

754963

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**5XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TIG, MIG VE SÜRTÜMEN
ELEMEN İLE BİRLEŞTİRME KAYNAKLI BAĞLANTILARININ MEKANİK VE
MİKROYAPISAL ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Emel TABAN

Ana Bilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr.- Müh. Erdiñ KALUÇ

MAYIS 2004

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**5XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TIG, MIG VE SÜRTÜMEN
ELEMEN İLE BİRLEŞTİRME KAYNAKLI BAĞLANTILARININ MEKANİK VE
MİKROYAPISAL ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Emel TABAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Mayıs 2004

Tezin Savunulduğu Tarih: 30 Haziran 2004

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Erdiñç KALUÇ

(.....)

Üye

Prof. Dr. İbrahim UZMAN

(.....)

Üye

Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

(.....)

MAYIS 2004

5XXX SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TIG, MIG ve SÜRTÜNEN ELEMAN ile BİRLEŞTİRME KAYNAKLI BAĞLANTILARININ MEKANİK ve MİKROYAPISAL ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ

Emel TABAN

Anahtar Kelimeler: 5xxx Serisi Alüminyum Alaşımları, MIG, TIG, Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynağı, Mekanik Özellikler, Mikroyapı Özellikleri, Sertlik Taraması, Taramalı Elektron Mikroskobu.

Özet: Alüminyum ve alüminyum alaşımları; düşük yoğunlukları, yüksek mukavemetleri, iyi korozyon dirençleri ve uygun kaynak kabiliyetleri gibi bir araya gelmiş özellikleri dolayısı ile günümüzün en yaygın kullanılan yapı malzemeleridir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları; ergitme esaslı ve basınç esaslı (katı faz) kaynak yöntemleri ile birleştirilirler. TIG, MIG ve Plazma Ark (PAW) kaynak yöntemleri en çok tercih edilen başlıca ergitme esaslı yöntemleridir. Ancak, uygulanan ergitme esaslı bir kaynak yöntemi, kaynak bağlantısının kaynak bölgesinde, ısıdan etkilenmiş bölgede (IEB) ve kaynak metalinde (KM) dikkate alınması gereken bazı metalurjik çökeltilerin oluşmasına yol açmakta, bağlantıdan istenen mekanik özelliklerde düşmeler ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı için ergitme oluşturmaksızın gerçekleştirilebilecek bir yöntem arayışı sonucu 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) kaynağı bulunmuş ve geliştirilmiştir, böylece alüminyum alaşımı levhaların alın altına birleştirilmesi için yeni bir yöntem ortaya çıkmıştır. Bu yeni kaynak tekniğinde dönen ve ucunda vidalı pim bulunan bir takım kullanılır, uzun kaynak dikişleri esas metalde ergime olmaksızın gerçekleştirilir. Yöntem ergitme kaynak yöntemlerine göre birçok üstünlüğe sahiptir. Yöntemin başarılı uygulamaları sayesinde, havacılık, uzay, gemi yapım, raylı taşıt, zırhlı taşıt ve otomotiv endüstrilerindeki uygulama alanı genişlemiştir.

Bu çalışmada, AW-5083 ve AW-5086 alüminyum alaşımı levhalar bağlantının mekanik özellikleri ve mikroyapısal özelliklerini incelemek üzere endüstriyel ve laboratuvar koşullarında MIG, TIG ve FSW kaynak yöntemleri kullanılarak edilmişlerdir. Her kaynaklı levhadan alınan deney numunelerine çekme ve eğme deneyleri uygulanmış, kırılma yüzeyleri ve olası kaynak hataları ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile makroskobik olarak incelenmiştir. Kaynak bölgelerinin metalurjik dönüşümleri görmek üzere metalografik olarak MIG, TIG ve FSW kaynak yöntemleri uygulanmış numuneler üzerinde sırasıyla ışık mikroskobu ve Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak incelemeler yapılmış, her kaynaklı levhadan çıkarılan numunelerin kaynak bölge kesitinde Vickers sertlik taraması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, FSW kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin MIG ve TIG kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri ile eşdeğer hatta daha iyi oldukları saptanmıştır.

INVESTIGATION ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF TIG, MIG and FSW WELDED 5XXX SERIES ALUMINIUM ALLOYS

Emel TABAN

Key Words: Aluminium, Aluminium Alloys, 5xxx Series Aluminium Alloys, MIG Welding, TIG Welding, Friction Stir Welding (FSW), Mechanical Properties, Microstructural Properties, Hardness Measurements, Scanning Electron Microscopy (SEM).

Abstract: Aluminium and aluminium alloys are common structural materials due to their attractive combination of properties including low density, high strength, good corrosion resistance and proven weldability. Fusion and solid state welding processes are widely used for joining of aluminium and aluminium alloys. For general engineering applications, the three important methods for fusion welding of aluminium alloys are TIG, MIG and Plasma Arc (PAW) welding processes. As the joining of aluminium and its alloys using fusion welding techniques, there are some mechanical and metallurgical problems such as decreases in mechanical properties and metallurgical precipitations in both HAZ (Heat Affected Zone) and the weld metal (WM) of the weld zone to be considered. Consequently, the most significant solid state process for the welding of aluminium alloys to be developed is the friction stir welding (FSW) process that was invented at The Welding Institute (TWI) in 1991 and is capable to welding longitudinal seams in plates. The new technique applies using rotating shoulder tools with screwed pin enables long lengths of weld to be made without any melting taking place. This provides some important advantages compared with fusion welding processes. Despite being such a new process, FSW has been introduced to many applications with great success and is being actively investigated and used for applications in the aircraft, space vehicle, shipbuilding, railway, combat vehicle and automotive industries.

In this study, AW-5083 and AW-5086 aluminium alloy plates were welded using TIG, MIG and FSW welding processes in industrial and laboratory conditions in order to investigate mechanical and microstructural properties respectively. Tensile and bend tests were applied to specimens taken from each welded plates. Fracture surfaces were also examined using optic and scanning electron microscopes (SEM). As a metallurgical investigation, optic microscopy and Clemex Image Analysis System were used for TIG, MIG and FSW welded specimens weld zones. Measurements of hardness were carried out using the Vickers method with 50g test load on metallographic specimens taken from each welded joint. As a result, it has been observed that friction stir welded joints have so good mechanical properties and metallurgical properties as/ than TIG and/or MIG welded joints.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

5xxx serisi alümiyum alaşımlarının TIG, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi adlı bu güncel çalışmayı öneren, çalışmalarım sırasında sürekli olarak beni destekleyerek yönlendiren ve hatta deneysel aşamaların bir çoğunda bizzat ilgilenecek her türlü yardımda bulunan hocam Sayın Prof. Dr. Erdiç KALUÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. O olmasa olmazdı. Çalışmam sırasında Makina Mühendisliği Laboratuvarlarının tüm olanaklarını kullanmamı sağlayan Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı, hocam Sayın Prof. İbrahim UZMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney malzemelerimin sağlanmasında ve MIG, TIG kaynaklı bağlantıların gerçekleştirilmesinde gerekli tüm yardımı veren FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. İmalat Hizmetleri Müdürü Sayın A. Fevzi TUVAY'a, Sayın Melih ŞAHİN'e, Sayın Özgür AKÇAM'a, Sayın Cengiz SENYEN'e ve kaynak operatörlerine, FSW kaynaklarının gerçekleştirilmesinde ve mekanik deney numunelerinin hazırlanmasında emeği geçen teknisyen Sayın Abdülkadir YAYLA'ya, takım malzemelerinin sağlanmasında Sayın Arş. Gör.- Mak. Y. Müh. Şule ŞİRİN'e ve konu ile ilgili Avrupa standartlarının sağlanmasında yardımcı olan TÜBİTAK UME'den Sayın Dr.- Müh. Bülent AYDEMİR'e çok teşekkür ederim. Metalografik deney numunelerinin hazırlanması aşamalarında gerek metalografik sarf malzemelerinin sağlanmasında ve gerekse de kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu ile incelenerek fotoğraflanmasında destek veren Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Şadi KARAGÖZ'e, Uzman Sayın Serap GÜMÜŞ'e ve Kimya Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Nilgün AKIN'a, ve asistanı Arş. Gör. Meltem YILDIZ'a, ALS Ltd. Şti'nden Sayın Murat SERDAROĞLU'na, Clemex Görüntü Analiz sisteminin kurulması ve kullanılmasında eğitim veren HİTAŞ A.Ş.yetkililerinden Met. Müh. Hikmet AKSOY'a, çekme ve sertlik cihazlarının kullanımını öğreten Sayın Yrd. Doç. Dr. Armağan ARICI'ya, yazıcıların sarf malzemelerinin sağlanmasında destek veren Sayın Dr.-Müh. Kahraman ŞİRİN'e, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan programların sağlanması ve öğretilmesinde destek veren Prof. Dr. Muharrem YILMAZ'a ve Sayın Arş. Gör. Dr. - Müh. Tülin ŞAHİN'e de teşekkürlerimi borç bilirim. Tezimin yapılması sırasında konunun önemini, KOÜ Haber ve yerel basına taşıyan KOÜ Basın ve Halkla İlişkiler Bölümü'nün değerli çalışanlarına, gazetelerinde konuya yer vererek, önemini ülke kamuoyuna açıklayan Kocaeli Gazetesi ve Bizim Kocaeli Gazetesi yetkililerine, tezimin yazım aşamasında yazıcı sağlayarak destek veren Ark Otomotiv A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Ali Rıza KASIM'a ve Robosis firması yetkililerinden Sayın Salih GÜÇBİLMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bana her türlü desteği sunan canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin sonuçlarının tüm bilim dünyasına ve ülke endüstrisine yararlı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
TABLolar LİSTESİ.....	xxi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. ALÜMİNYUM ve ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	5
2.1. Alüminyumun Eldesi ve Özellikleri.....	5
2.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları.....	10
2.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması ve Uygulanan Sertleştirme İşlemlerine Göre Simgelendirme.....	13
2.3.1. Dövme alüminyum alaşımları.....	13
2.3.1.2. Dövme alüminyum alaşımlarının türlerinin incelenmesi.....	26
2.3.1.2.1. 1xxx serisi alaşımlar.....	27
2.3.1.2.2. 2xxx serisi alaşımlar.....	28
2.3.1.2.3. 3xxx serisi alaşımlar.....	28
2.3.1.2.4. 4xxx serisi alaşımlar.....	28
2.3.1.2.5. 5xxx serisi alaşımlar.....	29
2.3.1.2.6. 6xxx serisi alaşımlar.....	30
2.3.1.2.7. 7xxx serisi alaşımlar.....	30
2.3.1.3. Dövme alüminyum alaşımlarının önemli türleri...	31
2.3.2. Döküm alüminyum alaşımları.....	32
2.4. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Kollarında Kullanımı.....	34
2.4.1. Otomotiv endüstrisi.....	34

