sırasında sorunlara neden olur.
- İri taneli mikro yapıya sahip malzemelerin muayenesi zordur.

4.1.5. Radyografik muayene

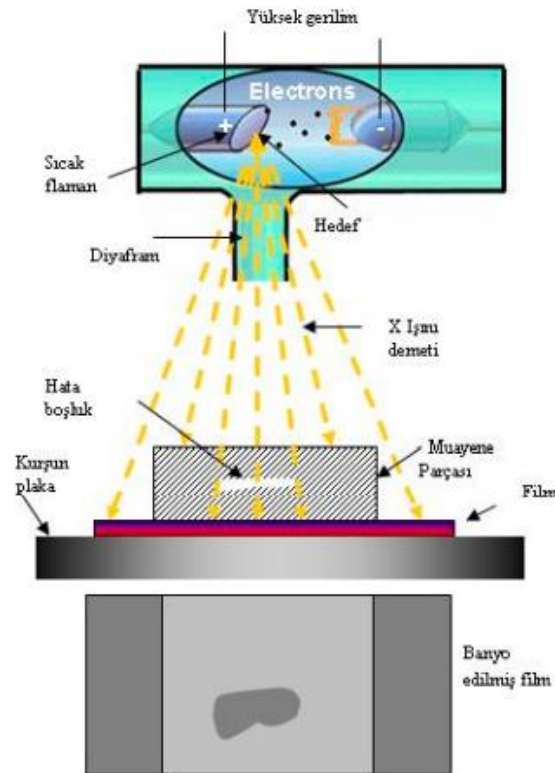
Radyografik test, bir bileşenin içinin görüntülenmesini sağlayan bir görüntüleme test yöntemini ifade eder. Radyografik X-ışınlarını kullanır ve bu ışınlar kaynağın içinden geçer ve malzemenin arkasına yerleştirilen bir film üzerinde gölge bir resim oluşturur. Bu ışınların dalga boyu 0.001 Angstrom mertebesinde çok kısadır ve genellikle

radyoaktif bir malzeme tarafından üretilen gama ışınları (Co-60 ve Ir-192 radyoizotopları), saha ayarlarında kaynakların incelenmesi için de kullanılır.

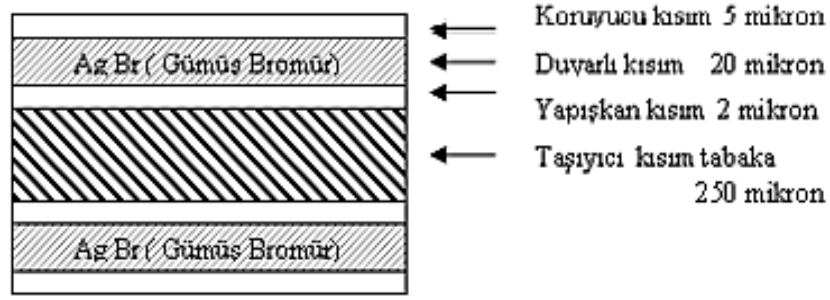
Temel nesnelerin radyografik muayenesinin temel prensibi tıbbi radyografi ile aynıdır. Test nesnesi, radyasyon kaynağı ile bir radyografik film arasına yerleştirilir. Bir miktar radyasyon, maruz kalan filme ulaşmadan önce test nesnesi tarafından emilir. Işınların metalden geçme yeteneği esas olarak metalin yoğunluğuna bağlıdır ve daha az metal yoğunluğunun olduğu yerlerde daha kolay nüfuz edebilir ve film üzerinde gölge resmin oluşmasına neden olur. Dökümdeki herhangi bir kusur kolayca gölge resimden tanımlanabilir.

a. Daha ince alanlar, daha az yoğunluğa sahip malzemeler veya daha fazla enerjiye maruz kalan alanlar radyografide daha koyu alanlar olarak görünür. Bu karanlık alanlar, kusurlar veya boşluklardır. Çünkü filme daha fazla radyasyon ulaşmayı başarmıştır.

b. Daha kalın alanlar, daha yoğun malzemeler veya daha düşük enerjiye maruz kalan alanlar, bir radyografide daha açık renkli alanlar olarak görünür [47]. Şekil 4.8’de X ışını ile yapılan muayene, Şekil 4.9’da endüstriyel bir radyografik filmin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.8. X ışını ile yapılan muayene [49].



Şekil 4.9. Endüstriyel bir radyografik filmin yapısı [49].

Avantajları :

- Her türlü malzemede kaynaklı yerlerin muayenesinde kullanılır.
- Hem yüzey hem de yüzey altı kusurlarını tespit eder.
- Kalıcı kayıt sağlar.
- Radyografin kalitesini kontrol etmek için cihazlar mevcuttur.
- Yöntem, malzeme türü veya yoğunluğu ile sınırlı değildir.

Dezavantajları :

- Radyasyon ciddi sağlık sorunlarına neden olur.
- Hacimli ekipmana sahiptir.
- Yüzey kusurları için uygun değildir.
- Nesnenin her iki tarafına da erişim gereklidir.
- Ekipmanın oryantasyonu ve kusur kritik olabilir.
- Kusur, radyasyon ışını ile ilgili olarak önemli derinlik gerektirir (düzlemsel kusurlar için iyi değildir).
- Yüzeyin altında bir kusurun derinliğine dair gösterge yoktur.
- İncelenebilecek kalınlık aralığı sınırlıdır.
- Muayenenin hassasiyeti, test nesnesinin kalınlığı ile azalır.
- Radyografların yorumlanması için önemli bir beceri gereklidir.
- Kusurun derinliği kolayca gösterilmez.
- Yavaş sonuç alınır.

4.2. Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Tahribatlı kaynak testi, adından da anlaşılacağı gibi sağlamlığını ve özelliklerini değerlendirmek için tamamlanmış bir kaynağın fiziksel olarak tahrip edilmesini içerir. Bu testler, esas olarak bir numunenin performansını veya malzemenin farklı yükler altındaki davranışını değerlendirmek için gerçekleştirilir. Bu testlerin gerçekleştirilmesi, daha fazla bilgi vermesi ve yorumlanması tahribatsız testlere göre çok daha kolaydır.

En yaygın kullanılan tahribatlı test yöntemleri:

- a. Sertlik testi.
- b. Çekme testi.
- c. Eğme testi.
- d. Darbe testi
- e. Makroyapı inceleme.
- f. Mikroyapı inceleme.

4.2.1. Sertlik testi

Malzemelerin aşınmaya, çizilmeye veya kesilmeye karşı direnç gösterme yeteneği sertlik olarak bilinir. Malzemenin kalıcı deformasyona direnme özelliğidir.

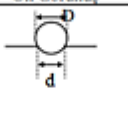

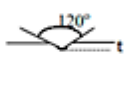

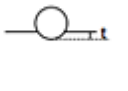

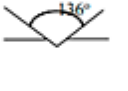

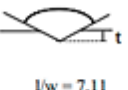

Kaynak sertlik testi taşlanmış, parlatılmış veya parlatılmış ve dağlanmış bağlantı bölgesinin bir kesiti üzerinde yapılır. Kaynak merkez hattı, dolgu yüzeyi veya kök bölgeleri, ITAB ve ana metal üzerinde girintiler oluşturmak suretiyle yapılır.

Kaynaklarda Brinell, Rockwell, Vickers ve Knoop sertlik testleri, en basit ve kolay değerlendirilebilen mekanik özelliklerden biri olan sertliği belirlemek için kullanılabilir. Sertlik testinin türü, malzemenin sertliğine, mukavemetine, kaynaklı bağlantının boyutuna göre değişir.

- a. Brinell testi, tipik olarak 2 ila 5,6 mm çapında büyük bir çöküntü oluşturur ve bu da onu büyük kaynaklar için ideal kılar.
- b. Rockwell testi, sertlik traversleri için daha uygun olan çok daha küçük bir girinti ile sonuçlanır.

c. Vickers ve Knoop testleri, nispeten küçük girintiler bırakır. Bu da onları çeşitli ITAB alanlarında ve ince ölçekli malzemelerde sertlik ölçümleri için ideal hale getirir [47]. Tablo 4.1’de sertlik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 4.1. Sertlik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması [50].

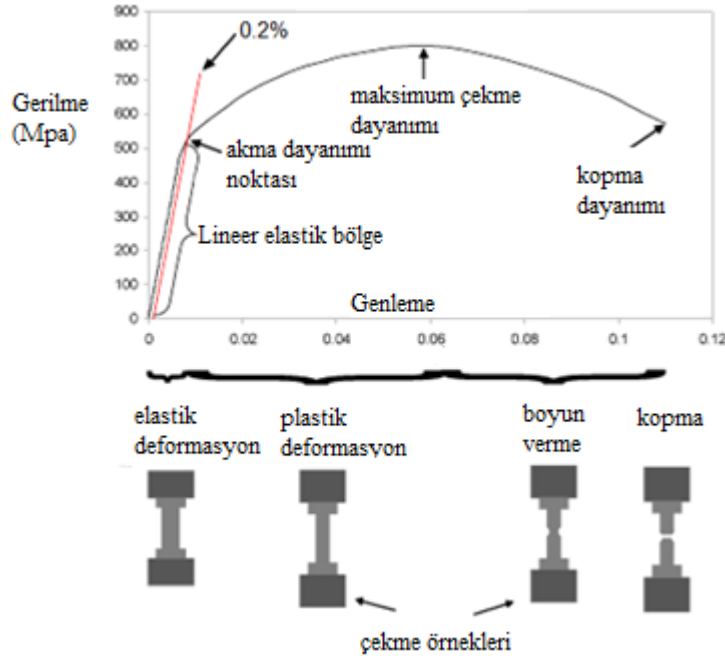
Sertlik	Simge	Batıcı Uç	İz Sekli		Yük	Sertlik Değeri Formulu	Prensip	Uygulama
			Ön Görünüş	Üst Görünüş				
Brinell	H _B	10 mm çapında çelik veya tungsten karbür bilya			500-3000 kg	$BHN = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey alanına oranı, birimi genellikle kg/mm ²	Dökme demir, çelikler ve demir dışı alaşımlar
Rockwell	A	R _A			60 kg	100-500 t	Batıcı ucun malzemeye batma derinliği	Çok sert malzemeler
	C	R _C			150 kg			
	D	R _D			100 kg			
	B	R _B	1/16 inç. Çapında çelik bilya			100 kg	130-500 t	Pirinç ve düşük mukavemetli çelikler
	F	R _F				60 kg		
	G	R _G				150 kg		
	E	R _E				100 kg		
Vickers	HV, DPH	Elmas pramit			10-30kg	$VHN = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}$	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey alanına oranı, birimi genellikle kg/mm ²	Sert malzemeler
	Knoop	KHN	Elmas pramit			25-10000 gr	$KHN = 14,2 \cdot \frac{F}{l^2}$	Uygulanan yükün, malzeme yüzeyinde oluşan izin yüzey alanına oranı, birimi genellikle kg/mm ²

4.2.2. Çekme deneyi

Çekme mukavemeti, bir metalin onu ayıran kuvvetlere dayanma kabiliyetini ifade eder. Enine çekme testi, enine çekme dayanımını, akma dayanımını, uzama gerilimini, statik yük altında bir alın bağlantı alanının azalmasını ölçmek için yapılır. Tasarımın büyük bir kısmı kaynaklı bağlantıdaki çekme özelliklerine dayandığından, ana metalin, kaynak metalinin, taban ile kaynak arasındaki bağın ve ısıdan etkilenen bölgenin çekme özelliklerinin tasarım gereksinimlerine uyması önemlidir. Nihai çekme mukavemeti, malzemelerin mekanik performanslarını belirlemede önemli bir yer tutar.

Çekme mukavemeti, bir malzemenin gerilimde dayanabileceği maksimum streştir. Başka bir deyişle, bir malzemenin kırılmadan önce dayanabileceği kesit alanı başına uygulanan yük miktarıdır. Matematiksel olarak, maksimum çekme yükünün

numunenin en küçük kesit alanına oranı olarak hesaplanır. Çekme deneyi diyagramı Şekil 4.10'da verilmiştir.



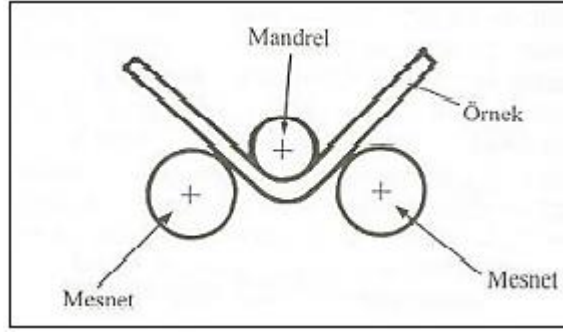
Şekil 4.10. Çekme diyagramı [47].

Tasarımın büyük bir kısmı kaynaklı bağlantının çekme özelliklerine dayanmaktadır. Ana metalin, kaynak metalinin, kök ile kaynak arasındaki bağın ve ısıdan etkilenen bölgenin çekme özellikleri tasarım gerekliliklerine uygun olmalıdır.

4.2.3. Eğme testi

Eğme testi, kaynaklı bağlantıların sünekliğini ve sağlamlığını belirlemek için kullanılır. Kaynak metalinin, ITAB'ın ve ana metalin nispi mukavemetlerinin tümü enine eğme testinde önemlidir.

Bu yöntem, bir kaynak numunesinin belirli bir bükülme yarıçapına bükülmesini içerir. İki plaka birbirine kaynaklanır ve kaynaklı plakalardan düz bir metal şerit kesilir. Daha sonra uygulanan yük, malzemeyi iç yüzeyde sıkıştırırken malzemeyi U şeklinde bükür. Amaç, kaynak ve ana metalin uygun şekilde kaynaştığından ve kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin uygun mekanik özelliklere sahip olduğundan emin olmaktır [47]. Eğme deneyi şematik gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir.

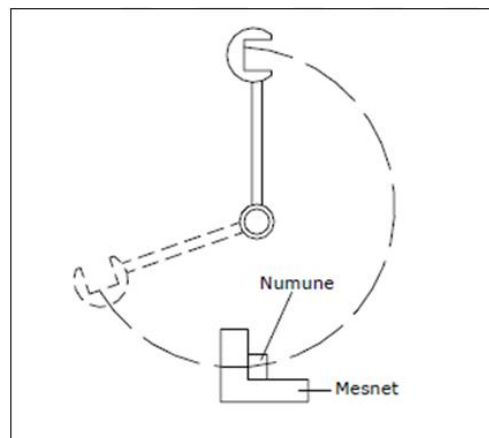


Şekil 4.11. Eğme deneyi düzeneği [51].

4.2.4. Darbe testi

Malzemelerin kırılmadan önce enerjii emme yeteneğine tokluk denir. Darbe testinin amacı, bir numunenin kırılmadan önce emeceği darbe miktarını belirlemektir. Darbe özellikleri kırılma mekaniği hesaplamalarında doğrudan kullanılsa da, darbe testleri, çentik hassasiyetini değerlendirmek ve kaynaklı parçaların bağıl tokluğunu karşılaştırmak için bir kalite kontrol yöntemi olarak kullanılmaya devam etmektedir.

Genel olarak iki tür darbe testi vardır, Charpy ve Izod. Bunlar kullanılan numunelere ve numuneleri sabitleme yöntemlerine göre farklılık gösterir; ancak her iki test de bir sarkaç test makinesi kullanılarak yapılır. Test prosedürü sırasında numune, özel olarak tasarlanmış bir makine kullanılarak tek bir vuruşla kırılır. Bir metalin darbe tokluğu, numunenin kırılmasında emilen enerji ölçülerek belirlenir. Bu basitçe sarkacın serbest bırakıldığı yükseklik ve sarkacın numuneye çarptıktan sonra sallandığı yükseklik not edilerek elde edilir. Çentik darbe deney düzeneği Şekil 4.12'deki gibidir.

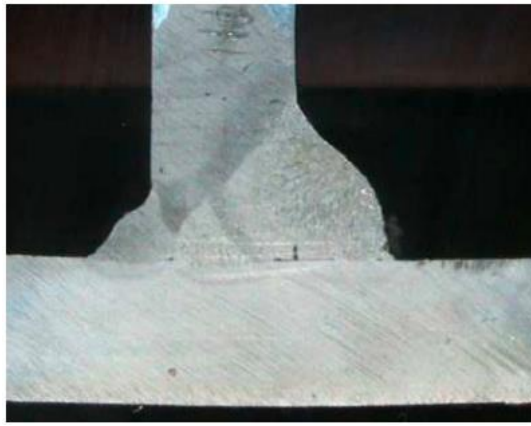


Şekil 4.12. Çentik darbe deney düzeneği [52].

4.2.5. Makro inceleme

Bu yöntem, kaynaklı bağlantıdan küçük numunelerin çıkarılmasını gerektirir. Bu numuneler daha sonra zımparalanır, parlatılır ve kullanılan temel malzemeye bağlı olarak hafif bir asit karışımı kullanılarak dağlanır. Asitle aşındırma, kaynağın iç yapısının net görüntüsünü sağlar.

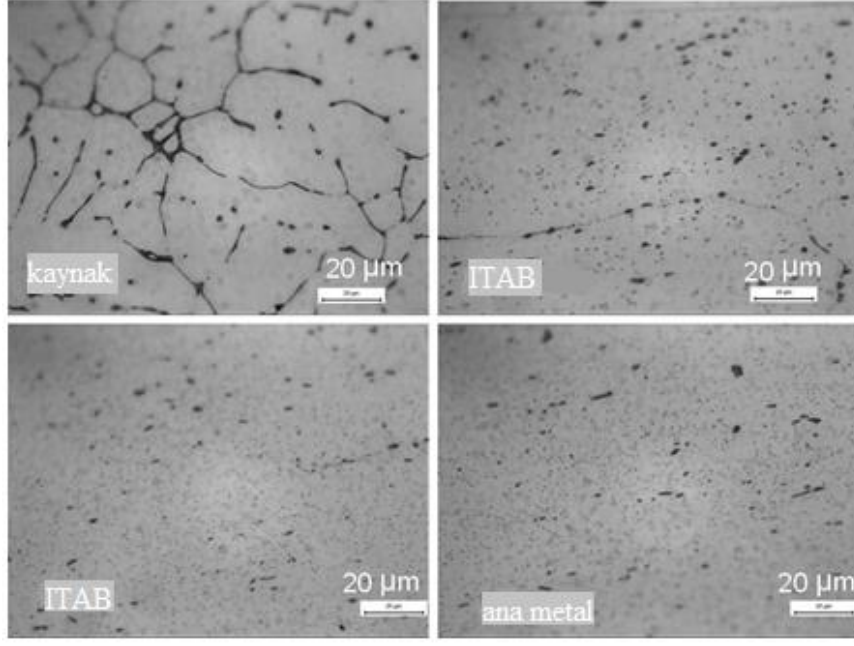
Numunenin incelenmesi, nüfuz etme derinliğini ve füzyon eksikliği, yetersiz kök penetrasyonu, iç gözeneklilik ve kaynak ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesindeki çatlamanın kanıtlarını ortaya çıkarır [47]. Örnek makroyapı görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Makroyapı örneği [52].

4.2.6. Mikroyapı inceleme

Numune, zımparalama, parlatma ve dağlama ile hazırlandıktan sonra mikroskop altında X20'den X2000'ye kadar olan büyütmelerde incelenir. Numuneler metalografik numune hazırlama yöntemlerine uygun bir şekilde sırasıyla 60, 120, 200, 400, 800 ve 1200 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalanır. Parlatma işlemi çuhayla yapılır. Son olarak dağlama işlemi uygun bir kimyasal reaktifle yapılır. Mikroyapı incelemesi, makroyapı incelemesinde ele alınan alanlardan çok daha küçük alanları içerir ve makro inceleme ile ortaya çıkarılamayacak bilgileri ortaya çıkarır. Mikroyapı incelemesi kaynaklı bir numunede çeşitli özellikleri keşfeder. Çatlaklar, mikroskobik boyuttaki kalıntılar, tane sınırları, kaynak metalinin yapısı, ısıdan etkilenen bölge, kaynak metalindeki mikro bileşenlerin dağılımı ve ısı işlemin kalitesi gibi özellikleri incelemeye imkan sunar. Örnek mikroyapı görüntüsü Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Mikroyapı örneği [36].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deney Programı

Alüminyum alaşımının kaynak edilebilirliğinden yola çıkarak 4mm kalınlığındaki 6061 T6 serisi Al alaşım plakalar MIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Daha sonra aynı parçalardan tekrar kaynatılarak kaynaklı bölgeler taşlanmış ve MIG kaynağıyla tamirat kaynağı yapılmıştır. Aynı tamirat işlemi TIG kaynağıyla da yapılmıştır. Tamirat işlemi üç kez tekrarlanmış ve her tamirattan sonra kaynaklı bölgeler aynı testlere tabi tutulmuştur.

1. MIG kaynağı : 0.0

1. MIG Kaynak Tamiri : 1.1

1. TIG Kaynak Tamiri : 1.2

2. MIG Kaynak Tamiri : 2.1

2. TIG Kaynak Tamiri : 2.2

3. MIG Kaynak Tamiri : 3.1

3. TIG Kaynak Tamiri : 3.2

rakamlarıyla gösterilecektir.

Kaynaklı numunelere gözle muayene, sıvı penetrant testi, radyografik muayene, çekme testi, eğme testi, sertlik testi, makro inceleme, mikroyapı inceleme, SEM-EDS ve XRD analizi uygulanmıştır. Şekil 5.1’de deney programı akış şeması görülmektedir.

Alınan sonuçlardan yola çıkarak alaşımın kaynak tamiri işlemi nedeniyle kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Kaynak parametreleri kullanılarak ısı girdileri de hesaplanmıştır. Isı girdisi hesaplama formülü (denklem 5.1) şu şekilde ifade edilir.

$$Q = k (VxI)/w \quad (5.1)$$

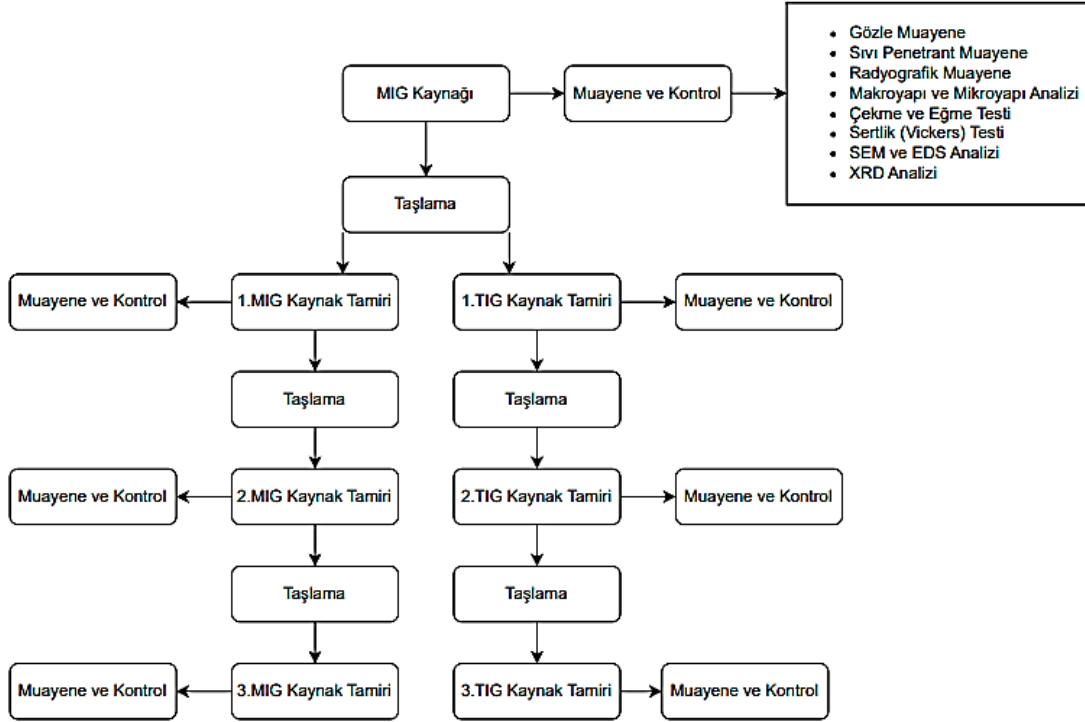
Q: Isı girdisi (j/mm)

k: Enerji verimlilik faktörü

V: Kaynak gerilimi (volt)

I: Akım (amper)

w: Kaynak hızı (mm/sn)

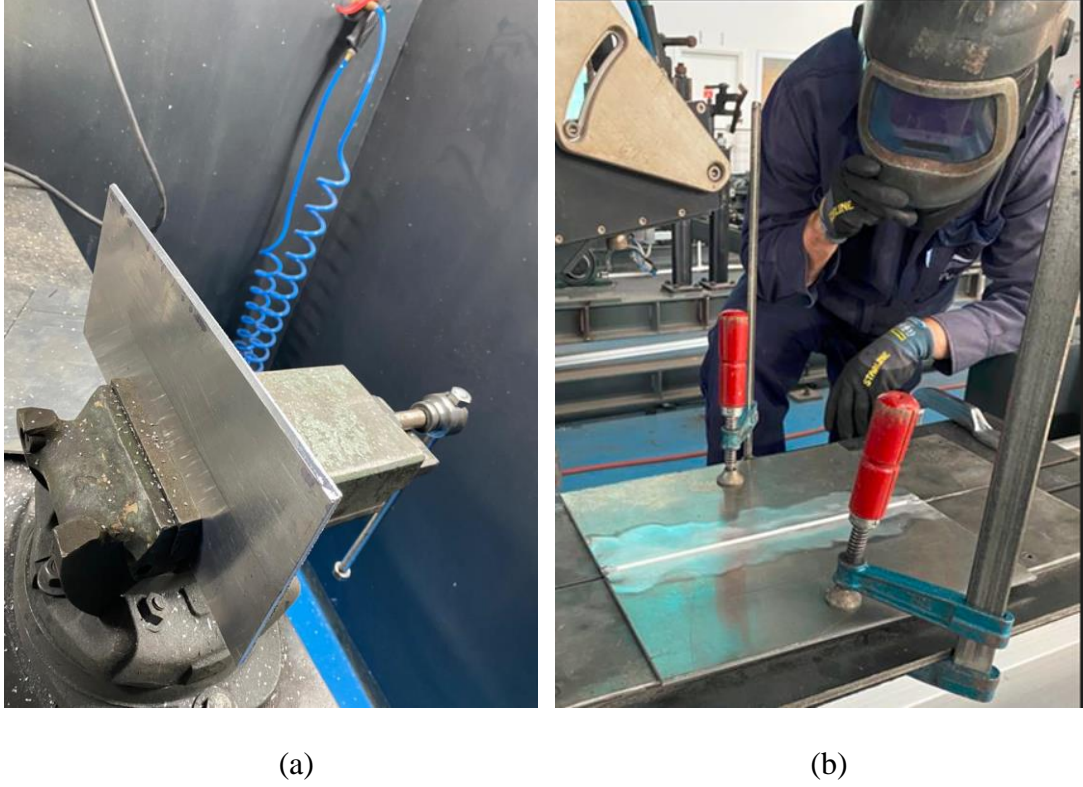


Şekil 5.1. Deney programı akış şeması.

5.2. Kullanılan Malzemeler

5.2.1. 6061 T6 serisi Al plakalar

Yapılan bu çalışmada ana malzeme olarak Türasaş Sakarya Bölge Müdürlüğü Kaynak Eğitim Merkezinde, kaynakçı eğitiminde ve kaynak prosedür şartnamesi hazırlamada kullanılan 45⁰ kaynak ağzı açılmış 300x280x4 mm boyutlarında AA 6061 T6 serisi Al plakalar kullanılmıştır. Şekil 5.2’de kaynak ağzı açılmış numune ve altlık kullanımı görülmektedir.



Şekil 5.2. a) 45° kaynak ağzı açılmış 4mm kalınlığında 6061 T6 serisi Al plaka, b) Kaynak öncesi altlık kullanımı ve sabitleme.

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de AA 6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu ve mekanik değerleri verilmiştir.

Tablo 5.1. 6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu.

Si	Fe	Cr	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Diğer	Al
0.40	0.44	0.10	0.44	0.94	0.10	0.25	0.15	0.15	kalan

Tablo 5.2. 6061 T6 alüminyum plakanın mekanik değerleri.

Isıl işlem (Temper)	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%) min-max	Sertlik (Brinell) min-max
T6	240-270	260-310	20	95

5.2.2. Dolgu malzemesi

İlave metal olarak ER5356 dolgu malzemesi kullanılmıştır. Ağırlıkça %5 Mg (Magnezyum) alaşımlı alüminyum kaynak telidir. Al-Mg ve Al-Mg-Si alaşımlarının kaynağında kullanılır. Ana metal ile renk uyumu ve özellikle korozyona karşı direnci oldukça iyidir. Kullanılan dolgu telinin kimyasal bileşenleri Tablo 5.3’te ve mekanik özellikleri Tablo 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.3. ER5356 dolgu teli kimyasal kompozisyonu (ağ.%)

Si	Fe	Cr	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Diğer	Al
0,03	0,15	0,11	0,14	4,83	0,01	0,01	0,09	-	kalan

Tablo 5.4. ER5356 dolgu teli mekanik özellikleri.

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (gr/cm ³)
120	280	25	575-635	2.65

5.3. Kaynak Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar

Birinci kaynak işlemi MIG kaynak yöntemiyle, tamir işlemleri ise hem MIG hem de TIG kaynak yöntemleriyle yapılmıştır. Birinci kaynak işlemi yapıp gerekli muayeneler tamamlandıktan sonra kaynak bölgesi taşlanıp tamir kaynağı için hazır hale getirilmiştir. MIG ve TIG kaynağı ile tamir işlemi üç kez tekrarlanmıştır. Her defasında yeni bir malzeme alınarak kaynak ve tamir kaynakları tekrarlanmıştır. Kaynak parametreleri Tablo 5.5'te verilmiştir. Kullanılan kaynak makineleri Şekil 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.5. MIG ve TIG kaynak parametreleri.

Kaynak parametreleri	MIG	TIG
Kullanılan Ana Malzemeler	6061 T6 (280x300x4 mm)	6061 T6 (280x300x4 mm)
Kaynak Makinası	Fronius TPS 400 i	EWM Tetrix
Volt (V)	21-23	17-19
Amper (A)	170-180	180-200
Gaz Debisi (lt/dk)	15	12
Kullanılan Gaz (% 99.99)	Argon	Argon
Kaynak hızı (cm/dak)	70-75	45-48
Tel Cinsi/Çapı (mm)	Esab 5356 / 1.2	TNT ER5356 / 3.2



(a)



(b)

Şekil 5.3. a) Fronius marka MIG ve b) Ewm marka TIG kaynak makineleri.

Tablo 5.6. Kaynak tamirinde kullanılan ekipman listesi.

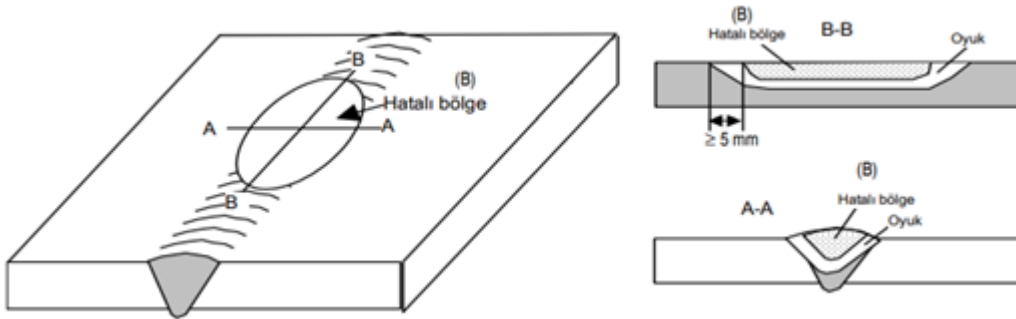
Yardımcı Malzeme	Resim	Yardımcı Malzeme	Resim
Taşlama Makinesi		Kaynak Maskesi	
Taşlama Diski		Eldiven	
Cetvel		Toz Maskesi	
Kimyasal Temizleyici		Siperlik	
Paslanmaz Tel Fırça		Kaynak Takımı	
Keçeli Kalem			

5.3.1. İşlem sırası

İşlem sırası aşağıdaki gibidir.



- Tamir Bölgesinin Kontrolü
 - Kaynak kusuru olan bölge tespit edilir.
 - Kusurlu bölgenin daha önce tamir kaynağı yapılmadığı kontrol edilir.
- Kusur Tipinin Belirlenmesi
 - Kaynak muayene personeli tarafından parça üzerinde işaretlenen kusurlu bölgedeki hata tipi ilgili NDT raporundan tespit edilir.
- Tamir Hazırlığı
 - Tamir kaynağı yapılacak bölgeyi keçeli kalemle işaretlenir.
 - Kaynak kusurunu tamamen uzaklaştırmak ve iyi bir kaynak nüfuziyeti sağlamak için taşlama makinası ile tamir bölgesini "V" şeklinde yarararak temizlenir. Açılan oluk 45° - 50° açı ile açılmalıdır. Oluk, metal kalınlığının en az $2/3$ derinliğinde olmalıdır. Oluk açma işleminde keskin köşelerden kaçınılmalıdır. Hatalı bölge ve kesiti Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Hatalı bölge ve kesiti.

5.4. Muayene Yöntemleri

5.4.1. Gözle muayene

Kaynaklı numunelerin gözle muayenesi TS EN ISO 10042'ye göre yapılmıştır. Bu standard alüminyum ve alaşımlarında ark kaynaklı birleştirmelerde görülen kusurlar için kalite seviyelerini kapsamaktadır.

Muayene esnasında kullanılan mercek ve Wiki Scan marka lazer kaynak kontrol cihazı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Servo-Robot marka Wiki-Scan lazerli kaynak ölçüm cihazı ve mercek.

5.4.2. Penetrant test

Kaynak yapılan parçaların sıvı penetrant muayenesi için kaynak ve ITAB bölgeleri MR 85 alkolle temizlenmiş ve yüzeylerine standartlara uygun MR 68 C penetrant sıvısı uygulanmış ve 10 dk. beklenilmiştir. Yüzeyde kalan penetrant su ve bez yardımıyla temizlendikten sonra MR 70 geliştirici uygulanmıştır. Şekil 5.6'da Penetrant ürün ailesi verilmiştir.



Şekil 5.6. Penetrant ürün ailesi

5.4.3. Radyografik test

Kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi için ICM SiteX model cihaz kullanılmıştır. TS EN ISO 17636-1 (Kaynak dikişlerinin tahribatsız muayenesi, Radyografik, muayene Bölüm 1: Filmler ve gama ışını teknikleri) standartına göre muayene parametreleri belirlenmiştir. Radyografik muayene cihazı Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Radyografik muayene cihazı.