2.4.2.	Gemi yapım endüstrisi.....	35
2.4.3.	Eğlence ve spor malzemeleri yapım endüstrisi.....	36
2.4.4.	Taşımacılık ve konteyner yapım endüstrisi.....	36
2.4.5.	Savunma ve havacılık endüstrisi.....	36
BÖLÜM 3. ALÜMİNYUM ve ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ		
	KAYNAK KABİLİYETİ.....	38
3.1.	Giriş.....	40
3.2.	Kaynak Kabiliyeti.....	35
3.2.1.	Ergime bölgesi:.....	41
3.2.2.	Isıdan etkilenmiş bölge.....	43
3.3.	Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliği.....	54
BÖLÜM 4. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARINA UYGULANAN		
	KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	57
4.1.	Genel.....	57
4.2.	Alüminyum ve Alaşımlarının MIG Kaynağı.....	60
4.2.1.	Yöntemin tanıtımı.....	60
4.2.1.1.	MIG kaynak akım üreteçleri.....	63
4.2.1.1.1.	Motor generetör tipi akım üreteçleri.....	67
4.2.1.1.2.	Redresör türü akım üreteçleri.....	67
4.2.1.1.3.	Sinerjik darbeli akım üreteçleri.....	68
4.2.1.1.4.	İnverter türü akım üreteçleri.....	68
4.2.2.	MIG kaynak torçları.....	70
4.2.3.	MIG kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazlar.....	72
4.2.3.1.	Soy gazlar.....	73
4.2.3.1.1.	Argon.....	73
4.2.3.1.2.	Helyum.....	74
4.2.3.1.3.	Karışım gazlar.....	74
4.2.4.	Alüminyumun MIG kaynağında kaynak telleri.....	76
4.2.5.	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı için kullanılan kaynak ağızlarının hazırlanması	77
4.2.6.	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına MIG kaynağının uygulanması.....	84
4.3.	Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağı.....	86

4.3.1.	Yöntemin tanıtımı.....	86
4.3.1.1.	TIG kaynak donanımı.....	88
4.3.1.1.1.	Kaynak torçları.....	89
4.3.1.1.2.	TIG kaynak elektrodları.....	90
4.3.1.1.3.	Koruyucu gaz donanımı.....	92
4.3.1.1.4.	TIG yönteminde kullanılan koruyucu gazlar.....	92
4.3.1.1.5.	TIG kaynak yönteminde kullanılan akım üreteçleri.....	93
4.3.1.2.	TIG kaynak yönteminde kaynak ağızlarının hazırlanması.....	95
4.3.1.3.	TIG kaynak yöntemi için kaynak dolgu metali.....	97
4.3.1.3.	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına TIG kaynağının uygulanması.....	97
4.4.	Alüminyum ve Alaşımlarının Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynağı.....	102
4.4.1.	Yöntemin tanıtımı.....	102
4.4.1.1.	Yöntemin üstünlükleri ve sınırlamaları.....	105
4.4.1.2.	Yöntemin uygulama alanları.....	107
4.4.1.3.	Yöntemin uygulanması.....	115
4.4.1.3.1.	Yöntemin uygulama ortamı.....	115
4.4.1.3.2.	Kaynak parametreleri.....	115
4.4.1.3.2.1.	Takım malzemeleri.....	115
4.4.1.3.2.2.	Takım tasarımı.....	116
4.4.1.3.2.3.	Kaynak hızı.....	117
4.4.1.3.2.4.	Yöntemin uygulandığı malzemeler ve kalınlıklar.....	117
4.4.1.3.3.	Birleştirme türleri.....	118
4.4.2.	Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanması üzerine yapılan çalışmalar.....	119
BÖLÜM 5.	ÇALIŞMALARIN AMACI ve PLANLAMASI.....	140
BÖLÜM 6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	143

6.1.	Genel.....	143
6.2.	Deney Malzemesi.....	143
6.3.	Deney Parçalarının Boyutları.....	143
6.4.	Kaynak Öncesi Yapılan İşlemler.....	145
6.5.	Kaynak İşlemlerinin Yapılışı.....	145
6.5.1.	MIG kaynak yönteminin uygulanması.....	145
6.5.1.1.	MIG kaynağında kullanılan tel elektrod.....	146
6.5.1.2.	MIG kaynağında kullanılan koruyucu gaz.....	146
6.5.1.3.	MIG kaynağında kullanılan kaynak parametreleri ..	146
6.5.2.	TIG kaynak yönteminin uygulanması.....	147
6.5.2.1.	TIG kaynağında kullanılan tel elektrod.....	147
6.5.2.2.	TIG kaynağında kullanılan koruyucu gaz.....	147
6.5.2.3.	TIG kaynağında kullanılan kaynak parametreleri....	148
6.5.3.	FSW (Sürtünen eleman ile birleştirme) kaynak yönteminin uygulanması.....	148
6.5.3.1.	FSW yönteminde kullanılan takım.....	150
6.5.3.2.	FSW yönteminde kullanılan kaynak parametreleri.	150
6.6.	Kaynaklı Levhaların Görsel İncelenmesi.....	151
6.7.	Deney Numunelerinin Hazırlanma Esasları.....	152
6.7.1.	Deney numunelerinin kodlanması.....	152
6.7.1.1.	Kaynak yöntemi kodu.....	152
6.7.1.2.	Alüminyum alaşım türü.....	153
6.7.1.3.	Deney türü.....	153
6.7.1.4.	Numune sayısı.....	153
6.7.2.	Kaynaklı levhalardan deney numunelerinin çıkarılması.....	154
6.7.2.1.	Çekme deney numuneleri.....	157
6.7.2.2.	Eğme deney numuneleri.....	157
6.7.2.3.	Metalografi incelemeleri ve sertlik taraması için numune hazırlanması.....	158
6.8.	Deneilerin Yapılışı.....	158
6.8.1.	Çekme deneyleri.....	158
6.8.2.	Eğme deneyleri.....	158
6.8.3.	Metalografik inceleme deneyleri.....	159

6.8.4. Vickers sertlik taraması.....	160
BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ.....	162
7.1. Görsel İnceleme Sonuçları.....	162
7.2. Çekme Deneyi Sonuçları.....	164
7.3. Eğme Deneyi Sonuçları.....	174
7.4. Metalografik İnceleme Sonuçları.....	176
7.5. Mikrosertlik İnceleme Sonuçları.....	191
7.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	194
7.6.1. Görsel inceleme sonuçlarının irdelenmesi.....	194
7.6.2. Çekme deneyi sonuçlarının irdelenmesi.....	195
7.6.3. Eğme deneyi sonuçlarının irdelenmesi.....	196
7.6.4. Metalografik inceleme sonuçlarının irdelenmesi.....	197
7.6.5. Kaynak kesitlerinde mikrosertlik taraması sonuçlarının irdelenmesi.....	200
BÖLÜM 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	202
KAYNAKÇA.....	204
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER.....	214
ÖZGEÇMİŞ.....	216

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANSI	: American National Standard Institute
AW	: Aluminium Wrought
AWS	: American Welding Society
cm	: Santimetre
dak	: Dakika
EM 1	: Esas Metal 1
EM 2	: Esas Metal 2
EM	: Esas Metal
EN	: European Norms
F11C1	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
F11C2	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
F11C3	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
F11EK1	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
F11EK2	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
F11EY1	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
F11EY2	: EM 1- EM 1 FSW Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
F12C1	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
F12C2	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
F12C3	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
F12EK1	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
F12EK2	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
F12EY1	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
F12EY2	: EM 1- EM 2 FSW Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
F22C1	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
F22C2	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
F22C3	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
F22EK1	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
F22EK2	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi

F22EY1	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
F22EY2	: EM 2- EM 2 FSW Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
feet	: İngiliz Uzunluk Birimi (1 feet= 30 cm)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünen Eleman İle Kaynak Yöntemi)
HV	: Hardness Vickers
IEB	: Isıdan Etkilenmiş Bölge
ISO	: International Standards Organisation
KM	: Kaynak Metali
M11C1	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
M11C2	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
M11C3	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
M11EK1	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
M11EK2	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
M11EY1	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
M11EY2	: EM 1- EM 1 MIG Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
M12C1	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
M12C2	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
M12C3	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
M12EK1	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
M12EK2	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
M12EY1	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
M12EY2	: EM 1- EM 2 MIG Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
M22C1	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
M22C2	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
M22C3	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
M22EK1	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
M22EK2	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
M22EY1	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
M22EY2	: EM 2- EM 2 MIG Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
MAG	: Metal Active Gas
Met	: Metalografik Deney Numunesi
MIG	: Metal Inert Gas
mm	: Milimetre

MPa	: MegaPascal
N/ mm ²	: Newton/ mm ²
R _m	:Maksimum Çekme Mukavemeti
R _{p0.2}	: Akma Mukavemeti
s	: Saniye
T11C1	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
T11C2	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
T11C3	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
T11EK1	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
T11EK2	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
T11EY1	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
T11EY2	: EM 1- EM 1 TIG Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
T12C1	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
T12C2	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
T12C3	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
T12EK1	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
T12EK2	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
T12EY1	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
T12EY2	: EM 1- EM 2 TIG Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
T22C1	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 1. Çekme Deney Numunesi
T22C2	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 2. Çekme Deney Numunesi
T22C3	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 3. Çekme Deney Numunesi
T22EK1	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 1. Kök Eğme Deney Numunesi
T22EK2	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 2. Kök Eğme Deney Numunesi
T22EY1	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 1. Yüz Eğme Deney Numunesi
T22EY2	: EM 2- EM 2 TIG Kaynaklı 2. Yüz Eğme Deney Numunesi
TIG	: Tungsten Inert Gas
TMEB	: Termomekanik Etkilenmiş Bölge
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
TWI	: The Welding Institute

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.-	Cu- Al alaşım sisteminin alüminyumca zengin olan kısmını gösterir faz diyagramı.....	11
Şekil 2.2.-	Al- Mn sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösteren faz diyagramı.....	11
Şekil 2.3.-	Al- Si alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı.....	12
Şekil 2.4.-	Al- Mg alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı.....	12
Şekil 2.5.-	Al- Mg ₂ Si alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı.....	13
Şekil 2.6.-	Al- Zn alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı.....	13
Şekil 3.1.-	Kaynak dikişinin ısıdan etkilenen bölgesinde oluşan soğuk çatlak.	39
Şekil 3.2.-	Kaynak metalinin katılma evreleri.....	42
Şekil 3.3.-	Çeşitli tür metal ve alaşımlarının kaynağında IEB’de ortaya çıkabilecek iç yapılar.....	43
Şekil 3.4.-	Kaynak kabiliyetinin malzeme, üretim yöntemi ve konstrüksiyona bağlılığının gösterilmesi.....	47
Şekil 3.5.-	Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler.....	48
Şekil 3.6.-	6 mm kalınlığında TIG kaynaklı bir parçada, çok ince dağılmış gözenekler.....	50
Şekil 3.7.-	Alüminyumda hidrojenin çözünebilirliği.....	50
Şekil 3.8.-	Köşe kaynağında alüminyum oksit filminin yarattığı olumsuz etki.....	51
Şekil 3.9.-	Soğuk biçimlendirilmiş alaşımda mukavemet üzerine kaynağın etkisi.....	53

Şekil 3.10.-	Yaşlandırma ile sertleştirilmiş 6061- T6 alüminyum alaşımında kaynaklı durumda kaynak ısı girdisinin sertlik ve mukavemet üzerine etkisi.....	54
Şekil 4.1.-	MIG kaynak yönteminde ark bölgesi.....	60
Şekil 4.2.-	MIG kaynağı donanım blok şeması.....	61
Şekil 4.3.-	Kaynak akım üreteçlerinde volt- amper karakteristikleri.....	63
Şekil 4.4.-	Sabit gerilimli akım üretecinde ark boyunun kaynak süresince sabit kalması.....	65
Şekil 4.5.-	MIG kaynağında kutuplamanın etkisi.....	66
Şekil 4.6.-	İnverter türü akım üreteçlerinin prensibi ve alışılmış akım Üreteçleri ile karşılaştırılması.....	69
Şekil 4.7.-	Çekmeli tür bir torç.....	71
Şekil 4.8.-	Hava soğutmalı kuğu boynu tür bir torç kesiti ve torç bağlantı paketi.....	71
Şekil 4.9.-	TIG kaynak yönteminde ark bölgesi.....	86
Şekil 4.10.-	TIG kaynak donanımı prensip şeması.....	88
Şekil 4.11.-	Bir TIG kaynak torcunun parçalar.....	89
Şekil 4.12.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının TIG kaynağı için kullanılan bazı kaynak ağız biçimleri.....	96
Şekil 4.13.-	TIG kaynağında parça kalınlığı ve argon sarfıyatı arasındaki ilişki.....	98
Şekil 4.14.-	Al ve alaşımlarının TIG kaynağı için gerekli veriler.....	99
Şekil 4.15.-	TIG kaynağında kaynak dikiş biçimine göre torcun pozisyonu.....	100
Şekil 4.16.-	TIG kaynağında kaynak dikiş biçimine göre torcun pozisyonu.....	101
Şekil 4.17.-	Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi prensibi.....	103
Şekil 4.18.-	Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminde işlem sırası.....	103
Şekil 4.19.-	Sürtünen eleman ile birleştirme yönteminin gerçekleştirilmesi.....	104
Şekil 4.20.-	FSW yöntemi kullanılarak kaynak edilebilecek tasarım örnekleri.....	107

Şekil 4.21.-	Boeing yapımında FSW yönteminin kullanımı.....	108
Şekil 4.22.-	Boeing’de FSW yönteminin kullanılması.....	108
Şekil 4.23.-	FSW yöntemi kullanılarak boyuna ve çevresel Kaynakları yapılan kriyojenik tank resmi.....	109
Şekil 4.24.-	Bir zırhlı taşıt resmi.....	109
Şekil 4.25.-	FSW yöntemi kullanılan yüksek hızlı katamaran türü deniz taşıtı.....	110
Şekil 4.26.-	Yüksek hızlı tren gövdelerinde kullanılan alüminyum alaşımı geniş ekstrüzyon paneller.....	110
Şekil 4.27.-	Hitachi tarafından yapılan, tek taraftan tüm uzunluk boyunca FSW kaynağı yapılmış olan bir tren.....	111
Şekil 4.28.-	Hitachi tarafından yapılan, çift taraftan tüm uzunluk boyunca FSW kaynağı yapılmış olan bir hızlı tren.....	111
Şekil 4.29.-	Japonya’da taban panellerinin kaynağının FSW yöntemi ile Sumitomo hafif metal firmasında yapılan Shinkansen tipi 700 standard yüksek hızlı bir tren.....	111
Şekil 4.30.-	Saatte 170 mil hız yapabilen E3 türü yüksek hızlı tren.....	111
Şekil 4.31.-	Norveç’te Hydro Marine Aluminium’da 6 yıldır Kullanımda olan ilk FSW üretim platformu.....	112
Şekil 4.32.-	İsveç’te, Sapa’da bulunan FSW kaynak hattı.....	112
Şekil 4.33.-	Norveç’te Hydro Aluminium Profiles firmasında motor gövdelerinin yapımında kullanılan bir FSW hattı.....	113
Şekil 4.34.-	FSW yöntemi kullanılarak kaynak edilmiş alüminyum panel görüntüsü.....	113
Şekil 4.35.-	FSW yönteminde kullanılan pimi vida açılmış bir takım görüntüsü.....	116
Şekil 4.36.-	Helezonik bir takım.....	116
Şekil 4.37.-	Üç yivli bir takım.....	116
Şekil 4.38.-	Triveks bir takım.....	117
Şekil 4.39.-	MX Triveks bir takım ve Whorl tür bir takım.....	117
Şekil 4.40.-	Farklı omuz biçimlerine örnekler.....	117
Şekil 4.41.-	50 mm kalınlığında alüminyum parçaların çift taraftan FSW kaynaklı hali.....	118