5.4.4. Makroyapı inceleme

Kaynaklı numunelerin makro görüntüleri Türasaş Sakarya Bölge Müdürlüğü Metalografi Laboratuvarında Struers marka makroyapı inceleme cihazında incelenmiştir. Tahribatsız muayeneden sonra yapılan ilk muayene makroyapı inceleme işlemidir. Kaynaklı bölgelerin makroyapıları, kaynak yöntemine, kaynak parametrelerine ve ana malzemeye bağlı olarak değişmektedir. İncelenen bölge ana malzeme, ITAB ve kaynak bölgesinden oluşmaktadır.

5.4.5. Mikroyapı inceleme

Mikroyapı incelemeleri Türasaş Sakarya Bölge Müdürlüğü Metalografi Laboratuvarında Olympus marka optik mikroskop ile yapılmıştır. Bu yöntem malzemenin iç yapısını incelemek için uygulanmaktadır. Yöntemin aşamaları: numune alma, bakalitleme, zımparalama, parlatma, dağlama ve mikroskopik incelemedir. Numunenin alınacağı bölge tespit edildikten sonra kesici taş, testere vb. aletlerle numune kesilir. Kesme işlemi yaparken malzemede plastik deformasyona sebebiyet vermeyecek ve ısı girdisinin az olduğu bir yöntem seçilmelidir. Çünkü malzemenin orijinal iç yapısı da incelenecektir. Zımparalama işleminde 320, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler çuha kaplı parlatma disklerinin üstüne alınır ve parlatma işlemi tamamlanır. Numunenin iç

yapı özelliklerinin incelenmesi için dağlanması gerekmektedir. Bu işlem keller (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO₃, 190 ml saf su) reaktifleriyle yapılmıştır. Dağlama işlemi yaparken numuneyi dağlama çözeltisinde çok fazla bekletmemek gerekmektedir aksi halde kararına meydana gelmektedir. Şekil 5.8’de makroyapı inceleme cihazı ve optik mikroskop cihazı görölmektedir.



(a)

(b)

Şekil 5.8. a) Struers marka welding expert 5 makroyapı inceleme cihazı, b) Olympus marka optik mikroskop.

5.4.5.1. SEM cihazı ve özellikleri

Uygun metalografik standartlarda hazırlanmış numunelerin kaynak dikişi, ITAB bölgesinin ve ana metal mikroyapılarının incelenmesi ve yorumlanması için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroyapıların görüntülediği Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı SAÜ. Metalurji ve Malzeme mühendisliği laboratuvarında olup Şekil 5.9’da görölmektedir. Ayrıca numuneler üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek için enerji dağılımlı spektrometre (EDS) nokta analizi uygulanmıştır. EDS nokta analizi SEM cihazı ile birlikte çalıştığı için, element kompozisyonu aynı cihaz üzerinden yapılmıştır.



Şekil 5.9. Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı.

5.4.6. X-ışınları analizi

MIG ve TIG kaynağı sonrasında yapıda oluşan fazların belirlenmesi için X-ışınları analizleri (XRD) yapılmıştır.

Yapılan XRD analizinde, dalga boyu $\lambda=1,54059$ nm olan $\text{CuK}\alpha$ ışın demeti kullanılarak tarama açısı (2θ) 0 ile 90° aralığında olacak şekilde SAÜ. Metalurji ve Malzeme mühendisliği laboratuvarındaki Rigaku marka D/MAX/2200/PC model X-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Şekil 5.10'da kullanılan XRD cihazının fotoğrafı görülmektedir.

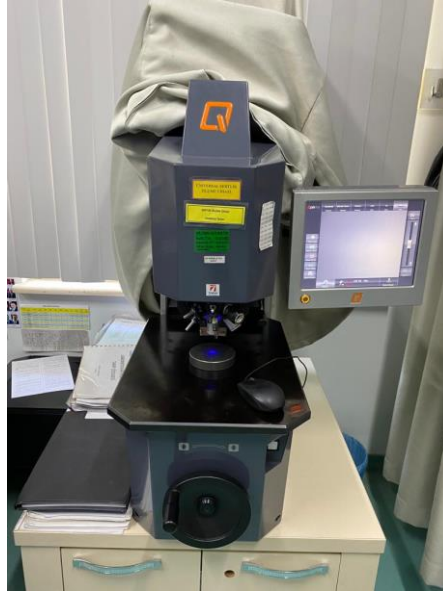


Şekil 5.10. X-ışınları difraksiyon analizi cihazı.

5.4.7. Sertlik deneyi

Kaynaklı levhalardan elde edilen numunelerin Türasaş Sakarya Bölge Müdürlüğü Metalografi Laboratuvarında Qness marka cihazla sertlik ölçümü yapılmıştır. Her bir deney numunesinden ana metal, ITAB, kaynak kök ve kep bölgelerinden olmak üzere

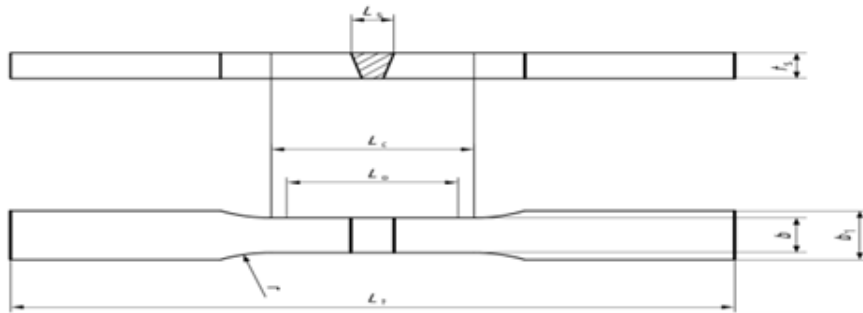
17 adet vickers sertlik ölçümü (500 gr yük ile) alınmıştır. Şekil 5.11’de deneysel çalışmalarda kullanılan Qness marka sertlik ölçüm cihazı verilmiştir.



Şekil 5.11. Qness marka sertlik ölçüm cihazı.

5.4.8. Çekme ve eğme deneyi

Kaynaklı parçaların çekme numuneleri TS EN ISO 4136 (Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler-Enine çekme deneyi) standardına göre hazırlanmış olup deney, Türasaş Sakarya Bölge Müdürlüğü Metalografi Laboratuvarında Instron marka cihaz ile yapılmıştır. Şekil 5.12’de çekme numunesinin temsili şekli ve Şekil 5.13’te Instron marka çekme test cihazı görülmektedir. Kaynaklı numunelere eğme testleri aynı cihazda eğme deneyi işlemi için hazırlanan aparat ile gerçekleştirilmiştir. Basma hızı 0,5 mm/s olarak seçilmiştir.



Şekil 5.12. Çekme numunesi temsili şekil

(Numune Ölçüleri: $L_t = 200$ mm, $b = 25$ mm, $t_s = 4$ mm, $L_c = 80$ mm)



Şekil 5.13. Instron marka çekme test cihazı.

6. DENEYSEL BULGULAR

6.1. Kaynaklı Numunelerin Tahribatsız Muayene Sonuçları

6.1.1. Gözle muayene sonuçları

4 mm kalınlığındaki 6061 T6 Alüminyum plakalar alın kaynağıyla birleştirildikten sonra tamirat yapılmayan, MIG ve TIG kaynaklarıyla üçer defa tamir kaynağı yapılan numunelerin gözle muayenesi TS EN ISO 10042 standartına göre yapılmış ve herhangi bir kusura rastlanılmamıştır. Lazerli kaynak ölçüm cihazı ve mercek Şekil 6.1’de verilmiştir.

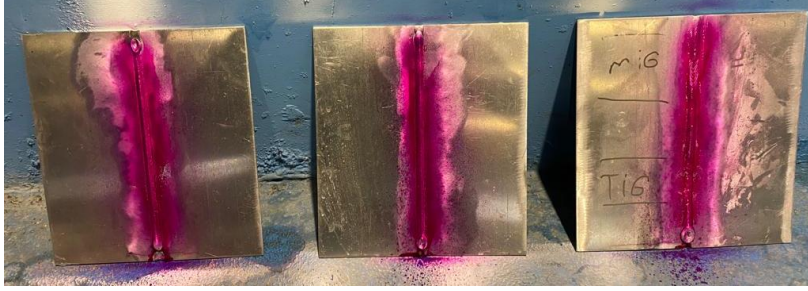


Şekil 6.1. Kaynak dikişi ölçüleri gösterimi.

Lazerli kaynak ölçüm cihazı kaynak dikişinin üstüne tutulduğunda, kaynak kep yüksekliği, kep genişliği, kök uzunluğu, yanma oluğu derinliği ve kaynak ağzı gibi ölçüleri göstermektedir. Kaynaktan sonra olması gereken ölçü sınır değerleri standarta göre cihaza girilir ve cihaz kaynak dikişi üzerinde gezdirilir. Kabul kriterleri içerisinde kalan ölçüler Şekil 6.1’de görüldüğü gibi yeşil tonda, dışında kalan ölçüler ise kırmızı tonda belirtmektedir. Cihaz ekranında da görüldüğü gibi kep yüksekliği 2.3 mm, kep genişliği 9.9 mm ve yanma oluğu 0 mm olarak ölçülmüştür.

6.1.2. Penetrant test sonuçları

Kaynaklara uygulanan penetrant test sonucunda herhangi bir çatlığa rastlanmamıştır; ancak gözenek oluşumu gözlemlenmiştir. Sonuçlar TS EN ISO 23277 (Kaynakların tahribatsız muayenesi-Kaynakların penetrant muayenesi-Kabul seviyeleri) standartına göre değerlendirilmiştir. Şekil 6.2’de penetrant uygulaması görülmektedir. Şekil 6.3’te MIG kaynağı sonrası ve MIG ve TIG kaynak tamiratları sonrası penetrant muayene testi sonuçları görülmektedir.



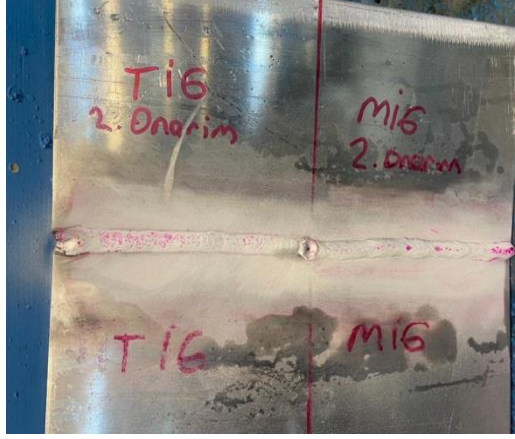
Şekil 6.2. Penetrant uygulama.



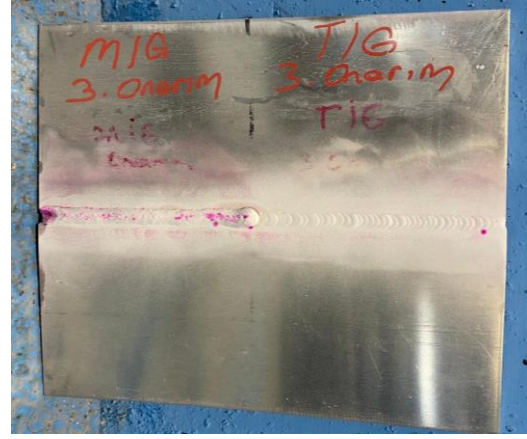
a) 0.0 nolu kaynak

b) 1.1 ve 1.2 nolu kaynak

Şekil 6.3. a) Tamirat yapılmayan, b) 1. Tamir, c) 2. Tamir ve d) 3. Tamir yapılan parçaların PT sonuçlarına ait makro görüntüleri.



c) 2.1 ve 2.2 nolu kaynak



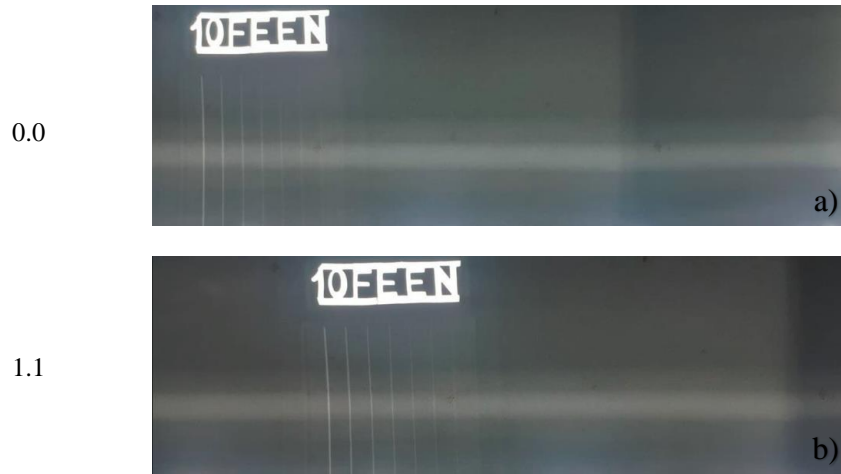
d) 3.1 ve 3.2 nolu kaynak

Şekil 6.3. (Devamı): a. Tamirat yapılmayan, b. 1. Tamir, c. 2. Tamir ve d. 3. Tamir yapılan parçaların PT sonuçlarına ait makro görüntüler.

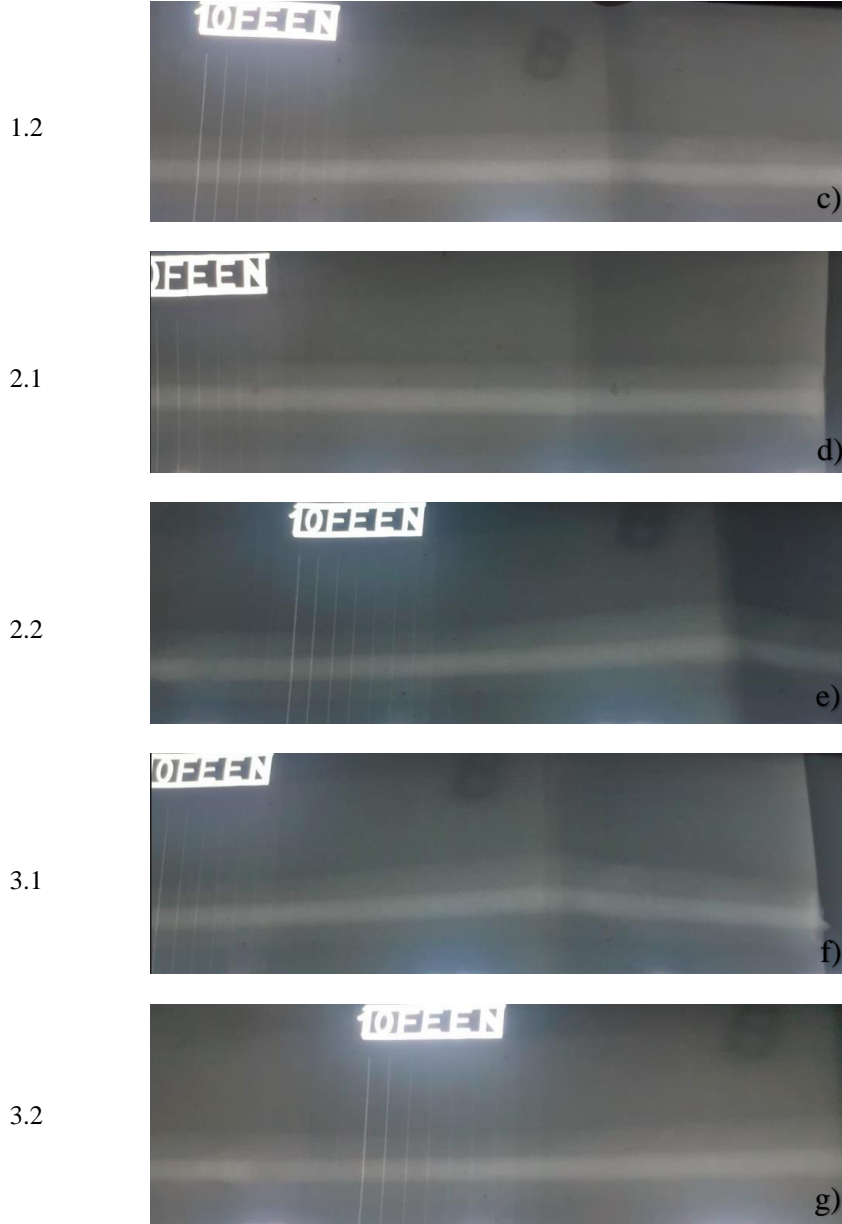
Şekillerde de gözüktüğü gibi TIG kaynağıyla yapılan kaynaklar görsel olarak daha iyi gözükmetedir. MIG kaynağındaki gözenek oluşumu TIG kaynağına göre daha fazladır. MIG kaynağında tamirat sayısı arttıkça gözeneklenmede de artış olduğu görülmüştür. TIG kaynağında ise durum değişmemiştir.

6.1.3. Radyografik muayene sonuçları

Radyografik muayene sonuçları Şekil 6.4'te verilmiştir. Radyografik muayene görüntülerine bakıldığında TSE EN ISO 10675-2 standardına göre çatlak, gözenek, ergime noksanlığı, yanma oluğu gibi herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.



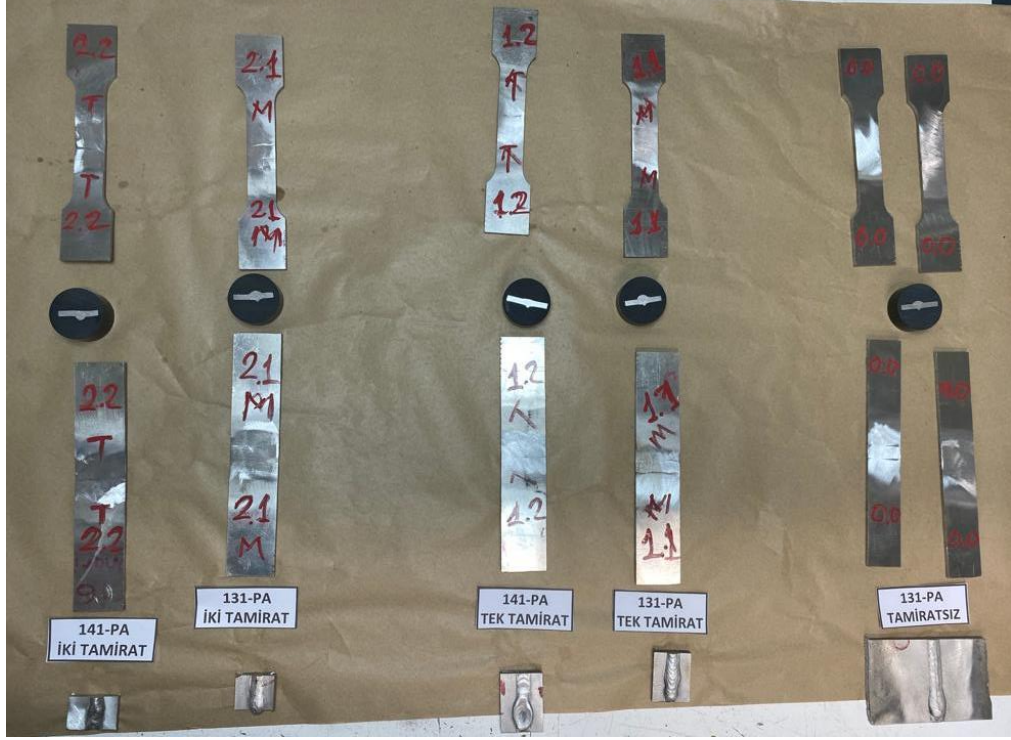
Şekil 6.4. a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG tamiri, c) 1. TIG tamiri, d) 2. MIG tamiri, e) 2. TIG tamiri, f) 3. MIG tamiri, g) 3. TIG tamiri yapılan parçaların radyografik muayene görüntüleri.



Şekil 6.4. (Devamı): a) Tamirat yapılmayan (0.0), b) 1. MIG tamiri (1.1), c) 1. TIG tamiri (1.2), d) 2. MIG tamiri (2.1), e) 2. TIG tamiri (2.2), f) 3. MIG (3.1) tamiri, g) 3. TIG (3.2) tamiri yapılan parçaların radyografik muayene görüntüleri.

6.2. Kaynaklı Numunelerin Tahribatlı Muayene Sonuçları

Radyografik muayene işlemi bittikten sonra çekme, eğme, sertlik ve makroyapı-mikroyapı incelemeler için deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 6.5'te çekme, eğme, sertlik, makroyapı ve mikroyapı inceleme numuneleri görülmektedir.

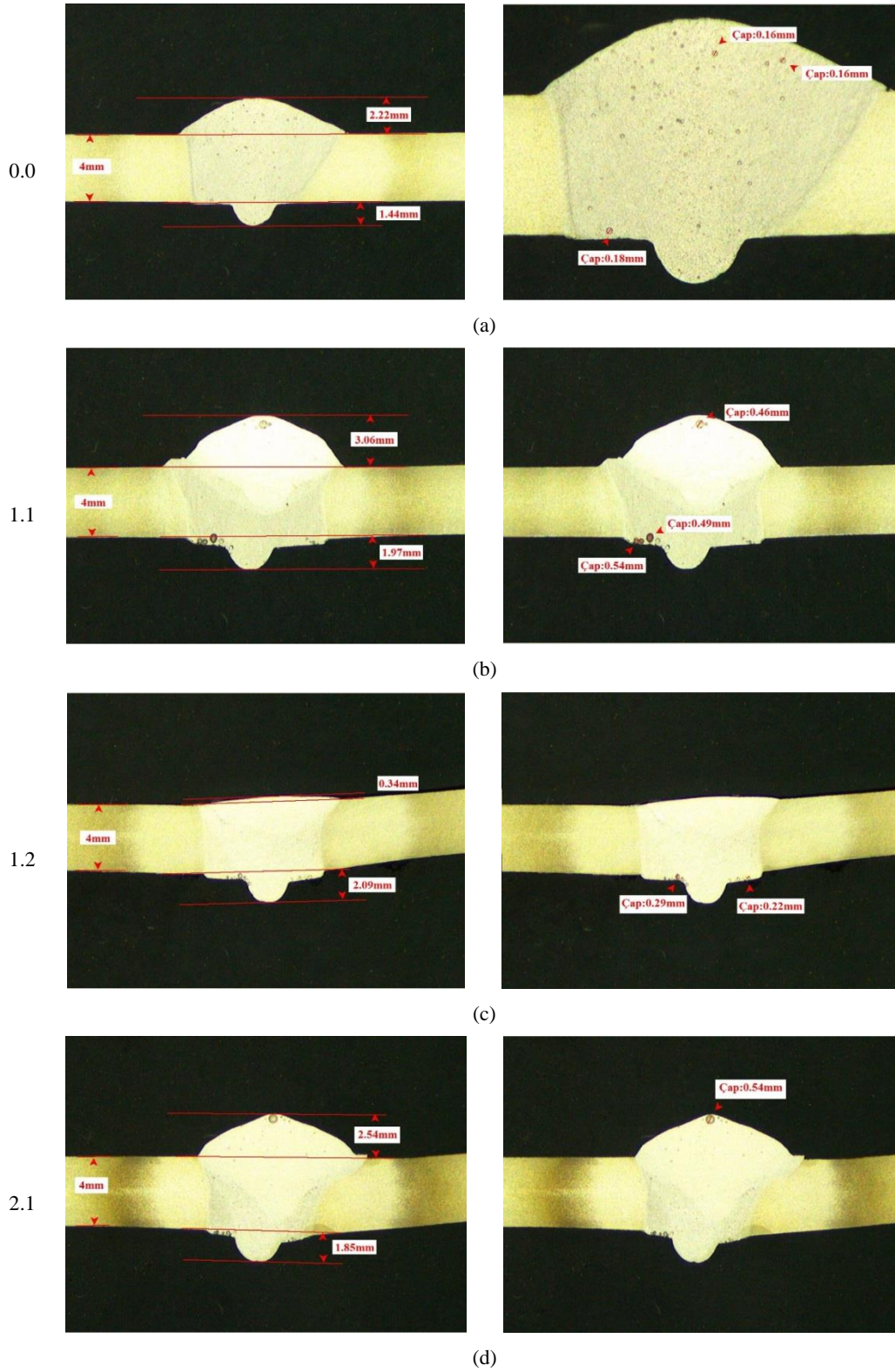


Şekil 6.5. Çekme, eğme, sertlik, makroyapı ve mikroyapı inceleme numuneleri.

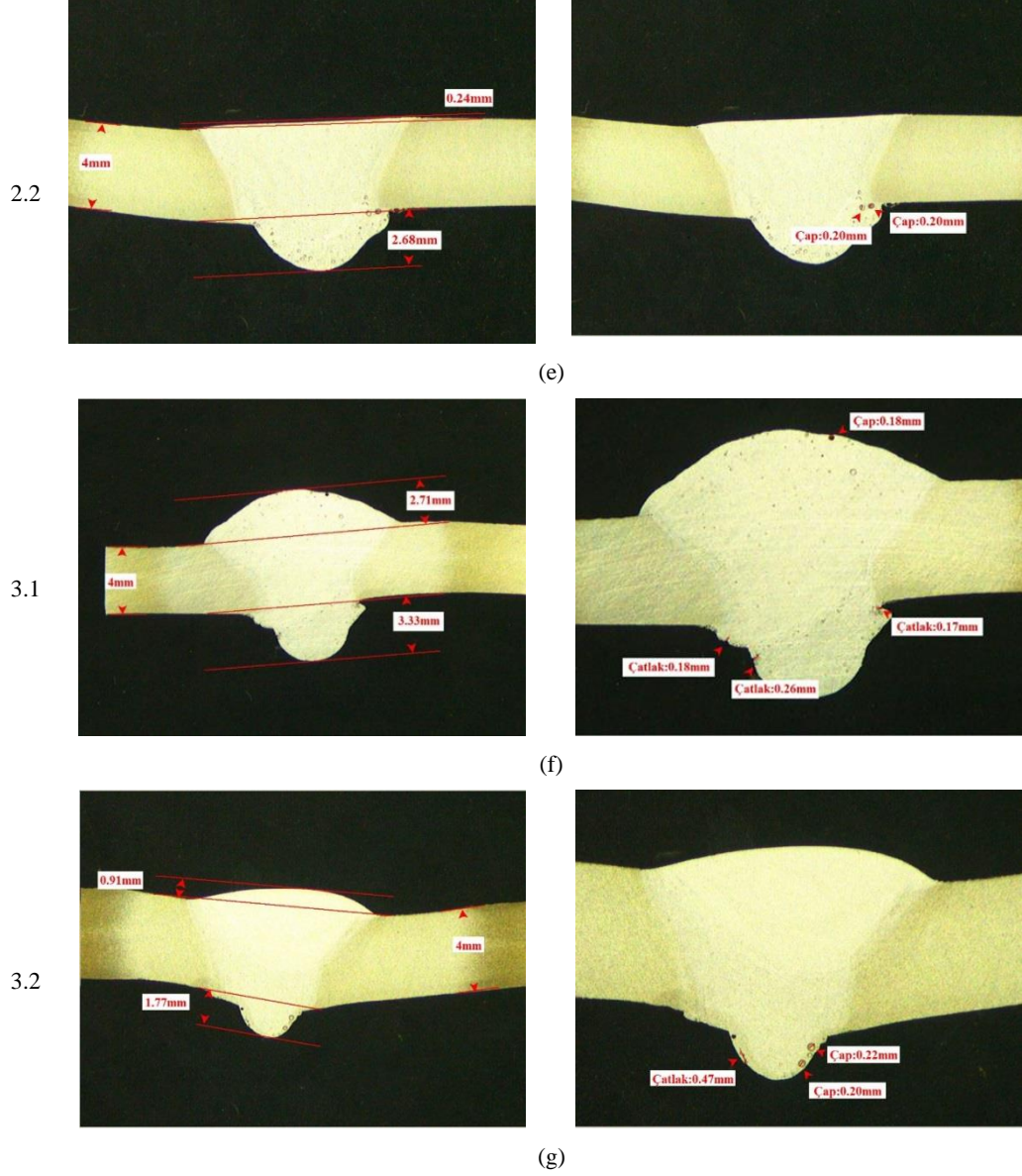
6.2.1. Makroyapı inceleme sonuçları

Numune hazırlama işlemlerinden sonra makroyapı incelemeleri TS EN ISO 10042 (Kaynak-Aluminyum ve alaşımlarında ark kaynaklı birleştirmeler-düzgünsüzlükler için kalite seviyeleri)'ye göre değerlendirilmiştir. Kalite seviyesi C'ye göre tek gözenek çapının malzeme kalınlığının 0.3 katından fazla olmaması gerekmektedir. Kaynak işlemi ve sonrasında tamirat kaynakları yapılan numunelerin makro görüntüleri Şekil 6.6'da verilmiştir.

Uygulanan MIG kaynağı sonrası alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 6.6 a)'da görülmektedir. Kaynak uygulanan levhanın kalınlığı 4mm'dir. Alınan görüntülere göre 2.2 mm kalınlığında kep yüksekliği mevcuttur. Bununla birlikte kaynak bölgesinde hidrojen kaynaklı gözenekler bulunmaktadır. Gözeneklenme yaygın bir kaynak hatasıdır. Alınan makrogörüntülere göre 0.16-0.18 mm çaplarında gözeneklerin mevcut olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG tamiri, c) 1. TIG tamiri, d) 2. MIG tamiri, e) 2. TIG tamiri, f) 3. MIG tamiri, g) 3. TIG tamiri yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri.



Şekil 6.6. (Devamı): a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG tamiri, c) 1. TIG tamiri, d) 2. MIG tamiri, e) 2. TIG tamiri, f) 3. MIG tamiri, g) 3. TIG tamiri yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri.

İlk kaynak işleminden sonra yüzey taşlanmış ve ilk MIG kaynağı onarımı yapılmıştır. Onarım sonrası alınan makroyapı görüntüleri Şekil 6.6 b)'de görülmektedir. İlk tamirat sonrası kep yüksekliği 3.06 mm olmuştur. Yapılan MIG tamiratına bakılarak ITAB içerisindeki gözenek boyutlarının 0.46-0.54 mm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Gözenekliliğin nedeninin katılaştıran kaynak metali havuzundaki hidrojen varlığı, nem ve kaynak öncesi temizliğin yeterince yapılmaması olduğu düşünülmektedir.

İlk kaynak işleminden sonrası yüzeyi taşlanan diğer bir numuneye birinci TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve 0.22-0.29

mm çaplarında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 6.6 c)). Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların da başladığı görülmüştür.

Birinci kaynak tamir işlemlerinden sonra tamirat yapılan kaynaklar taşlanarak ikinci kaynak tamir işlemine hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneye MIG kaynağı ikinci tamirata yapılmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kepinde ve kökünde devam ettiği ve en büyük gözenek boyutunun 0.54 mm çapında olduğu görülmüştür (Şekil 6.6 d)).

Birinci kaynak tamir işlemlerinden sonra yüzeyi taşlanan diğer numuneye ikinci TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve en büyük gözenek boyutunun 0.2 mm çapında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.6.e)). Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların daha da arttığı görülmüştür.

İkinci kaynak tamir işlemlerinden sonra tamirat yapılan kaynaklar taşlanarak üçüncü kaynak tamir işlemine hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneye MIG kaynağı üçüncü tamirata yapılmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kepinde ve kökünde devam ettiği ve en büyük gözenek boyutunun 0.18mm çapında olduğu görülmüştür. (Şekil 6.6 f)).

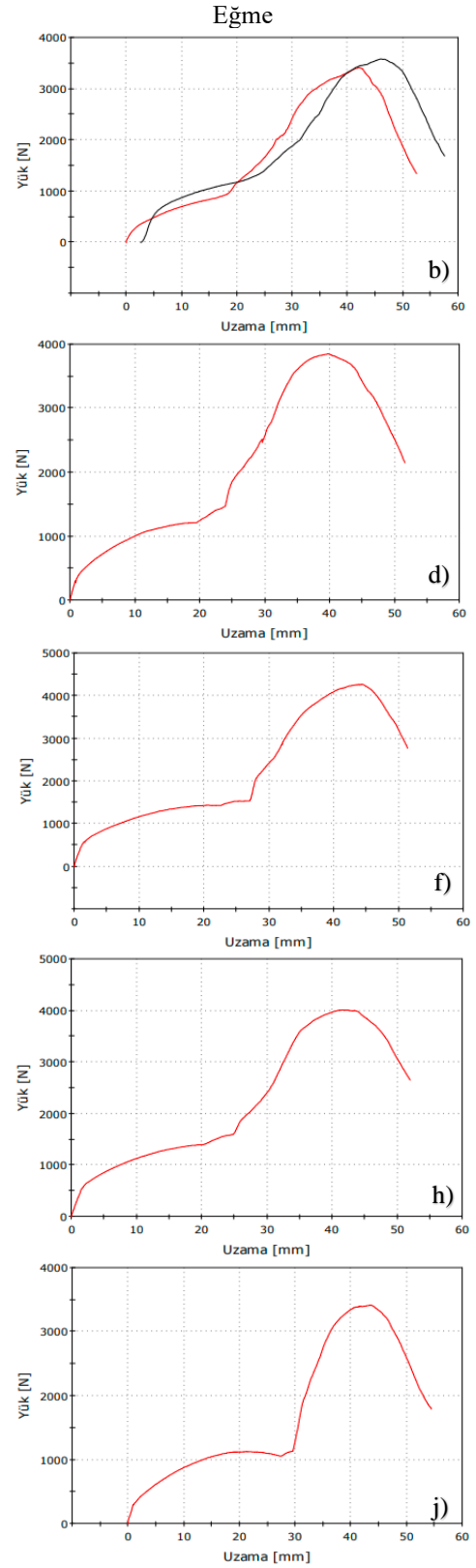
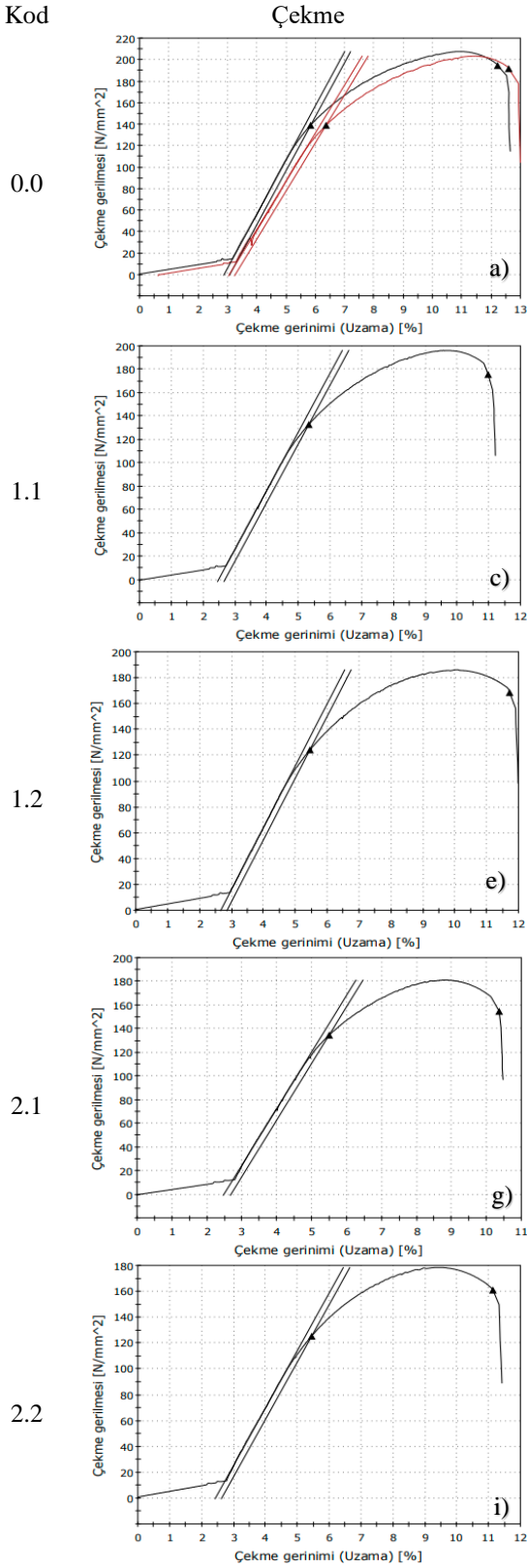
İkinci kaynak tamir işlemlerinden sonra yüzeyi taşlanan diğer numuneye üçüncü TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve en büyük gözenek boyutunun 0.22 mm çapında olduğu tespit edilmiştir. Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların daha da arttığı görülmüştür. (Şekil 6.6 g)).