Şekil 4.42.-	Sürtünen elemanla birleştirme kaynağı uygulanarak gerçekleştirilen birleştirmeler.....	119
Şekil 4.43.-	FSW yöntemi uygulanmış 6.4 mm kalınlığındaki 6082 alüminyum alaşımında kaynağın makro yapısı.....	120
Şekil 4.44.-	2014- T6 alüminyum alaşımına yapılan FSW kaynağı sonrasındaki eğme ve çekme deney parçaları.....	120
Şekil 4.45.-	5083- O alüminyum alaşımına yapılan FSW kaynağı sonrasındaki eğme ve çekme deney parçaları.....	120
Şekil 4.46.-	6082- T6 alüminyum alaşımına yapılan FSW kaynağı Sonrasındaki eğme ve çekme deney parçaları.....	121
Şekil 4.47.-	Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi uygulanmış ve uygulanmamış alüminyum alaşımlarının yorulma deneyi sonuçları.....	122
Şekil 4.48.-	6.4 mm kalınlığında FSW kaynaklı bağlantıların tipik makro kesitleri.....	122
Şekil 4.49.-	FSW yöntemi ile kaynak sonrasında kaynak bölgesinde oluşan yapısal bölgeler.....	123
Şekil 4.50.-	7075- T7351 alaşımı için termomekanik olarak etkilenmiş bölgenin mikroyapısı.....	124
Şekil 4.51.-	7075- T7351 alaşımı için kaynak metali mikroyapısı.....	124
Şekil 4.52.-	7075- T7351 alaşımı için esas metal mikroyapısı.....	124
Şekil 4.53.-	FSW kaynağı yapılmış çeşitli alaşımların sertlik dağılımları.....	125
Şekil 4.54.-	FSW yöntemi ile kaynağı yapılmış 7075-T6 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin TEM görüntüleri.....	126
Şekil 4.55.-	Modifiye edilmiş 1100 alaşımı döküm ve % 50 oranında soğuk haddelenmiş durumda FSW yöntemi ile kaynaktan sonra kaynak bölgesinin sertlik dağılımı.....	126
Şekil 4.56.-	FSW yöntemi kullanılarak Amerikan Deniz Kuvvetleri için üretimi tasarlanan İleri Ampifik Personel Taşıyıcı.....	127
Şekil 4.57.-	AA 2519- T87 alüminyum alaşımının sürtünen elemanla birleştirme kaynağı için geliştirilen kesik koni pimli çift parçalı takımın tasarımı.....	128

Şekil 4.58.-	AA 2519- T87 alaşımı 25 mm ve 50 mm kalınlıklardaki levhalarda köşe kaynak birleştirmesi tasarımı.....	128
Şekil 4.59.-	AA 2519- T87 alaşımı 25 mm ve 50 mm kalınlıklardaki levhalarda FSW yöntemi uygulanmış köşe birleştirmesi.....	129
Şekil 4.60.-	FSW yöntemiyle kaynak edilmiş 6061-T6 alaşımının kaynak bölgesinden alınmış ışık mikroskobu ve TEM görüntüleri.....	130
Şekil 4.61.-	FSW yöntemiyle kaynak edilmiş 2024- 6061 alüminyum alaşım çiftinde kaynak bölgesi makro yapısı ve mikro yapıları.....	131
Şekil 4.62.-	FSW yöntemiyle kaynak edilmiş 2024- 6061 alüminyum alaşım çiftinde kaynak bölgesi mikro yapıları.....	133
Şekil 4.63.-	AA 5083 alüminyum alaşımına dair yapılan bir çalışmadan alınan makroyapı görüntüleri.....	137
Şekil 4.64.-	AA 5083 alüminyum alaşıma ait bir çalışmadan alınan sertlik dağılımları.....	137
Şekil 6.1.-	Kaynak edilecek levhaların boyutları (EN 288-4).....	143
Şekil 6.2.-	Yatay oluk pozisyonunda I-alın kaynaklı deney parçası boyutları.....	144
Şekil 6.3.-	Boyutları Şekil 6.2’de verilmiş levhaların kaynak edilmiş durumu (TIG kaynak yöntemi uygulanmış).....	144
Şekil 6.4.-	MIG kaynağı uygulanmış deney parçaları.....	145
Şekil 6.5.-	TIG kaynağı yapılmış deney parçaları.....	147
Şekil 6.6.-	Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağında parçaların rijit olarak bağlanması ve kaynak işleminin yapılışı.....	148
Şekil 6.7.-	Universal freze tazgahında sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının (FSW) gerçekleştirilmesi.....	149
Şekil 6.8.-	FSW kaynağı yapılmış deney parçaları.....	149
Şekil 6.9.-	FSW yöntemi uygulanarak yapılan deneylerde kullanılan takımların görünümü.....	150
Şekil 6.10.-	MIG kaynağı yapılmış bir deney parçasının dikiş görünümü	151
Şekil 6.11.-	TIG kaynağı yapılmış bir deney parçasında dikiş görünümü.....	151

Şekil 6.12.-	FSW kaynağı yapılmış bir deney parçasının dikiş görünümü.....	152
Şekil 6.13.-	Kaynaklı bir levhada gözlenen çarpılmaya ait bir örnek.....	152
Şekil 6.14.-	EN 288-4'e göre kaynaklı levhalardaki numune dağılım planı.....	154
Şekil 6.15.-	Kaynaklı levhalardan deney numunelerinin kodlanarak çıkarılması.....	155
Şekil 6.16 .-	MIG, TIG ve FSW kaynaklı levhalardan numunelerin işaretlenmesine ait fotoğraflar.....	156
Şekil 6.17.-	EN 895' e uygun olarak hazırlanmış çekme deney parçasının boyutları.....	157
Şekil 6.18.-	EN 910' a uygun olarak hazırlanmış eğme deney parçası boyutları.....	157
Şekil 6.19.-	Çekme deneyi uygulanmış bir deney numunesi görüntüsü.....	158
Şekil 6.20.-	Kaynak dikişlerinin eğme deneyi uygulanma prensibi.....	159
Şekil 6.21.-	Eğme deneyi uygulanmış bir deney numunesi görüntüsü.....	159
Şekil 6.22.-	Mikrosertlik taraması yapılmış bir deney numunesinin makro görüntüsü.....	160
Şekil 7.1.-	MIG kaynaklı bağlantılarda çarpılma örneği.....	162
Şekil 7.2.-	TIG kaynaklı bağlantılarda çarpılmaya bir örnek.....	163
Şekil 7.3.-	FSW yöntemi uygulanarak kaynak edilmiş bir bağlantıdan alınmış dikiş görünümü.....	164
Şekil 7.4.-	FSW yöntemi uygulanarak kaynak edilmiş bir deney parçasında çarpılma oluşmadığını gösterir fotoğraf.....	164
Şekil 7.5.-	Esas metallere çıkarılan, çekme deneyi uygulanmış numunelerin toplu görünüşü.....	165
Şekil 7.6.-	MIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deneyi uygulanmış numuneler.....	166
Şekil 7.7.-	TIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deneyi uygulanmış numuneler.....	166
Şekil 7.8.-	FSW kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deneyi uygulanmış numuneler.....	166
Şekil 7.9.-	MIG kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin esas metallere karşılaştırılması.....	167

Şekil 7.10.-	TIG kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin esas metal ile karşılaştırılması.....	168
Şekil 7.11.-	FSW bağlantılarının mekanik özelliklerinin esas metaller ile karşılaştırılması.....	169
Şekil 7.12.-	Tüm kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin esas metaller ile karşılaştırılması.....	170
Şekil 7.13.-	MIG kaynaklı bağlantılara ait kırılma yüzeyleri ve esas metal kırılma yüzeyleriyle karşılaştırması.....	170
Şekil 7.14.-	TIG kaynaklı bağlantılara ait kırılma yüzeyleri ve esas metal kırılma yüzeyleriyle karşılaştırılması.....	171
Şekil 7.15.-	FSW yöntemi ile kaynak edilmiş bağlantılara ait kırılma yüzeyleri ve esas metal kırılma yüzeyleriyle karşılaştırması.....	171
Şekil 7.16.-	MIG kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerine ait Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.....	172
Şekil 7.17.-	TIG kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerine ait Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.....	173
Şekil 7.18.-	FSW kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerine ait Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.....	174
Şekil 7.19.-	MIG kaynaklı numunelerin kök eğme ve yüz eğme deney sonuçları.....	175
Şekil 7.20.-	MIG kaynaklı bir bağlantıda eğme deneyi sonucu gözlenen hata.....	175
Şekil 7.21.-	TIG kaynaklı bir bağlantıda eğme deneyi sonucu gözlenen hata.....	175
Şekil 7.22.-	TIG kaynaklı numunelerin kök eğme ve yüz eğme sonuçları.....	176
Şekil 7.23.-	FSW yöntemiyle kaynak edilmiş numunelerin kök eğme ve yüz eğme deney sonuçları.....	176
Şekil 7.24.-	MIG kaynaklı bağlantılara ait makroyapı görüntüleri.....	178
Şekil 7.25.-	TIG kaynaklı bağlantılara ait makroyapı görüntüleri.....	179
Şekil 7.26.-	FSW bağlantılarına ait makroyapı görüntüleri.....	180
Şekil 7.27.-	M11 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	182
Şekil 7.28.-	M12 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	183

Şekil 7.29.-	M22 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	184
Şekil 7.30.-	T11 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	185
Şekil 7.31.-	T12 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	186
Şekil 7.32.-	T22 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	187
Şekil 7.33.-	F11 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	188
Şekil 7.34.-	F12 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	189
Şekil 7.35.-	F22 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	190
Şekil 7.36.-	FSW bağlantılarına ait çeşitli toplu mikroyapı görüntüleri.....	191
Şekil 7.37.-	MIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.....	193
Şekil 7.38.-	TIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.....	193
Şekil 7.39.-	FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.....	194
Şekil 7.40.-	MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.....	194