6.2.2. Çekme – Eğme test sonuçları

TS EN ISO 15614-2 numaralı standarta göre kaynak yapılmış 6000 serisi alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma sonucunda elde edilen çekme mukavemet değeri ana malzemenin çekme mukavemet değerinin 0.6 katının, suni yaşlandırmada ise 0.7 katının altında olmamalıdır.

MIG kaynağı sonrası ve MIG ve TIG tamirat işlemlerinden sonra yapılan çekme ve eğme test grafikleri Şekil 6.7’de verilmiştir.

Kod



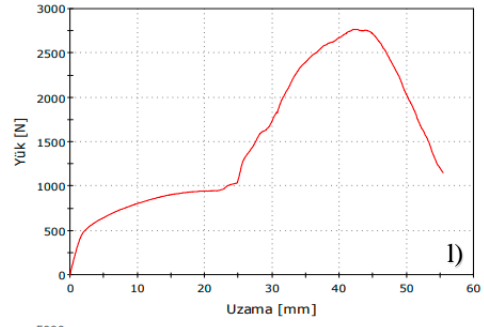
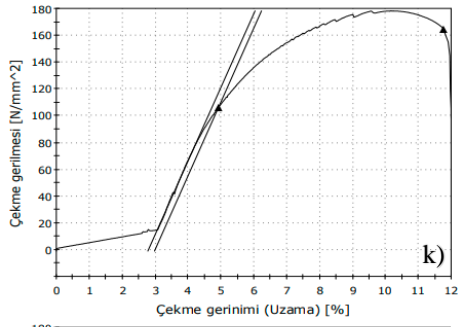
Şekil 6.7. a) ve b) 0.0, c) ve d) 1.1, e) ve f) 1.2, g) ve h) 2.1, i) ve j) 2.2, k) ve l) 3.1, m) ve n) 3.2 numaralı numunelerin çekme ve eğme testi grafikleri.

Kod

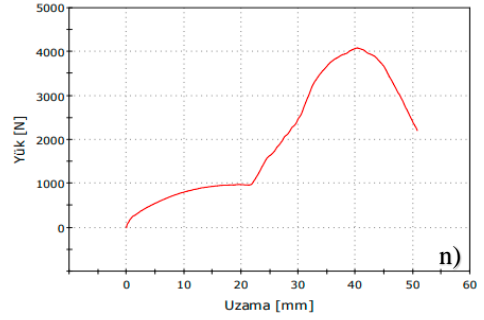
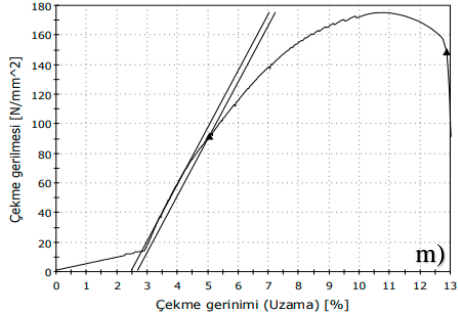
Çekme

Eğme

3.1



3.2



Şekil 6.7. (Devamı): a) ve b) 0.0, c) ve d) 1.1, e) ve f) 1.2, g) ve h) 2.1, i) ve j) 2.2, k) ve l) 3.1, m) ve n) 3.2 numaralı numunelerin çekme ve eğme testi grafikleri.

Çekme ve eğme testi sonrası numunelere ait makro görüntüler Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. a) Çekme ve b) eğme testi sonrası numunelere ait makro görüntüler.

Çekme deneyi sonuçları Tablo 6.1’de, eğme deneyi sonuçları Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1. MIG kaynağı ile tamiratsız ve MIG ve TIG ile üç kez tamirat yapılan numunelerin çekme testi sonuçları.

Kod	AKMA GERİLMESİ (MPa)	ÇEKME GERİLMESİ (MPa)	MAKSİMUM YÜK (N)	ALAN DARALMASI (%)	HESAPLANMIŞ UZAMA (%)
MIG					
0.0	139,1674	203,3048	17.890,8223	32,5392	8,057
1.1	132,8321	196,0877	17.255,7148	45,4800	8,226
2.1	134,6181	181,0924	15.936,1348	46,6392	8,547
3.1	106,23360	180,22963	15.684,2070	33,36636	9,811
TIG					
1.2	124,3719	186,1235	16.378,8672	43,9273	8,868
2.2	125,4717	179,4365	15.702,4160	50,1477	9,698
3.2	91,82285	175,1522	15.413,3974	33,40954	9,796

Tablo 6.2. MIG kaynağı ile tamiratsız ve MIG ve TIG ile üç kez tamirat yapılan numunenin eğme testi sonuçları.

	MANDREL ÇAPI (mm)	KALINLIK (mm)	GENİŞLİK (mm)	MAKSİMUM YÜK (N)	SONUÇ
MIG					
TAMİRATSIZ KÖK	46	4	30	3.579,7541	BAŞARILI
1.TAMİRAT KÖK	46	4	30	3.850,02734	BAŞARILI
2.TAMİRAT KÖK	46	4	30	4.010,41235	BAŞARILI
3. TAMİRAT KÖK	46	4	30	2.767,40942	BAŞARILI
TIG					
1.TAMİRAT KÖK	46	4	30	4.263,14062	BAŞARILI
2. TAMİRAT KÖK	46	4	30	3.413,60791	BAŞARILI
3. TAMİRAT KÖK	46	4	30	4.085,70654	BAŞARILI

Ambriz ve arkadaşları tarafından 2009'da yürütülen bir çalışmada, gaz metal ark kaynağının 6061-T6 üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tipik olarak ısı girdisi ne kadar yüksek olursa ITAB'ın mekanik özellikleri o kadar düşük olmaktadır sonucuna varmışlardır [3]. Bu çalışmaya paralel olarak çıkan sonuçlardan da anlaşılacağı üzere her iki kaynak yönteminde de tamirat sayısı arttıkça malzemenin akma ve çekme gerilmelerinde azalmalar görülmüştür. Üçüncü kaynak tamirinde bu değerler gözle görülür bir şekilde azalmıştır. Artan ısı girdisi ve termal genleşmelerin de malzemenin dayanımını azalttığını göstermektedir. Ana malzemenin çekme mukavemetinin 260-310 MPa olduğu bilinmektedir. Elde edilen test sonuçlarına göre en düşük çekme mukavemetinin 3. TIG kaynak tamiri sonucunda 175,15 MPa olduğu saptanmıştır. 3. MIG kaynak tamiratında ise en düşük çekme mukavemeti 180,23 MPa olup MIG

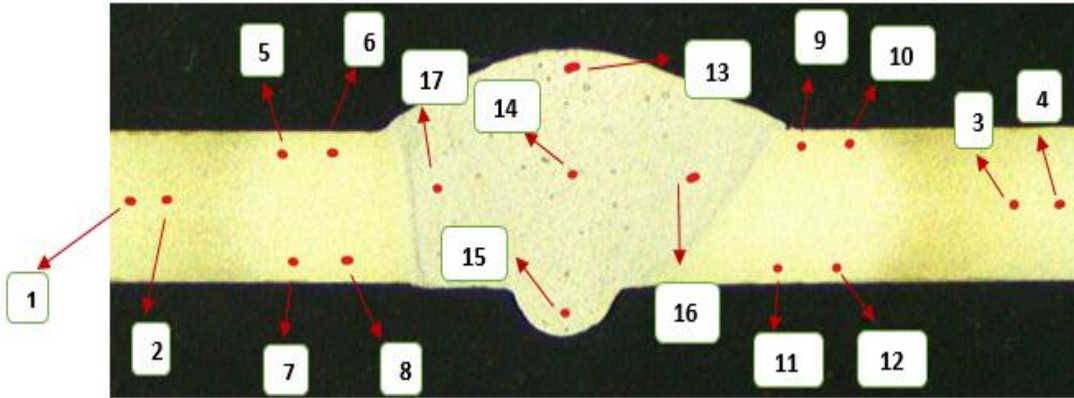
kaynağında bu düşüş %69,32 iken TIG kaynağında %67.37 olarak tespit edilmiştir. TS EN ISO 15614-2 numaralı standartta göre 3. TIG kaynak tamiri sonucunda çekme mukavemet değeri suni yaşlandırılmış malzeme için kabul kriterlerinin dışına çıkmıştır.

MIG kaynağı sonucu elde edilen çekme değerleri TIG kaynağına göre daha yüksek çıkmıştır. TIG kaynağındaki ısı girdisinin daha fazla olmasından ötürü bu durum ortaya çıkmıştır. Isı girdileri MIG kaynağında 214 J/mm, TIG kaynağında ise 285 J/mm civarında çıkmıştır.

Tablo 6.2'deki eğme testi sonuçlarına göre malzemelerde herhangi bir çatlama veya kopmanın olmadığı gözlemlenmiştir.

6.2.3. Sertlik deneyi sonuçları

Hazırlanan numunelerden Ana Malzeme (1-4), ITAB bölgesi (5-12), kaynak (kep ve kök) (13-17) bölgelerinden olmak üzere Vickers (HV 0,5) sertlik değerleri tespiti için 17 farklı bölgeden ölçüm alınmıştır. (Şekil 6.9). Sertlik ölçümleri tamiratsız ve MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile 1., 2. ve 3. tamiri yapılan tüm numunelerde gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Tablo 6.3'te verilmiştir.

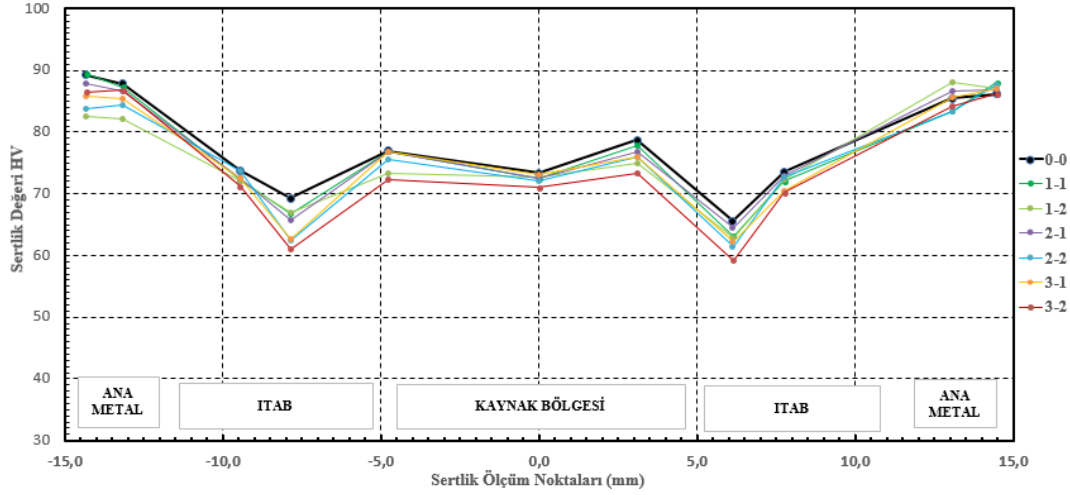


Şekil 6.9. Sertlik ölçümü yapılan noktalar.

Tablo 6.3. Numunelerin Vickers sertlik deneyi sonuçları.

	0.0	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
NOKTALAR		ANA MALZEME					
1	89.3	89.5	82.6	87.8	83.8	85.8	86.5
2	87.8	87.3	82.1	86.7	84.4	85.5	86.8
3	85.5	83.4	88.0	86.6	83.3	85.6	84.2
4	86.2	88.0	87.1	86.9	87.6	87.1	86.2
		ITAB					
5	75.3	74.1	72.8	74.4	74.5	73.9	72.5
6	69.1	66.0	68.9	64.4	63.1	61.8	62.1
7	72.2	70.3	71.3	70.4	72.9	71.0	70.0
8	69.4	67.7	65.0	66.9	61.8	63.3	60.1
9	67.2	63.8	61.0	64.5	62.9	60.9	59.8
10	74.1	71.2	71.0	72.2	72.6	70.3	70.1
11	64.0	62.5	64.9	64.6	59.9	63.7	58.7
12	73.0	72.8	73.4	73.8	72.6	70.7	70.3
		KAYNAK BÖLGESİ					
13	74.1	73.1	72.2	74.6	72.5	73.2	72.3
14	74.0	72.0	74.8	71.5	73.1	73.6	69.6
15	72.1	72.2	71.0	71.2	70.6	72.3	68.1
16	73.7	72.9	70.0	72.8	70.9	70.9	68.4
17	72.0	76.8	68.4	71.8	70.6	71.7	68.3

Kaynak tamiri yapılmamış ve tamir yapılmış numunelerin Vickers sertlik değerleri grafiği Şekil 6.10'da verilmiştir. Ana malzemede en yüksek sertlik değeri 89.5 HV ve en düşük sertlik değeri 82.1 HV olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesinde en yüksek sertlik değeri 75.3 HV ve en düşük sertlik değeri 58.7 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değeri 76.8 HV ve en düşük sertlik değeri 68.1 HV olarak ölçülmüştür.



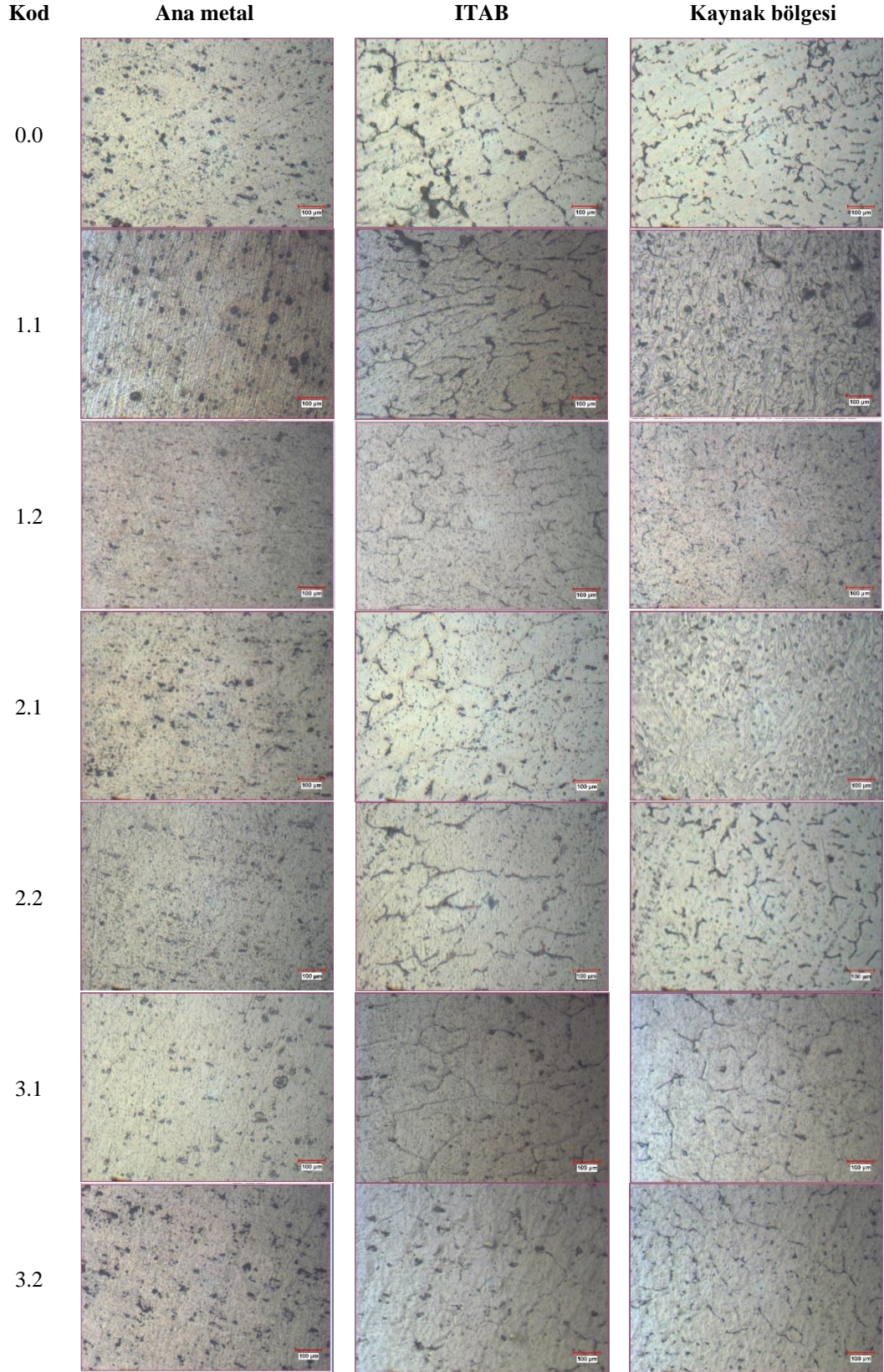
Şekil 6.10. Kaynak tamiri yapılmamış ve tamir yapılmış numunelerin Vickers sertlik değerleri.