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.-	Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metallerle karşılaştırılması.....	7
Tablo 2.2.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanları.....	8
Tablo 2.3.-	Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre dövme alüminyum alaşımlarının simgelenilmesi.....	14
Tablo 2.4.-	EN 573- 3'e göre 1xxx serisi alüminyum alaşımları.....	15
Tablo 2.5.-	EN 573- 3'e göre 2xxx serisi alüminyum alaşımları.....	16
Tablo 2.6.-	EN 573- 3'e göre 3xxx serisi alüminyum alaşımları.....	17
Tablo 2.7.-	EN 573- 3'e göre 4xxx serisi alüminyum alaşımları.....	18
Tablo 2.8.-	EN 573- 3'e göre 5xxx serisi alüminyum alaşımları.....	19
Tablo 2.9.-	EN 573- 3'e göre 6xxx serisi alüminyum alaşımları.....	21
Tablo 2.10.-	EN 573- 3'e göre 7xxx serisi alüminyum alaşımları.....	22
Tablo 2.11.-	EN 573- 3'e göre 8xxx serisi alüminyum alaşımları.....	23
Tablo 2.12.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının temel ısı (temperleme) işlemlerinin gösterimi.....	25
Tablo 2.13.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının H (sertleştirme) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi.....	25
Tablo 2.14.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının T (ısı işlem) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi.....	26
Tablo 2.15.-	TS 1321'e göre alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan temel sertleştirme işlemlerinin gösterimi.....	27
Tablo 2.16.-	Alüminyum Birliği standartlarına göre döküm alüminyum alaşımlarının simgelenilmesi.....	33
Tablo 2.17.-	ISO'ya göre standardize edilen kaynak edilebilir alüminyum döküm alaşımları ve uygulama alanları.....	33
Tablo 4.1.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak yöntemleri.....	58

Tablo 4.2.-	Günümüz endüstrisinde MIG kaynak yönteminde sık kullanılan koruyucu gaz ve gaz karışımları.....	75
Tablo 4.3.-	AWS A 5.10'a göre alüminyum kaynak telleri.....	76
Tablo 4.4.-	EN ISO 18273'e göre alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak telleri.....	77
Tablo 4.5.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının tek taraflı kaynağında kullanılan kaynak ağızları.....	80
Tablo 4.6.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının çift taraflı alın kaynakları için ağız hazırlaması.....	82
Tablo 4.7.-	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının T birleştirmeleri için kullanılan ağız biçimleri.....	83
Tablo 4.8.-	Tungsten elektrodların kimyasal bileşimleri ve renk kodları.....	91
Tablo 4.9.-	Çeşitli metallerin TIG kaynağı için önerilen koruyucu gazlar ve donanımlar.....	93
Tablo 4.10.-	Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminin uygulama alanlarının başlıcaları.....	114
Tablo 4.11.-	FSW yöntemi ile kaynak edilmiş çeşitli alüminyum alaşımı bağlantıların çekme deneyi sonuçları	132
Tablo 4.12.-	AA 5083 alüminyum alaşımının FSW yöntemi uygulanmış bağlantıların mekanik özellikleri.....	136
Tablo 6.1.-	Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi.....	142
Tablo 6.2.-	Deney malzemelerinin mekanik özellikleri.....	143
Tablo 6.3.-	MIG kaynak yönteminde kullanılan telin kimyasal bileşimi....	146
Tablo 6.4.-	MIG kaynak yönteminde kullanılan telin mekanik özellikleri..	146
Tablo 7.1.-	MIG kaynaklı bağlantılarda kaynak dikiş boyutları.....	161
Tablo 7.2.-	MIG kaynaklı bağlantılarda çarpılma miktarları.....	162
Tablo 7.3.-	TIG kaynaklı bağlantılarda kaynak dikiş boyutları.....	163
Tablo 7.4.-	TIG kaynaklı bağlantılarda çarpılma miktarları.....	163
Tablo 7.5.-	MIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları.....	165
Tablo 7.6.-	TIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları.....	167
Tablo 7.7.-	FSW bağlantılarının çekme deneyi sonuçları.....	168
Tablo 7.8.-	MIG kaynaklı bağlantılara ait eğme deneyi sonuçları.....	177

Tablo 7.9.-	TIG kaynaklı bağlantılara ait eğme deneyi sonuçları.....	177
Tablo 7.10.-	FSW bağlantılarına ait eğme deneyi sonuçları.....	177
Tablo 7.11.-	MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik tarama sonuçları.....	192



1. GİRİŞ

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, günlük yaşantımıza kadar girmiş ve yaşamımızın ayrılmaz bir endüstriyel malzemesi konumuna gelmiştir. Alüminyum, yer kabuğunda, en çok bulunan ikinci element olmakla birlikte 19. yy.'ın sonlarında mühendislik uygulamalarında ekonomikliğiyle ön plana çıkan bir metal olmuştur.

1886' da birbirlerinden habersiz olarak Ohio'da Charles Martin Hall ve Fransa' da Paul Herault tarafından, ergimiş kriyolit içinde çözünen alüminanın (Al_2O_3) elektrolitik olarak redüklenmesinin geliştirildiği sıralarda içten yanmalı motorlar da yeni yeni görülmeye başlamıştır (Anderson 2000).

19. yy.'da yeni tür metal alaşımları arayışı içinde olan bilim adamları, alüminyumun eldesiyle yeni bir metal türünün ortaya çıkmasının birçok problemi çözebileceğini düşünmüşler; az miktarda ve üretimi oldukça pahalı olan, fazla enerji tüketen alüminyum, altından daha değerli bir metal konumuna gelmiştir. İlk olarak Danimarkalı General VII. Frederik'in miğferinde kullanılan alüminyum, Fransa'da III. Napoleon'un ve diğer imparatorların saray mutfaklarında kullanılan lüks bir eşya konumuna gelmiş ve yıllarca imparatorların hatırlı misafirlerinin ziyafet sofralarında sunulan yemeklerin ve içkilerin konulduğu tencere, tabak ve kadehlerin yapımında kullanılmıştır ve bu durumunu uzun yıllar korumuştur (Grönbeck ve Larsson 1995).

Elde edilmesinden yaklaşık yüz yıl sonra, alüminyum ve alüminyum alaşımları mühendislikte önemli rol oynamaya başlamıştır. O yıllarda elektrik üretimi ve kullanımı gelişmekte; elektriğin uzun mesafelerde taşınımı için ağırlıkça hafif malzemelere büyük miktarlarda gereksinim duyulmuştur. Wright kardeşler, alüminyum endüstrisini de geliştiren tamamen yeni bir endüstri kolu olan uçak yapım endüstrisinin ortaya çıkmasını sağlamışlardır. Alüminyumun ilk ticari uygulamaları, ayna çerçeveleri ve tepsilerde görülmüş; ana ürün olarak pazara sunulmuş, zaman içinde kullanımıyla doğrudan veya dolaylı olarak her yönüyle modern hayatta çeşitli uygulama alanları bulmuştur (Anderson 2000).

Günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafiflikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılmış mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle gıda endüstrisi, kimya endüstrisi, otomotiv ve gemi yapım endüstrisi, taşıt yapım, uçak yapım endüstrisi, makina ve cihaz yapımı ile mimari alanda ve inşaat sektöründe geniş kullanım alanına sahiptirler ve birçok özellikleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için tercih edilen malzemeler konumuna gelmişlerdir (Avner 1974, Welding Handbook 1996, Anderson 2000, Mathers 2002).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarını, civata ve perçinleme yolu ile birleştirme dışında kullanılan birleştirme yöntemleri, kaynak, lehimleme ve yapıştırma. Bugün bu yöntemler, çeşitli endüstri kollarında geniş çapta kullanılmakta, bazı durumlarda, lehimleme, yapıştırma ve nokta kaynağı birlikte kombine edilebilmektedir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı, normal çeliğin kaynağına göre çok farklılık gösterir. Alüminyum kaynağı çelik kaynağına göre daha zor ve sorundur. Bu nedenle, malzemenin fiziksel ve metalurjik özelliklerini çok iyi tanımak ve bu özelliklere göre önlemler almak gerekir. Dolayısı ile, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının özellikle savaş yıllarında uçaklarda kullanılan türlerinin kaynak edilebilmesi için gazaltı kaynak yöntemleri öncelikle ergimeyen elektrod ile gerçekleştirilen TIG kaynak yöntemi geliştirilmiş ve bunu sırasıyla MIG ve plazma ark kaynağı (PAW) yöntemleri izlemiştir.

Günümüzde de, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında bu yöntemlerin kullanımı büyük çapta süregelmektedir. Ancak; ergitme esaslı olan bu kaynak yöntemleri ile alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde malzeme iç yapısına bağlı olarak kaynak metalinin iki yanında oluşan ısıdan etkilenmiş bölgede oluşan metalurjik dönüşümler, kaynak bağlantılarının kullanımı sırasında bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Örneğin; gözeneklilik, oksit filmi, sıcak çatlama ve bağlantının hem kaynak metalinde hem de ısıdan etkilenmiş bölgesinde (IEB) mukavemet azalması gibi oluşumlar, alüminyum ve alaşımlarının kullanım özelliklerini büyük ölçüde düşürmektedir. Dolayısı ile, ergitme esaslı kaynak yöntemleri dışında katı faz kaynak yöntemleri ile daha az sorunla

karşılaşılabileceği düşünülerek, araştırmacılar, günümüzden yaklaşık on üç yıl önce sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı adı ile anılan ve teknik literatürde sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) olarak ta adlandırılan bir katı faz kaynak yöntemi geliştirmişler ve alüminyum alaşımı levhaların alın altına ve köşe birleştirmelerini; özellikle yatay oluk pozisyonunda birleştirilebilmelerini gerçekteştirmişlerdir (Thomas ve diğ. 1999, Threadgill 1997, Dawes ve Thomas 1995, Mathers 2002, Kaluç ve Bozduman 1997, Kaluç 2004).

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları; dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak üretilmektedirler ve özellikle dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısı işlemi uygulanamayan (soğuk şekil değiştirme sertleştirmeli) ve ısı işlemi uygulanabilen (çökeltme sertleştirmeli) birçok türü taşıt yapım endüstrisinde (otomobil, raylı taşıt, zırhlı taşıt vb.), uçak ve uzay araçları yapım endüstrilerinde ve gemi yapım endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Bunlar; 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlarıdır. Bu seriler içinde üstün mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri ön plana çıkan 5xxx serisi alaşımlar, savunma endüstrisinde; zırhlı taşıt ve gemi yapımında, kazan ve tank yapımında kullanılmaktadırlar. Örneğin; bu seriden olan EN AW-5083 ve EN AW-5086 alaşımları, ülkemizde zırhlı personel taşıyıcıların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Buradaki amaç, malzemelerin hafif, ekonomik ve mekanik özelliklerinin yüksek, korozyon dirençlerinin iyi olmasıdır. Bu alaşım levhalar MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile birleştirilmektedirler ve taşıt üzerinde çeşitli yerlerde zaman zaman karşı karşıya gelmekte ve kaynak edilmektedirler. Ancak yeni bulunan bir katı faz yöntemi olan sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi (FSW) kullanılmamakta; bu konuda yalnızca ön çalışmalar yapılmaktadır. Buna karşın, ABD’de ve Avrupa’da FSW yönteminin kullanıldığı zırhlı taşıt araçlarının geliştirilmesine dönük projeler gerçekteştirilmiş olup bu projeler günümüzde devam etmektedir (Campbell ve Stotler 1999, Mathers 2002, Colligan ve diğ. 2003).

Bu konuda yapılan literatür araştırmalarında bu tür alaşımların eş ve farklı malzeme çifti olarak sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi (FSW) kullanılarak kaynak edilmeleri ve kaynak bağlantılarının mekanik ve metalurjik özellikleri üzerine detaylı yapılmış bir çalışmanın varlığı saptanamamıştır; hatta bu tür alüminyum

alaşımının sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı (FSW) üzerine yapılan çalışmalar da oldukça az sayıdadır (Peel ve diğ. 2003, James ve diğ. 2003, Larsson ve Karlsson 2000).

Dolayısı ile bu boşluğu doldurmak amacıyla yapılan bu çalışmada, dünyada ve ülkemizde, zırhlı taşıt yapım endüstrilerinde kullanılan EN AW 5083- H321 ve EN AW 5086- H32 alüminyum alaşımlarının sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve oluşturulan kaynaklı bağlantıların MIG ve TIG kaynak yöntemleriyle oluşturulan bağlantıların mekanik özellikleri ile karşılaştırılması ve kaynak bölgelerinin metalurjik dönüşümlerinin incelenmesi ve sonuçların ülke ve dünya endüstrilerine aktarılması esas alınmıştır. Öncelikle, 5083 ve 5086 alüminyum alaşımlarından eş ve farklı çiftler olarak endüstriyel koşullarda kullanılan kaynak parametreleri ile MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar oluşturulmuştur. Daha sonra, aynı alüminyum alaşımlarına literatürden alınan ve ön deneyler sonucu saptanan parametreler kullanılarak sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı (FSW) uygulanmıştır. Kaynaklı bağlantılardan çıkarılan numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanmış, kırılma yüzeyleri ışık ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Bağlantıların kaynak bölgelerinden alınan metalografik numuneler makroskobik ve mikroskobik olarak detaylı biçimde incelenmiştir, ayrıca kaynak bölgesinin Vickers sertlik taraması yapılmıştır.

Son olarak ta dünyada metalografik mikroyapı inceleme ve analiz sistemi olarak yaygın biçimde kullanılan Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak mikroyapılardaki metalurjik oluşumlar ve bunların mekanik özelliklere etkileri etraflıca araştırılmıştır.

2. ALÜMİNYUM ve ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1. Alüminyumun Eldesi ve Özellikleri

Çelikten sonra günümüz endüstrisinde en fazla kullanılan metelsel malzeme olan alüminyum ve alüminyum alaşımları, endüstriyel malzemeler içinde son keşfedilen metallere biridir ve bu alaşımların kullanım alanının yaygınlaşmasında savunma, otomotiv ve havacılık endüstrisinin büyük bir katkısı olmuştur (Tülbentçi 1987).

Alüminyum, her ne kadar yer kabuğunda %8 oranında ve en fazla bulunan metelsel element ise de, sürekli olarak bileşik durumunda bulunur ve eldesi güç bir meteldir (Grönbeck ve Larsson 1995). Bunun nedeni alüminyum içeren minerallerin genellikle karmaşık ve kararlı yapıda olmasıdır. Bu minerallerden alüminyum metalinin indirgenmesi için çok yüksek enerji ve yüksek sıcaklık gereklidir. 18. yy.'ın sonları ile 19.yy.'ın başlarında Berzelius, Dalton, Davy, Lavoisier ve Oersted gibi ünlü bilim adamları alüminyum bileşikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. 1807 yılında Sir Humprey Davy bu bileşiklerin içerisinde bir metal bağlı olduğunu ileri sürmüştü ve buna Latince "Alumen" adını vermiştir. 1821'de Fransa, Les Baux'ta alüminyum üretiminin temel hammaddesi cevher bulunmuş ve yörenin adına dayanarak buna "boksit" adı verilmiştir. Daha sonra, 1825'de Hans Cristian Oersted, metal alüminyum üretimi için önemli bir bileşik olan alüminyum klorid bileşimini hazırlamayı başarmıştır. Bundan iki yıl sonra, 1827'de Friedrich Wöhler bu bileşimin potasyum ile reaksiyonu sonucu ilk metal alüminyum kimyasal yollarla elde etmeyi başarmıştır. 19.yy.'ın ikinci yarısında alüminyum üretimi için değişik kimyasal yöntemler geliştirilmiş; bu yüzyılın sonunda alüminyum sulu çözeltilerden elde etmek için yapılan çalışmalar başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Alüminyumun endüstriyel çapta eldesi ancak 1886'da, ABD'de Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul L.T. Heroult tarafından birbirlerinden habersiz ve hemen hemen aynı zamanlarda patenti alınan özel elektroliz yöntemi ile (Hall- Heroult yöntemi) olanaklı olmuştur (Bilim ve Teknik 1995, Tülbentçi 1987).

Doğada birçok tür alüminyum cevheri bulunmasına karşın, alüminyum eldesinde günümüzde % 55 -65 Al_2O_3 içeren ve boksit adı verilen bir cevher kullanılmaktadır. Bu cevher önce yabancı madde olarak içerdiği Fe_2O_3 ve SiO_2 'den arındırılır; bunun için, cevher kızgın NaOH buharıyla tepkimeye sokulur ve alüminyum oksit suda çözünebilen $NaAlO_2$ 'a dönüşür ve bir filtrasyon veya flotasyon işlemi ile demir ve silisyum bileşikleri cevherden temizlenir. Elde edilen çözelti içinde alüminyum, alüminyum hidroksit durumunda kristalize edilir ve sonra suyu uçurularak saf alümina (Al_2O_3) elde edilir (Tülbentçi 1987).

Alüminyumun, oksijene olan ilgisi, karbonunkinden daha büyük olduğundan burada demir cevherleri durumunda olduğu gibi karbonla redüklemeye yapılamaz, bunun için elektroliz uygulanır. Elektrolizi gerçekleştirebilmek için bu oksitin ergitilmesi veya çözelti konumuna getirilmesi gereklidir. Alümina $2050^{\circ}C$ 'de ergir, bu nedenle ergitme yöntemi kullanılamaz; alümina bir başka alüminyum cevheri olan "kriyolit" içinde çözünebilmektedir ve kriyolit te $950^{\circ}C$ civarında sıvı duruma geçmekte ve alüminayı çözebilmektedir. Karbon astarlı özel elektroliz fırını içinde kriyolit ergitilir ve sonra alümina eklenerek çözelti elde edilir ve karbon anodlar kullanılarak elektroliz gerçekleştirilir. 5 V'luk bir gerilim uygulandığında Al_2O_3 parçalanırken, kriyolit değişime uğramaz ve alüminyum katod olarak kullanılan banyonun dibinde birikir ve buradan dışarı alınır ve banyoya sürekli alümina eklenir. Bu yöntemde enerji sarfiyatı 1 kg alüminyum için 17 kWh gibi oldukça yüksektir, bu da alüminyumun fiyatını etkilemektedir (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993).

Alüminyumun en önemli özellikleri olarak; özgül ağırlığının düşük olması, elektriği ve ısıyı çok iyi bir şekilde iletmesi, çok yumuşak ve sünek olması ile bazı alaşımlarının çökelme yolu ile sertleştirilebilmesi sayılabilir.