Sertlik ölçümü sonuçlarına göre en yüksek değerler ana metalde daha sonra kaynak bölgesinde ve en düşük değerlerin de ITAB bölgesinde olduğu görülmektedir. En fazla ısı girdisi ITAB bölgesinde olduğundan dayanım azalmış ve en düşük sertlik değerleri de bu bölgede görülmüştür. TIG kaynağındaki ısı girdisi daha fazladır ve buna bağlı olarak dayanım ve sertlik değerleri MIG kaynağına göre daha düşüktür.

1995'te V. Malin tarafından yapılan bir çalışmada, 4043 dolgu malzemesi ile 6061-T6 parçası gaz metal ark kaynağı kullanılarak kaynak yapılmıştır. Mikrosertlik testleri, 100 gram yük ile bir Knoop mikrosertlik test cihazı kullanılarak yapılmış ve ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik değerlerinin ana malzemenin yaklaşık %70'i olduğu sonucuna varmışlardır [3]. Mevcut çalışmada ise bu oran birinci MIG kaynağı tamiratında % 82 iken üçüncü MIG tamirinde % 78, üçüncü TIG tamirinde ise % 76 olarak belirlenmiştir.

6.2.4. Optik mikroyapı inceleme sonuçları

MIG kaynağı yapılmış ve MIG ve TIG kaynaklarıyla 1. 2. ve 3. tamiratları yapılmış 0.0, 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 numaralı numunelerin ana metal, ITAB ve kaynak bölgesinden alınan 50X büyütmedeki optik mikroyapı görüntüleri Şekil 6.11'de verilmiştir.



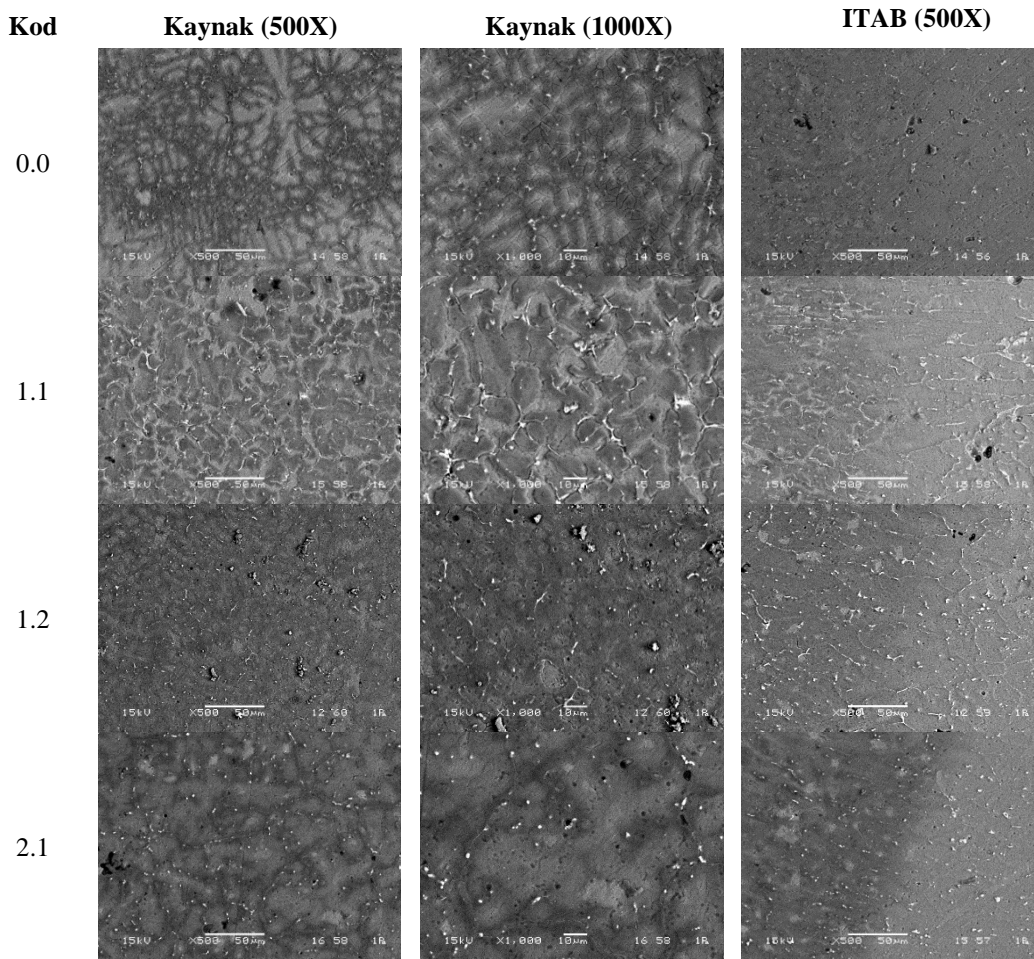
Şekil 6.11. Kaynak tamiri yapılmamış MIG kaynağının ve MIG ve TIG kaynaklarıyla tamirata yapılmış numunelerin 50X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

Ana metalde görülen koyu siyah parçacıklar Mg_2Si taneciklerini temsil etmektedir. Mg hem ana malzemede hem de ER5356 kodlu dolgu metalinde mevcut olup XRD

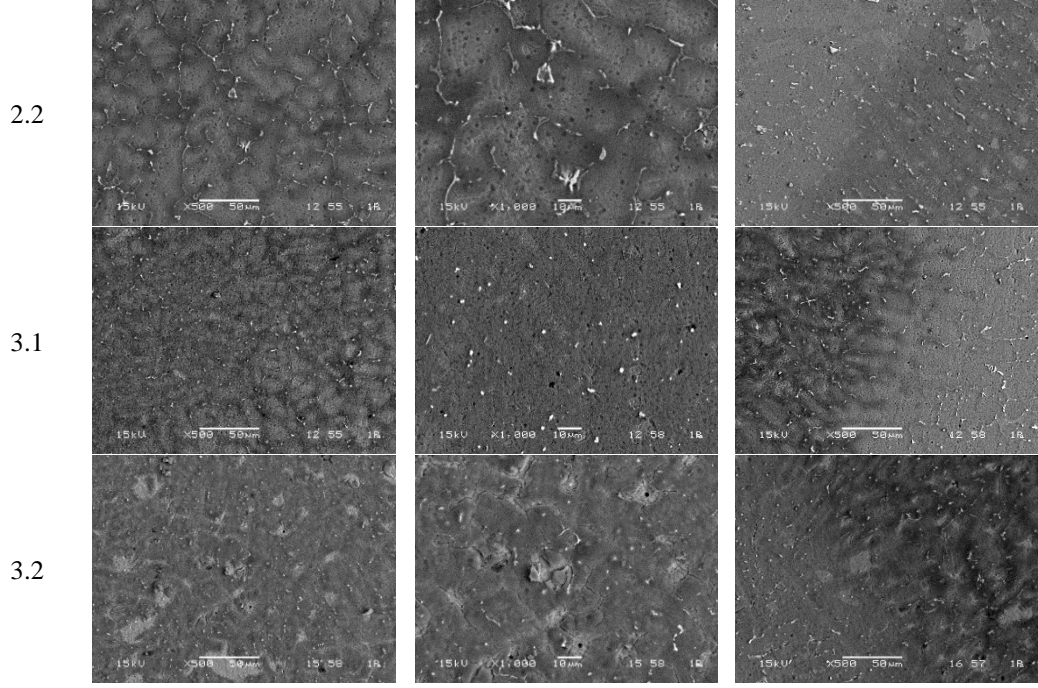
analizleri ile varlığı tespit edilmiştir. Tamirat sayısı ve ısı girdisi arttıkça tane boyutlarındaki artış ile birlikte ITAB bölgesindeki tanelerde irileşme görülmektedir. Birinci ve üçüncü tamirat sonrası ITAB bölgelerindeki tane boyutu farkı açıkça görülmektedir.

6.2.5. SEM-EDS sonuçları

MIG kaynağı yapılmış ve 3 kez MIG ve TIG kaynak tamirata yapılmış plakaların ITAB bölgelerinden alınan 500X büyütmedeki ve kaynak bölgelerinden alınan 500X ve 1000X büyütmedeki yüzeyler parlatılıp dağlanmış numunelerin SEM görüntüleri Şekil 6.12’de verilmiştir.



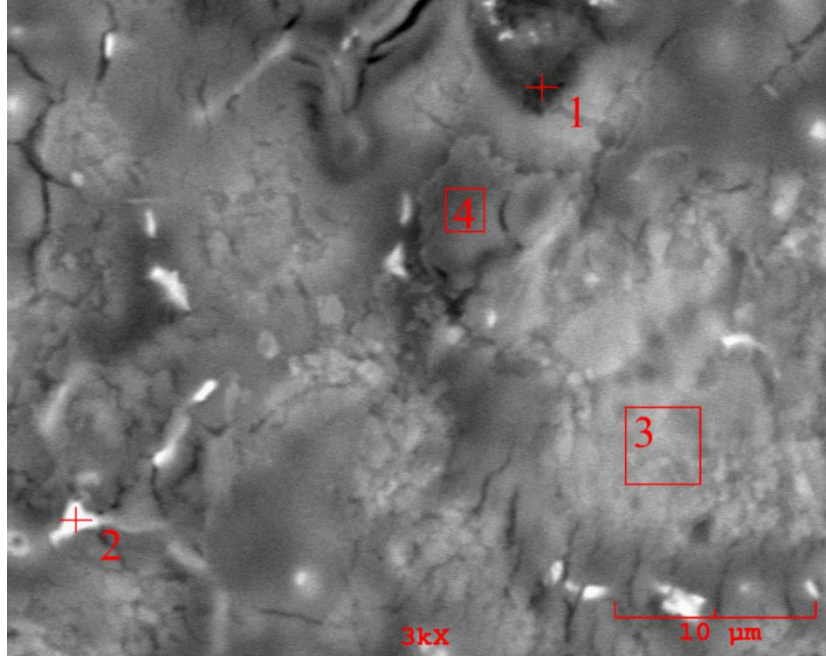
Şekil 6.12. Kaynak tamiri yapılmamış ve 3 kez tamirata yapılmış numunelerin ITAB bölgelerinden alınan 500X büyütmedeki ve kaynak bölgelerinden alınan 500X ve 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri.



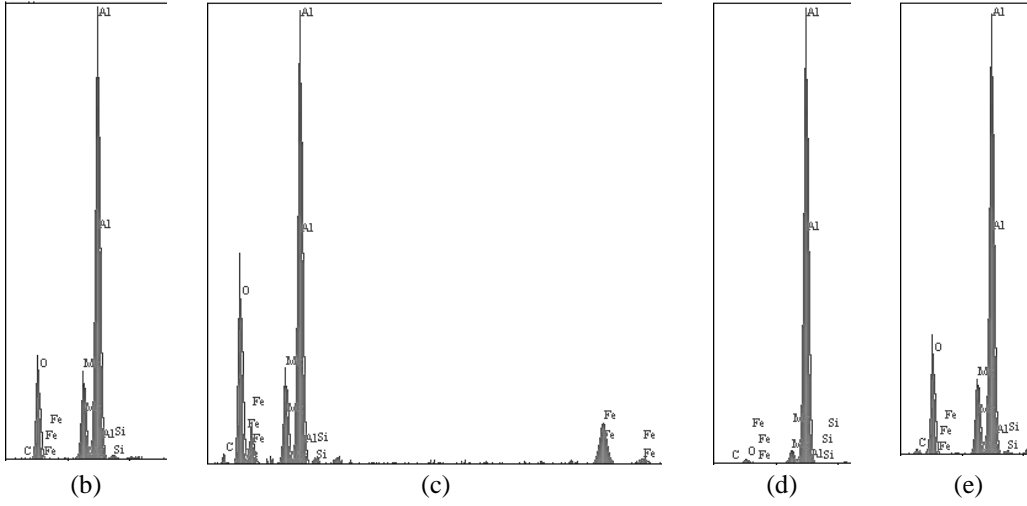
Şekil 6.12. (Devamı): Kaynak tamiri yapılmamış ve 3 kez tamirâtı yapılmış numunelerin ITAB bölgelerinden alınan 500X büyütmedeki ve kaynak bölgelerinden alınan 500X ve 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri.

SEM görüntülerine göre tamirat sayısı arttıkça yapıda özellikle ITAB bölgesinde ısı girdisinin etkisiyle tane boyutunda irileşme dikkat çekmektedir. Kaynak bölgesinde ise gözle görünür bir değişiklik olmadığı belirtilebilir.

1.1 (birinci MIG kaynak tamiri) numaralı numunenin 1, 2, 3 ve 4 numaralı alanları için EDS analizi sonuçları Şekil 6.13'te ve 1.2 (birinci TIG kaynak tamiri) numaralı numunenin 1, 2, 3, 4 ve 5 numaralı alanları için EDS analizi sonuçları Şekil 6.14'te verilmiştir.



(a)



(b)

(c)

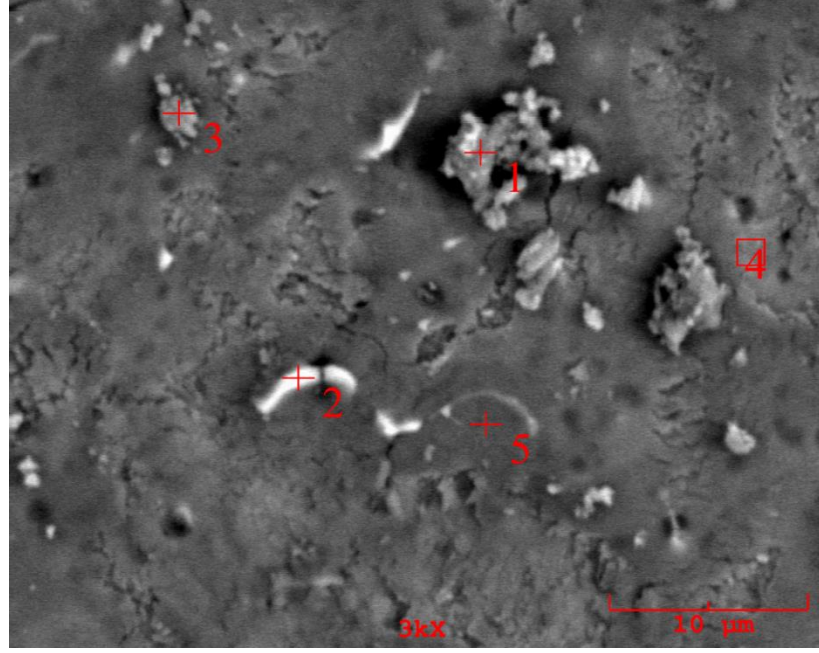
(d)

(e)

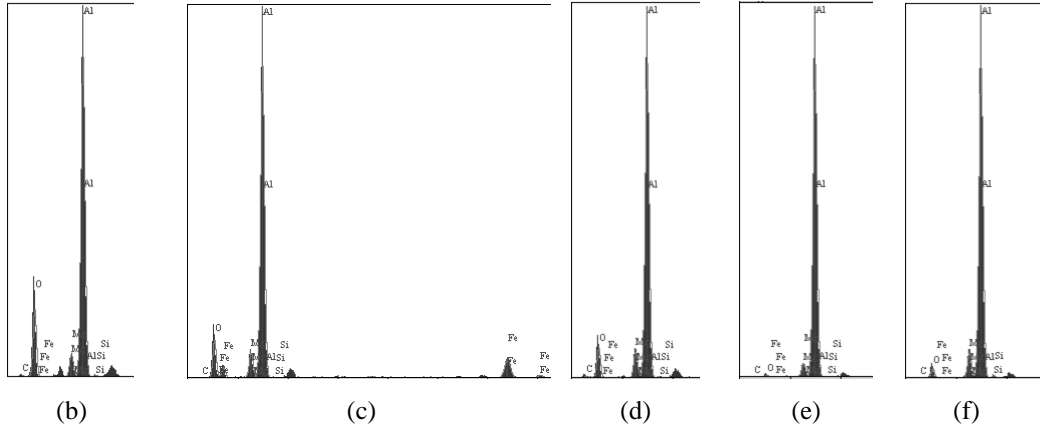
Element	ağ. (%) (1)	ağ. (%) (2)	ağ. (%) (3)	ağ. (%) (4)
C	0.387	1.794	0.418	4.701
O	25.441	28.317	2.891	28.541
Mg	10.404	8.179	2.499	9.157
Al	62.400	41.104	94.036	56.543
Si	1.240	0.771	0.069	0.723
Fe	0.127	19.835	0.088	0.336

(f)

Şekil 6.13. 1.1 (birinci MIG kaynağı tamiratı) numaralı numunenin kaynak bölgesinin 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları.



(a)



Element	ağ. (%) (1)	ağ. (%) (2)	ağ. (%) (3)	ağ. (%) (4)	ağ. (%) (5)
C	2.177	0.637	4.712	0.000	0.000
O	31.365	15.821	18.986	1.624	7.793
Mg	3.923	4.536	5.076	3.313	5.572
Al	61.713	60.574	70.504	94.788	84.892
Si	0.495	0.218	0.382	0.123	1.230
Fe	0.327	18.215	0.340	0.152	0.513

(g)

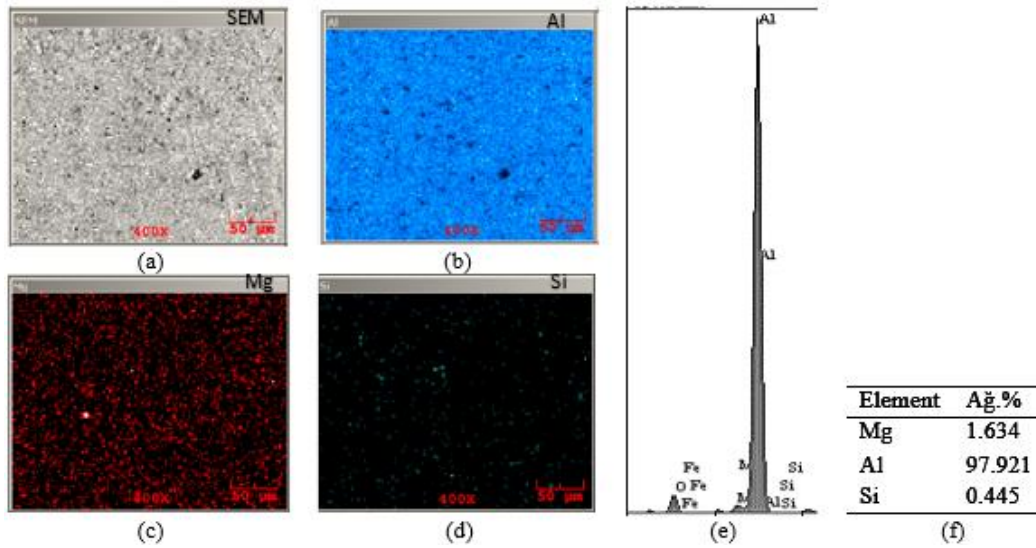
Şekil 6.14. 1.2 (birinci TIG kaynağı tamiratı) numaralı numunenin kaynak bölgesinin 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları.

EDS analizlerinde tespit edilen O elementinin varlığının yüzeydeki Al metalinin oksijene afinitesinin fazla olması sebebiyle oluşan oksit tabakasının göstergesi olduğu düşünülmektedir.

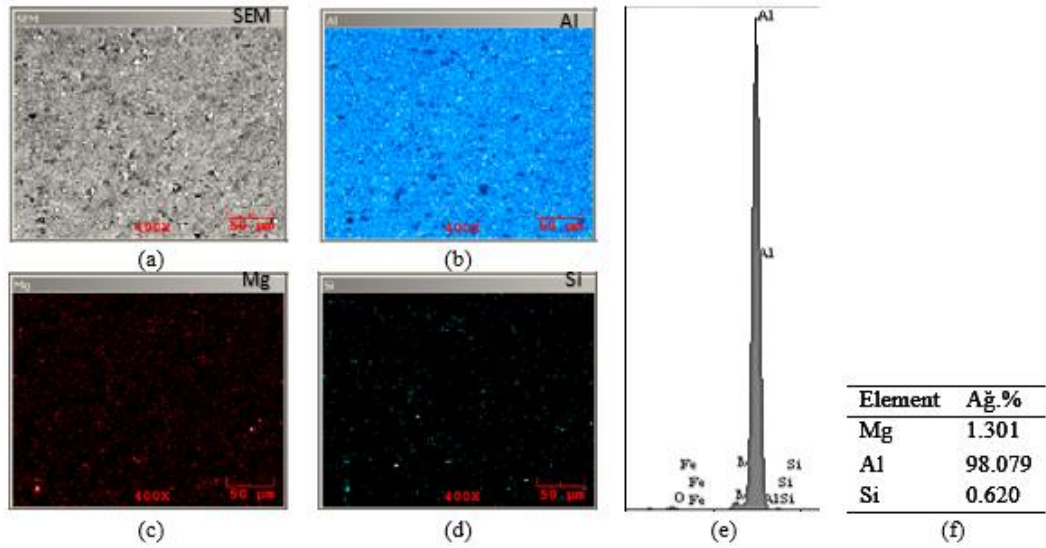
Geri saçılan elektron (BSE) görüntülerinde, malzeme bileşiminde atom numaraları büyük olan elementlerden Fe ana metal bileşiminde (ağ.%0.44) ve dolgu telinde (% 0.15) bulunmaktadır ve bu element daha parlak olarak görüntü vermektedir. Atom numarası düşük olan elementlerin ise Si, Al ve Mg gibi daha koyu renkli olarak görüldüğü tespit edilmiştir.

0.0, 1.1, 1.2, 3.1, 3.2 kodlu numunelerin ITAB bölgelerindeki element dağılımını belirlemek için genel EDS analizleri yapılmıştır. Şekil 6.15'te tamirat yapılmayan 0.0 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması (mapping) Şekil 6.16'da birinci MIG kaynağı tamiratyapılan numunenin, Şekil 6.17'de birinci TIG kaynağı tamiratyapılan numunenin, Şekil 6.18'de üçüncü MIG kaynağı tamiratyapılan numunenin ve Şekil 6.19'da üçüncü TIG kaynağı tamiratyapılan numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması verilmiştir.

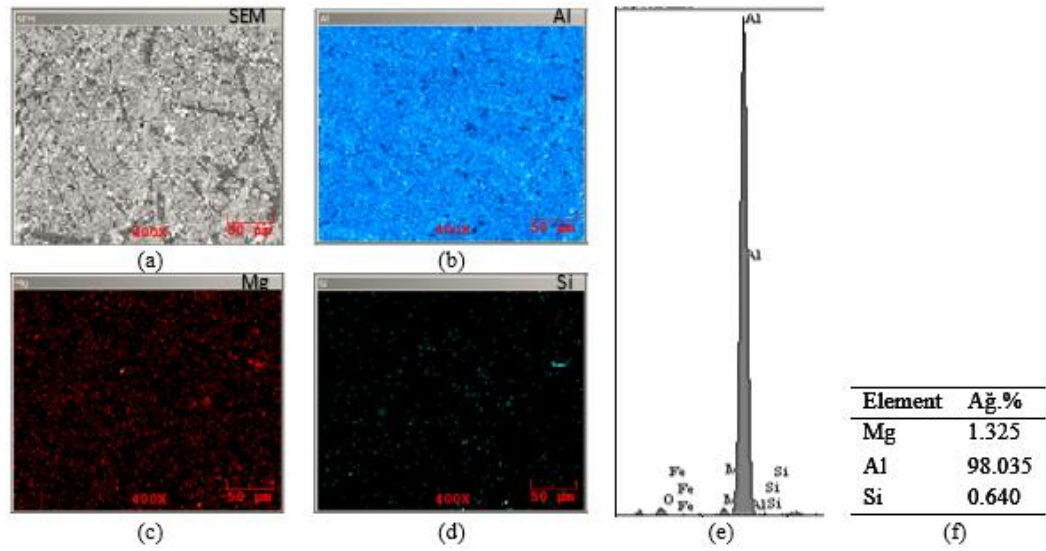
Birinci MIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre mukavemet artırıcı görevi olan Mg'nin, tamirat yapılmayan numuneye göre azaldığı (ağ. % 1.634'ten 1.301'lere) görülmektedir.



Şekil 6.15. 0.0 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması.

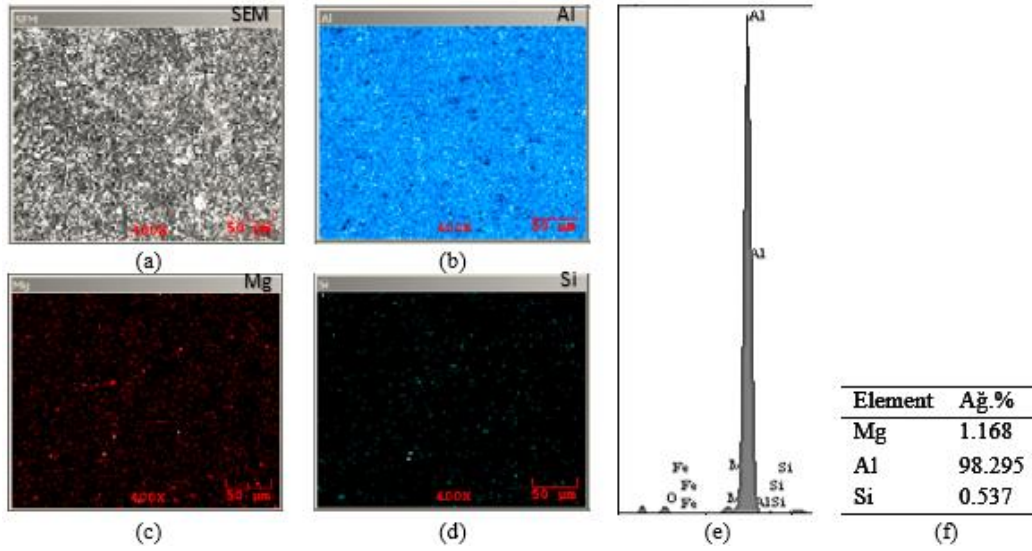


Şekil 6.16. 1.1 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması.

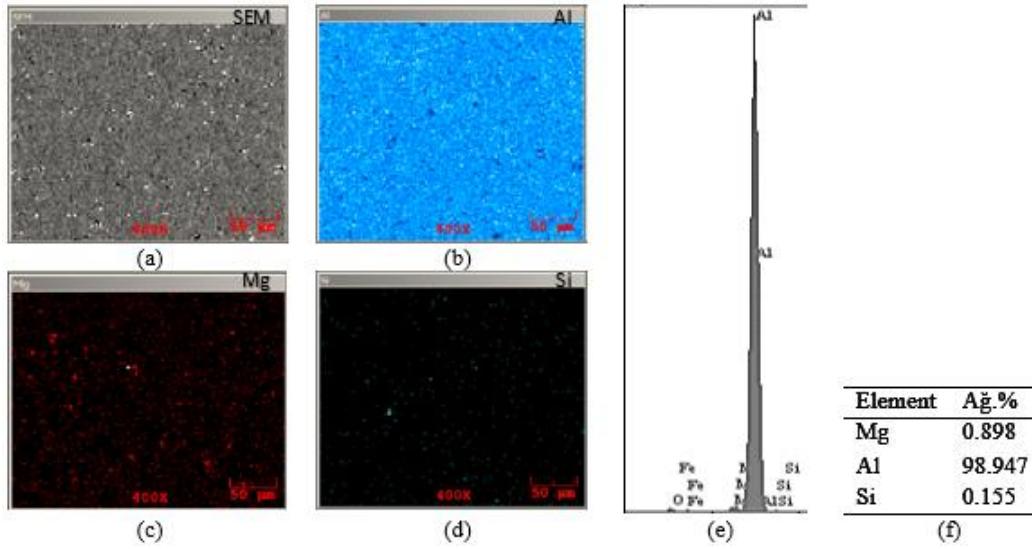


Şekil 6.17. 1.2 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması.

Birinci TIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre mukavemet artırıcı görevi olan Mg'nin, kaynak tamiraty yapılmayan numuneye göre (ağ. % 1.634'den 1.325'lere) azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.18. 3.1 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması.



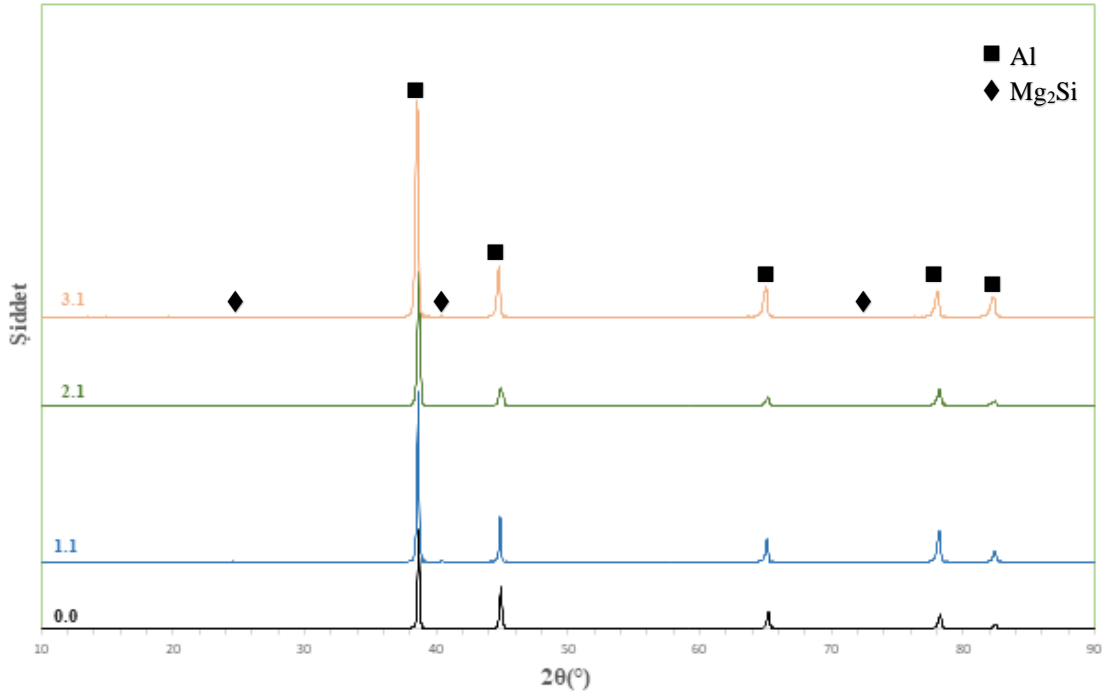
Şekil 6.19. 3.2 kodlu numunenin genel EDS analizi ve elementel haritalaması.

Üçüncü MIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre mukavemet artırıcı alaşım elementi katkısı olan Mg'nin, artan ısı girdisiyle beraber birinci MIG kaynağı tamiratına göre azaldığı görülmektedir. Artan ısı girdisinin Mg_2Si çökeltilerinin çözünmesine neden olduğu düşünülmektedir. Üçüncü TIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre mukavemet artırıcı Mg'nin, artan ısı girdisiyle beraber birinci TIG kaynağı tamiratına göre daha da azaldığı görülmektedir. TIG kaynağı tamiratında ısı girdisi MIG kaynağına göre daha fazla olduğundan Mg'nin TIG kaynağında daha fazla çözülmeye uğradığı tespit edilmiştir. Bu durum aynı zamanda çekme mukavemetlerindeki düşüşün de sebebi olarak belirtilebilir.

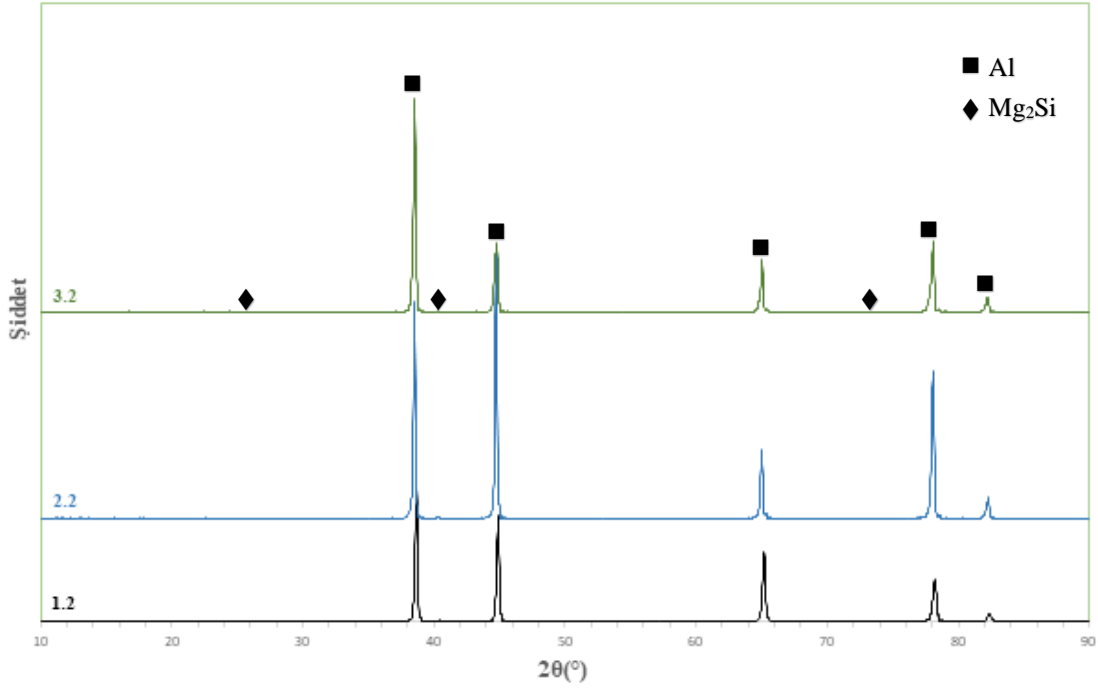
Hirose ve arkadaşları 1999'da 6061-T6 için lazer kaynağının ısıdan etkilenen bölge üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kaynak işlemi sırasında daha fazla ısı girdisi ITAB bölgesinde daha düşük sertlik değerine neden olduğundan ısı girdisinin en düşük olduğu bir kaynak işlemi istenmektedir. Kaynak sırasında yüksek ısı girdisinin dalgalanması ITAB'daki çökeltilerin çözünmesine neden olmaktadır sonucuna varmışlardır [3]. Mevcut çalışmada da artan ısı girdisiyle birlikte Mg_2Si miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

6.2.6. XRD sonuçları

MIG kaynağı yapılan numunelerin XRD analizleri Şekil 6.20'de TIG kaynağı yapılan numunelerin XRD analizleri Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.20. 0.0, 1.1, 2.1 ve 3.1 kodlu MIG kaynak numunelerine ait XRD analizi.