Alüminyum, atmosfer ile teması sonucunda üzerinde oluşan ince fakat yoğun ve refrakter karakterli oksit tabakasından ötürü havanın ve çeşitli kimyasal maddelerin korozyon etkilerine karşı dirençlidir. Alüminyumun ergime sıcaklığı düşük, buna karşın kendini çekmesi çok fazladır, bu bakımdan döküm yolu ile şekillendirme için saf alüminyum yerine, alüminyum alaşımları tercih edilir (Anık ve Dorn 1995, Tülbentçi 1987).

Tablo 2.1.- Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metallerle karşılaştırılması- 20°C (Mathers 2002).

Özellik	Alüminyum	Demir	Nikel	Bakır	Titanyum
Kristal kafes yapısı	YMK	HMK	YMK	YMK	SPH
Yoğunluğu (g/cm ³)	2.7	7.85	8.9	8.93	4.5
Ergime sıcaklığı (°C)	660	1536	1455	1083	1670
Özgül ısısı (J/ kg K)	930	448	440	385	470
Isıl iletkenliği (W/m K)	235	79.6	92.1	389.4	15.5
Isıl genleşme katsayısı (Δl/l °C)	33.9x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁶	16.5x10 ⁻⁶	8.2x10 ⁻⁶
Elektrik direnci (μΩcm)	2.65	9.7	6.8	1.67	55
Elastisite modülü E (N/mm ²)	6.7x10 ⁴	21x10 ⁴	21x10 ⁴	12.4x10 ⁴	10.8x10 ⁴
Maksimum çekme mukavemeti (N/mm ²)	65	235	300	210	245

Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır. Mekanik özellikleri içeriğindeki Si, Fe, Ti, Cu ve Zn gibi elementlerin etkisi ile yükselmesine karşın kimyasal maddelere karşı olan direnci azalır; mekanik özellikler alüminyuma uygulanan şekil verme işlemine bağlı olarak ta büyük ölçüde değişir (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993).

Gıda ve elektrik endüstrisinde kullanılan alüminyum % 99.99 safiyet derecesindedir; alüminyum borular ve saclar % 99.5 ile 99.8 ve bazı durumlarda da % 99 -98 derecesinde saftır; bu tür alüminyumda geri kalan kısım genellikle katışkı olarak bulunan silisyum ve demirden oluşmaktadır. Alüminyumun bileşiminde katışkı olarak bulunan demir, özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemez, buna karşın alüminyum 250- 350°C' de tavlınır ise, katı çözelti durumunda bulunan silisyum ayrışır ve bu sıcaklığın üstünde tekrar katı çözelti durumuna geçer; silisyumun ayrışması ile alüminyumun mukavemeti oldukça azalır, bu bakımdan bu sıcaklık derecelerinin üzerinde bir sıcaklığa kadar tavlınmış olan silisyum içeren alüminyum alaşımları, soğuma sırasında bu aralığı hızlı geçmelidir, örneğin kaynak işleminden sonra parça suya sokularak hızla soğutulmalıdır (Tülbentçi 1987, Bargel ve Schultze 1987).

Alüminyum % 99.0- 99.5- 99.8- 99.99 safiyet derecelerinde üretilir; % 99.99 saflıktaki alüminyum yüksek nitelikte saf alüminyum olarak tanımlanır ve burada fiziksel ve mekanik özellikler belirli bir şekilde kendini gösterir. Bu alüminyum yumuşaktır ve kolay işlenebilir, ısı ve elektriği iyi iletir, ışığı iyi yansıtır ve korozyona karşı çok dirençlidir (Tülbentçi 1987).

Günümüzde, alüminyum mutfak eşyaları, bina kaplamaları, elektrik iletkenleri üretiminde, kimya ve gıda endüstrisinde saf alüminyum olarak, makina imalat, havacılık ve taşıt endüstrisinde de alüminyum alaşımları olarak yaygın bir kullanma alanına sahiptir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının başlıca endüstriyel kullanım alanları Tablo 2.2’de özetlenmiştir. Bir yapıda alüminyum çelik ile beraberce kullanıldığında, elastiklik modülünün daha küçük, ısıl genleşme katsayısının ise çok daha büyük olduğu önemle gözönünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2.2.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanları (Mathers 2002).

Alüminyum Alaşımı	Ürün Biçimi	Uygulama Alanı
Saf alüminyum	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon ürünleri.	Ambalaj malzemesi ve folyo, çatı kaplama, zırlama, düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan ve depolama tankları yapımı.
2000 serisi (Al- Cu alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Çok yüksek zorlanmaya maruz parçalar, havacılık ve uzay araçlarında kullanılan yapısal elemanlar, ağır dövme parçalar, taşıt tekerlek jantları, silindir kafaları, pistonlar.
3000 serisi (Al-Mn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Ambalaj malzemesi, çatı kaplama ve zırlama, kimyasal madde varilleri ve tankları, kimyasal madde ve gıda taşıma ekipmanları.
4000 serisi (Al- Si alaşımları)	Tel, döküm parçalar.	Kaynak telleri, silindir kafaları, motor blokları, subap gövdeleri, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
5000 serisi (Al- Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi boş elemanlar ve borular.	Zırlama, kazan ana yapı levhaları, güçlü yapı elemanları, yapısal elemanlar, kazanlar ve depolama tankları, otomobil, tren vagonu, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
6000 serisi (Al- Si- Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi boş elemanlar ve borular.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, otomobil, tren vagonu, deniz taşıtları ve denizüstü yapı elemanları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
7000 serisi (Al- Mg- Zn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, uçaklarda kullanılan kalın kesitli dövme parçalar, askeri köprüler, zırh levhaları, ağır taşıt ve vagonlarda kullanılan ekstrüzyon ürünleri.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının, teknikte yaygın olarak kullanımında etkin olan en önemli faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Mukavemet/yoğunluk oranı: Alaşımlarında daha belirgin olan bu oranın yüksekliği, hafifletilmelerine öncelik verilen yapıların çoğu için uygun bir malzeme olmasını sağlar. Örneğin; uçak, taşıt ve taşınabilir askeri silah ve donanımlar.
- Elektrik iletkenliği/yoğunluk oranı: Bu oran, tüm metallere göre alüminyumda daha yüksektir ve bundan dolayı da yüksek gerilim hatlarında bakırın yerini almaktadır.
- Korozyon direnci: Atmosfere ve diğer birçok ortama karşı alüminyumun direnci oldukça yüksektir ve eloksal veya benzeri yüzey işlemleri ile direnç daha da artırılabilir ve ayrıca dekoratif görünüm de sağlanabilmektedir (Topbaş, 1993).

Alüminyumun oksijene karşı ilgisi çok fazladır; hava ile teması sonucunda, çok kısa bir süre içinde oksijen ile birleşerek alümina (Al_2O_3) oluşturur ve bunun sonucunda da yüzeyi gri renkli oldukça sıkı, mukavim, inatçı ve refrakter bir oksit tabakası ile örtülür ve bu tabaka, su ile yıkanarak çıkarılamaz; alüminyumun bu özeliği kullanma alanını çok genişletmiştir. Soğuk şekil değiştirme ve safiyet derecesinin azalması alüminyumun korozyon direncini olumsuz yönde etkiler. Sıcak ve soğuk şekil değiştirme derecesini yeniden kristalleşme sıcaklığı belirler, şekil değiştirme işlemi yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılırsa soğuk şekil değiştirme, üstünde yapılırsa sıcak şekil değiştirme diye adlandırılır. Soğuk şekil değiştirmeden sonra taneler bozulmuş ve deforme olmuş olarak kalır, sıcak şekil değiştirmeden sonra ise taneler tekrar düzgün duruma geçerler. Alüminyum oda sıcaklığında soğuk şekil değiştirdiğinde, çekme ve akma mukavemeti yükselir ve elektrik iletkenliği bir miktar azalır; bu azalma ve artma şekil değiştirme derecesine bağlıdır (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993, Avner 1974, Domke 1988).

Soğuk şekil değiştirmiş alüminyum bir malzeme tekrar sıcak şekil değiştirebilir,

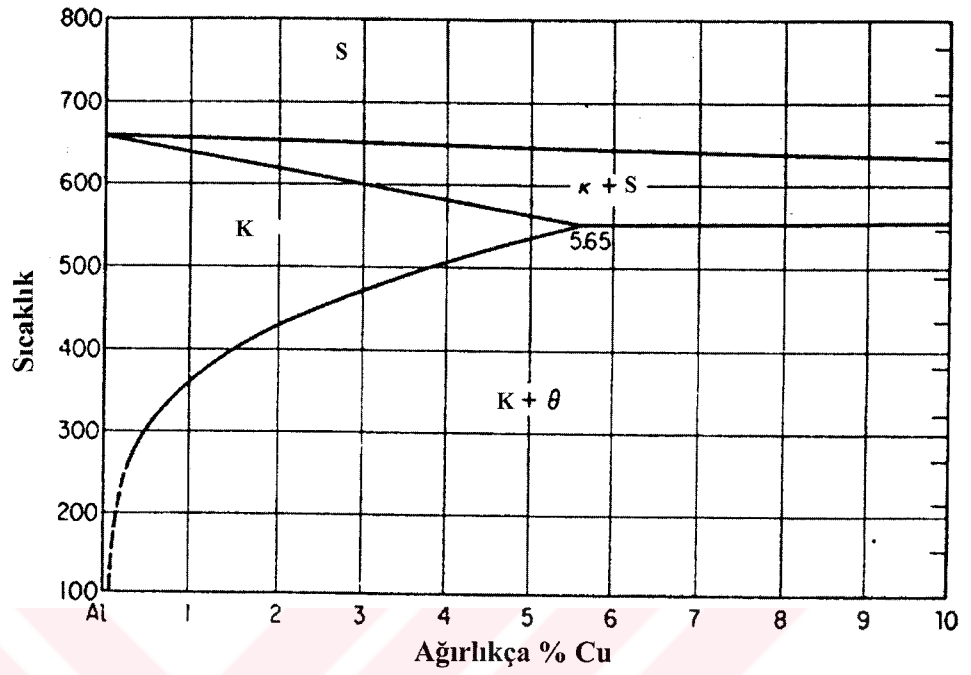
fakat bu halde, kaynak işleminde olduğu gibi mukavemet azalır; alüminyumun sıcak şekil değiştirme sıcaklığı 300 ile 450 °C arasındadır (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993, Avner 1974).