Şekil 6.21. 1.2, 2.2 ve 3.2 kodlu TIG kaynak numunelerine ait XRD analizi.

XRD sonuçlarında en şiddetli alüminyum pikleri ile birlikte, Mg_2Si fazının ise düşük şiddette bir pik verdiği gözlemlenmiştir. XRD analizinde yapıda herhangi oksitli bileşiğe rastlanmamıştır. Shrivastava ve çalışma ekibi Al-6061 alaşımına nano boyutta katılan alüminanın etkisini inceledikleri çalışmalarında, T6 ısıl işlem şartlarında Mg_2Si çökelti fazının oluştuğunu göstermişlerdir [53]. Çalışma sonuçlarında olduğu gibi mevcut çalışmada kullanılan T6 işlemi görmüş AA 6061 alaşımında da Mg_2Si fazları tespit edilmiş olup tamirat sayısı arttıkça bu fazın çözünerek azalması neticesinde hem sertlik hem de mukavemet değerlerinde düşme olduğu belirlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

4mm kalınlığındaki AA6061 serisi alüminyum levhalar MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve numunelerin tahribatsız testleri, mikroyapı incelemeleri, mekanik testleri, EDS ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. MIG kaynak yapılmış numuneler taşlanarak 1., 2., ve 3. tamiratları hem MIG hem de TIG kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonunda elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir:

1. Gözle muayene sonuçlarına göre kaynakta herhangi bir probleme rastlanmamıştır. Kaynak kep ve kök yükseklikleri kabul seviyesindedir. Kaynak işleminin kullanım yerine göre mukavemet değeri değilde görselliğin kabul görmesi istenilen yerlerde TIG kaynağı bir adım öne geçmektedir.
2. Penetrant muayene sonuçlarına göre MIG kaynağında tamirat sayısı arttıkça kaynak yüzeyindeki gözeneklenmenin de arttığı görülmüştür.
3. Radyografik muayene sonuçlarına göre kaynak dikişlerinde herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.
4. Makro inceleme sonuçlarında gözeneklenmenin daha çok kök bölgesinde olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin kaynak öncesi temizlik işleminin yetersiz olmasından kaynaklandığı ve gözenek dağılım ve boyutlarının kabul kriterlerinin içinde olduğu değerlendirilmiştir. Üçüncü tamiratlar sonucunda kaynak kökünde görülen kılcal çatlakların, artan ısı girdisi ve termal genleşmelerin etkisiyle olduğu düşünülmektedir.
5. Mikroyapı görüntülerindeki ana metalde görülen koyu siyah parçacıklar Mg_2Si taneciklerini temsil etmektedir. Dolgu metali ER5356 olduğundan kaynak yapısının içinde de Mg_2Si tanecikleri mevcuttur. Isı girdisi arttıkça tane boyutlarında da artış görülmüştür. Tamir sayısı arttıkça ITAB bölgesindeki tanelerde irileşme görülmektedir.
6. Uygulanan tamir işlemleri ve mekanik mukavemet testleri doğrultusunda malzemeye tamir işlemi uygulandıkça çekme mukavemetlerinde düşüş

görülmüştür. Tablo 6.1'e göre kaynak tamiratyyla birlikte akma ve çekme mukavemet değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca tablolardaki veriler incelendiğinde MIG kaynağının çekme mukavemetinin TIG kaynağının çekme mukavemetinden daha fazla olduğu görülmüştür. MIG kaynağında en düşük çekme muavemeti 180 MPa (3.1 kodlu numune), TIG kaynağında ise 175 MPa (3.2 kodlu numune) olarak ölçülmüştür. 3. TIG kaynak tamiri sonucunda çekme mukavemet değeri suni yaşlandırılmış malzeme için kabul kriterlerinin dışına çıkmıştır. Çekme deneyinde bütün kopmalar ITAB bölgesinden gerçekleşmiştir. 6061 T6 alüminyum alaşımının kaynağında ısıdan etkilenen bölgelerde mukavemet arttırıcı (Mg_2Si) çökeltilerinin çözünmesinin mekanik özelliklerde düşüşe yol açtığı düşünülmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

7. Eğme testi sonuçlarında ise malzemede herhangi bir kırılma veya çatlığa rastlanmamıştır.
8. Isı girdileri MIG kaynağında 214 J/mm, TIG kaynağında ise 285 J/mm civarında hesaplanmıştır.
9. Alınan sonuçlara bakarak çıkarılan bir diğer sonuç ise TIG kaynağı malzemeye daha fazla fiziksel hasar vermektedir. Isı girdisinin daha fazla olmasından ötürü TIG kaynağı ile yapılan tamiratlardan sonra malzemede daha fazla yamulma (distorsiyon, çarpılma) gözlemlenmiştir.
10. Sertlik deneyi sonuçlarına göre en yüksek sertlik değerinin ana malzemede, daha sonra kaynak bölgesinde ve en düşük değer de ITAB bölgesinde olduğu görülmüştür.
11. XRD sonuçlarında yüksek şiddetteki alüminyum pikleri ile birlikte Mg_2Si 'nin ise düşük şiddette pikler verdiği gözlemlenmiştir. Yapıda herhangi oksitli bir bileşiğe rastlanmamıştır.
12. ITAB bölgelerinden alınan EDS analizi ve haritalama sonuçlarına göre artan tamirat sayısı ve ısı girdisiyle paralel olarak Mg miktarında düşüş görülmüştür. Çekme dayanımlarının ve sertlik değerlerinin de bu durumla ilişkili olarak azaldığı düşünülmektedir.

7.2. Öneriler

1. Farklı serilerde ve kalınlıklarda alüminyum levhalar kullanılarak aynı testler uygulanabilir.

2. Akım ve voltaj değerleri değiştirilerek kaynak işlemi yapılabilir. Buna bağlı olarak kaynağın mekanik özelliklerinde ve fiziksel görünümünde de farklılıklar meydana gelecektir.
3. ER5356 yerine ER4043 kaynak teli kullanılabilir. Buna bağlı olarak mukavemet değerlerinde ve gözeneklenmedeki farklılıklar gözlemlenebilir.
4. Yüksek saflıkta argon gazı yerine değişik oranlarda helyum ve argon gaz karışımı kullanılabilir. Buna bağlı olarak gözeneklenmede meydana gelebilecek farklılıklar incelenebilir.
5. Gazaltı kaynak haricinde sürtünme karıştırma kaynağı kullanılabilir ve ısı girdileri kıyaslanabilir.
6. Manuel kaynak yerine robotik kaynak yöntemi kullanılabilir. Artan ısı girdisiyle malzemede meydana gelen çarpılma miktarları karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kumar P., Arif A., Chiranjeevi V.S. Prasad A., Danaiah P., Kumar Singh A., Patro M., Kishore K.S., Murugan M. (2021). Study of Welding process parameter in TIG joining of Aluminum Alloy (6061). *Materials Today: Proceedings, Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.275>
- [2] Prakash J., Tewari S.P., Srivastava B.K. (2012). Shielding Gas For Welding of Aluminium Alloys by TIG/MIG Welding A Review. *International Journal of Modern Engineering Research (JMÉR)*, 1(2), 690-699.
- [3] Steves, D. (2010). *Characterization of Residual Stresses and Mechanical Performance of Gas Tungsten Arc Welded Aluminum Alloy 6061-T6* [Yüksek lisans tezi] Texas Tech University.
- [4] Davis, J.R. (2001) Aluminum and Aluminum Alloys. *Alloying: Understanding the Basics* (1th ed., pp. 351-416). Materials Park - ASM International.
- [5] Türköz Alıcı, M. (2019). *Soğuk metal transferi kaynağı ile birleştirilmiş 6061 ve 5754 alüminyum alaşımlarının kaynak sonrası ısıl işlemi* [Yüksek lisans tezi]. Manisa Celal Bayar Üniversitesi.
- [6] Chen, C.J. (2014). *Optimization of Mechanical Properties in A356 Via Simulation and Permanent Mold Test-bars* [Doktora tezi]. Case Western Reserve University.
- [7] Yıldırım, M.Ç. (2021). *Alüminyum MIG kaynak uygulamalarında pulse ve double-pulse metotlarının analizi ve karşılaştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- [8] Arhuman, Z. (2019). *Characterization of microstructure and mechanical behaviour of heat affected zones in robotic arc welding of AA6061-T6* [Yüksek lisans tezi]. École De Technologie Supérieure Université.
- [9] Şanseven, H.G. (2019) *Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin dikiş kalitesine etkileri* [Yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [10] Demir, K. (2020) *6061 T6 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi, mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi.
- [11] Kocaman, A.G., ve Demirel A. (2021) AA6061 T6 Alüminyum Alaşımında Bilyeli Dövme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(2), 49-58. DOI:10.53448/akuumbd.959091
- [12] Higgins, R. A. (2006). Alloys, Aluminum and its alloys. *Materials for Engineers and Technicians*. (3th ed; pp. 93-102, 216-229).

- [13] Miao, W., & Laughlin, D. (2000) Effects of Cu content and preaging on precipitation characteristics in aluminum alloy 6022. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31(2), 361-371. DOI:10.1007/s11661-000-0272-2
- [14] Pashley, D., Jacobs, M., & Vietz, J. (2006). The basic processes affecting two-step ageing in an Al-Mg-Si alloy, *Philosophical magazine*, 16(139), 51-76. <https://doi.org/10.1080/14786436708229257>
- [15] Gao, R.K., Stiller, K., Hansen, V., Oskarsson, A., & Danoix, F. (2002). Influence of aging conditions on the microstructure and tensile strength of aluminium alloy 6063, *Materials Science Forum*, 396-402(2), 1211-1216. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.396-402.1211
- [16] Tan, C. F., & Radzai, S. M. (2009). Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6, *Chiang Mai Journal of Science*, 36(3), 276-286.
- [17] Gómora, C., Ambriz, R., Curiel, F., & Jaramillo, D. (2017) Heat distribution in welds of a 6061-T6 aluminum alloy obtained by modified indirect electric arc, *Journal of Materials Processing Technology*, 243, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.003>
- [18] Myhr, O., Grong, Ø., Fjær, H., & Marioara, C. (2004). Modelling of the microstructure and strength evolution in Al–Mg–Si alloys during multistage thermal processing, *Acta Materialia*, 52(17), 4997-5008. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.07.002>
- [19] Verhoeven, J. D. (1975). *Fundamentals of physical metallurgy*. John Wiley & Sons Inc.
- [20] Hertzberg, R. W. (1996). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. Wiley.
- [21] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering*. John Wiley & Sons NY.
- [22] Bansal, R.K. (2010). *A textbook of strength of materials* (4th ed.) Laxmi Publications.
- [23] Khafaji, L. A. (2020). *The effect of welding methods in the weldment design on the distortions, hardness and stresses generation of steel type S355J2C+N* [Doktora tezi]. University of Turkish Aeronautical Association.
- [24] Kearns, W.H. (Ed.). (1984). Engineering, costs, quality and safety, *Welding Handbook*, (7th ed., pp 15). American Welding Society.
- [25] Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.) John Wiley & Sons.
- [26] Okay, S. (2016). *Investigation of mechanical property changes after MIG welding of (7XXX) series aluminum alloys* [Yüksek Lisans Tezi]. Middle East Technical University.
- [27] Elgaddafi, K. A. B. (2019). *Design and optimizations of metal inert gas welding process on different carbon steel alloys* [Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi.
- [28] Debeski, M. A. M. (2017). *The effect of different additional wires on the microstructure and mechanical properties of AISI 304L and AISI 430 stainless steels combined with TIG welding* [Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi.

- [29] Çelikten, E. (2021). *Robotik doğru akım ve robotik darbeli doğru akım kaynağının termomekanik haddelenmiş çelik malzemelerin sertlik ve mikroyapısı üzerine etkisinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.
- [30] Mathers, G. (2002). *The welding of aluminium and its alloys* (1th ed.). Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC.
- [31] Zhao, H., White, D. R., & DebRoy, T. (1999). Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys, *International Materials Reviews*, 44(6), 238-264. ASM International.
- [32] Pastor, M., Zhao, H., Martukanitz, R. P., & Debroy, T. (1999) Porosity, underfill and magnesium loss during continuous wave Nd:YAG laser welding of thin plates of aluminum alloys 5182 and 5754, *Welding Journal*, 78(6), 207-216.
- [33] Shore, R.J., & McCauley, R.B. (1970). Effects of porosity on high strength aluminum 7039, *Welding research supplement*, 311-321
- [34] Mendes da Silva, C. L., & Scotti, A. (2005). The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW, *Journal of Materials Processing Technology*, 171(3), 366-372 DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.07.008
- [35] Katayama, S., Kawahito, Y., & Mizutani, M. (2010). Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects, *Science Direct, Physics Procedia*, 5(part B), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.024>
- [36] Deekhunthod, R. (2004) *Weld Quality in Aluminium Alloys*.
- [37] Masubuchi, K. (1996). Prediction and controll of residual stresses and distortion in welded structures, *Tran JWRI* 25(2), 53-67.
- [38] Asle Zaeem, M., Nami, M.R., & Kadivar, M.H. (2007). Prediction of welding buckling distortion in a thin wall aluminum T joint, *Computational Materials Science*, 38(4), 588-594. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2006.03.016>
- [39] Rui, W., Zhen-xin, L., & Jian-xun, Z. (2008). Dynamic process of angular distortion between aluminum and titanium alloys with TIG welding, *Transaction of nonferrous metals society of China* 18(2), 233-239. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60042-4)
- [40] Zhou, G., Liu, X., Jin, C., Yang, J., & Fang, H. (2009). Welding deformation controlling of aluminum-alloy thin plate by two-direction pre-stress method, *Materials Science and Engineering:A*, 499(1-2) 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.122>
- [41] Lippold, J., Böllinghaus, T., & Cross, C.E. (2011). *Hot cracking phenomena*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, (pp. 3-99). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16864-2>
- [42] Kou, S. (2003). Solidification and Liquation Cracking Issues in Welding, *JOM, Overview Welding*, 55, 38-42. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0137-4>
- [43] Huang, C., & Kou, S. (2004). Liquation Cracking in Full-Penetration Al-Mg-Si Welds, *Supplement To The Welding Journal*, 83, 111-122.

- [44] Böllinghaus, T., & Herold, H. (2005). *Hot cracking phenomena in welds*, Springer Berlin Heidelberg New York.
- [45] Dwight, J. (1999). *Aluminium design and construction* (1st ed.) E & Fn Spon an imprint of routledge London and New York.
- [46] Kozola, B.D., & Shen, Y.L. (2003) A mechanistic analysis of the correlation between overall strength and indentation hardness in discontinuously reinforced aluminum, *Journal Of Materials Science*, 38, 901–907. <https://doi.org/10.1023/A:1022304621161>
- [47] Bhatia, A. Introduction to Welding and Non Destructive Testing (NDT). [https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Welding%20&%20Non-Destructive%20Testing%20\(NDT\)%20-%20R1.pdf](https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Welding%20&%20Non-Destructive%20Testing%20(NDT)%20-%20R1.pdf) adresinden 7 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [48] Gönül, E. Kaynaklı İmalatta Tahribatsız Muayene Ve Tahribatsız Muayene Metotları. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/NDT%20METHODS%20FOR%20WELDING_Rev02.pdf adresinden 7 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [49] T.C Milli Eğitim Bakanlığı, (2011). *Metal Teknolojisi, Tahribatsız Muayene 521MMI206* Ankara.
- [50] Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisliği Laboratuvarı, Sertlik Ölçme Deneyi Deney Föyü. [https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/BTU_Makine_Laboratuvar%C4%B1_Sertlik_Deney_Foyu\(1\).pdf](https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/BTU_Makine_Laboratuvar%C4%B1_Sertlik_Deney_Foyu(1).pdf) adresinden 7 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.
- [51] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı (2011). *Metal Teknolojisi, Tahribatlı Muayene 521MMI207* Ankara.
- [52] Akman, A. B. (2018). *Raylı sistem araçları imalatında kullanılan 6061 ve 5083 alaşımlarının TIG ve MIG kaynaklarının tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleriyle karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [53] Shrivastava, V., Gupta, G. K., & Singh, I. B. (2019). Heat treatment effect on the microstructure and corrosion behavior of Al-6061 alloy with influence of α -nanoalumina reinforcement in 3.5% NaCl solution, *Journal of Alloys and Compounds*, 775, 628-638. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.111>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa ARSLAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2023, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018'den günümüze kadar TÜRASAŞ (Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayii A.Ş.)'da üretim kontrol şube müdürlüğünde metalurji ve malzeme mühendisliği yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Arslan, M., ve Toplan, N. (2023). AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi. *Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM)*, 4(1), 333-354.