2.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Faz Diyagramları

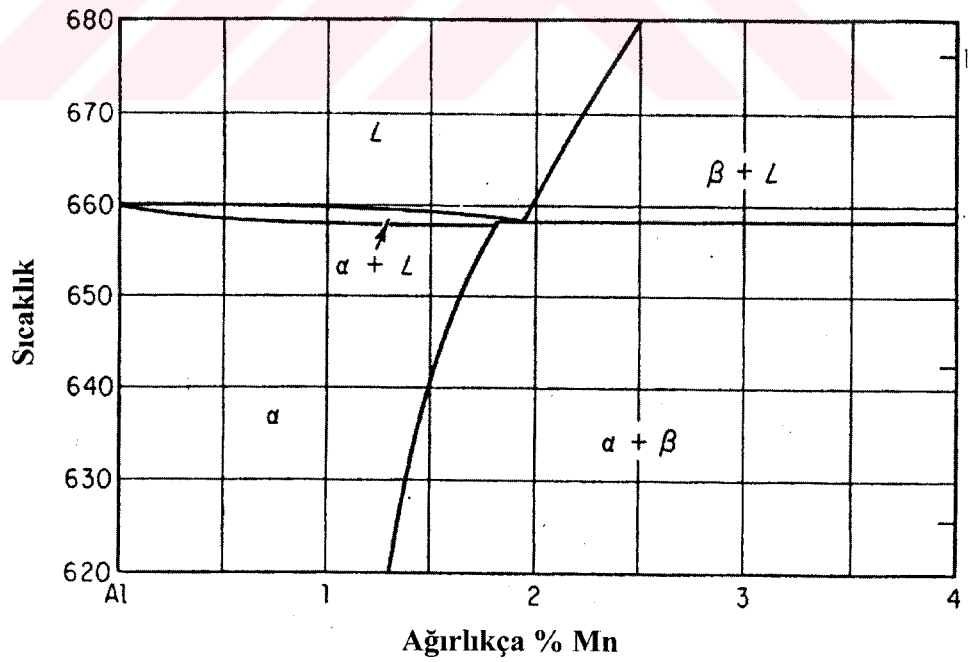
Alüminyuma katılan alaşım elementleri mekanik özellikleri geliştirir; özellikle mukavemet artar. Alüminyuma katılan başlıca alaşım elementleri magnezyum, manganez, silisyum, bakır, çinko ve bazı durumlarda da nikel ve titanyumdur. Alaşım elementleri, alüminyum içinde üç farklı durumda bulunabilirler:

- Alüminyum içinde katı durumda çözünebilirler.
- Katı durumda alüminyum içinde çözünmeyip veya sınırlı miktarda çözünüp, mekanik bir karışım oluşturabilirler.
- Alüminyum ile veya kendi aralarında metallere arası bileşik veya kimyasal bileşik oluşturabilirler (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993).

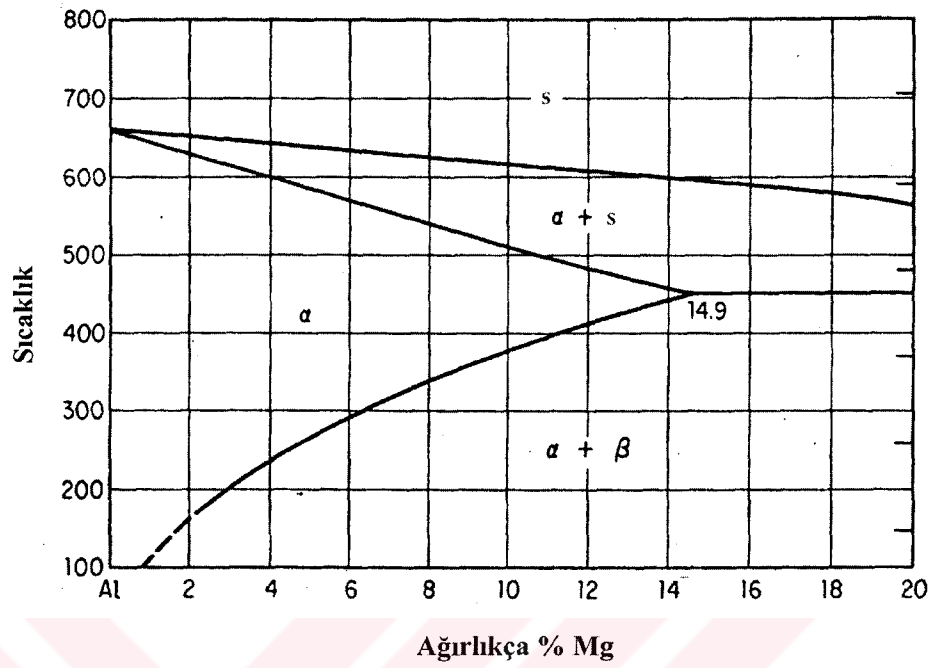
Alüminyuma katılan alaşım elementlerinden genellikle malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini ve korozyon direncini etkilemeden mukavemet özelliklerini geliştirmesi beklenir. Alüminyuma çok az miktarda katılan Mn, Mg, Si, Cu ve Zn, alüminyumun yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısında yer alarak katı ergiyik oluştururlar ve kristal kafesin kaymaya karşı direncini yükseltirler; bu şekilde şekil değiştirme kabiliyeti fazla etkilenmeden akma mukavemeti yükseltilmiş olur. Alaşım elementlerinin miktarlarının artması ile bunların, alüminyum içinde çözünemeyen kısmı sert kırılabilir metallere arası bileşikler ve arafazlar oluşturur ve böylece mukavemet daha da yükselir ama şekil değiştirme kabiliyeti azalır. Alüminyumun, alaşım elementleri ile oluşturduğu katı ergiyik, yüksek sıcaklıklarda, oda sıcaklığına nazaran daha fazla alaşım elementini çözebilir ve bu nedenle yüksek sıcaklıktan itibaren soğuma sırasında ikincil ayrışmalar ortaya çıkar. Bu olaydan yararlanılarak bazı alüminyum alaşımlarına ayrışma veya çökelme sertleştirilmesi denilen bir ısıl işlem uygulanarak mukavemetleri, alaşımsız çelikler kadar yükseltilebilir (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993, Avner 1974, Lakhtin 1977 ve 1977b, Bargel ve Schultze 1987).



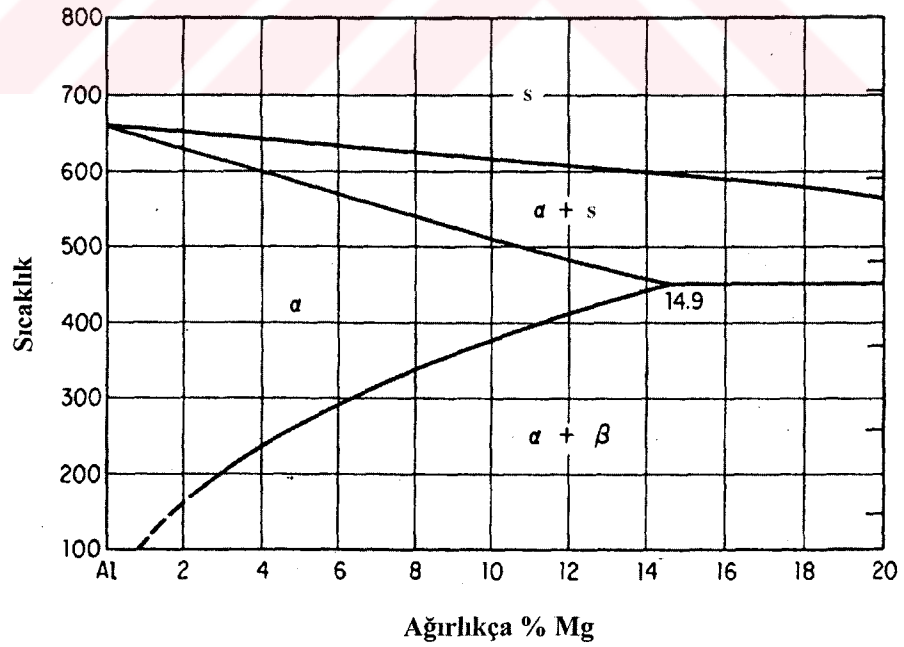
Şekil 2.1.- Cu- Al alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı (Avner 1974, Smith 2001).



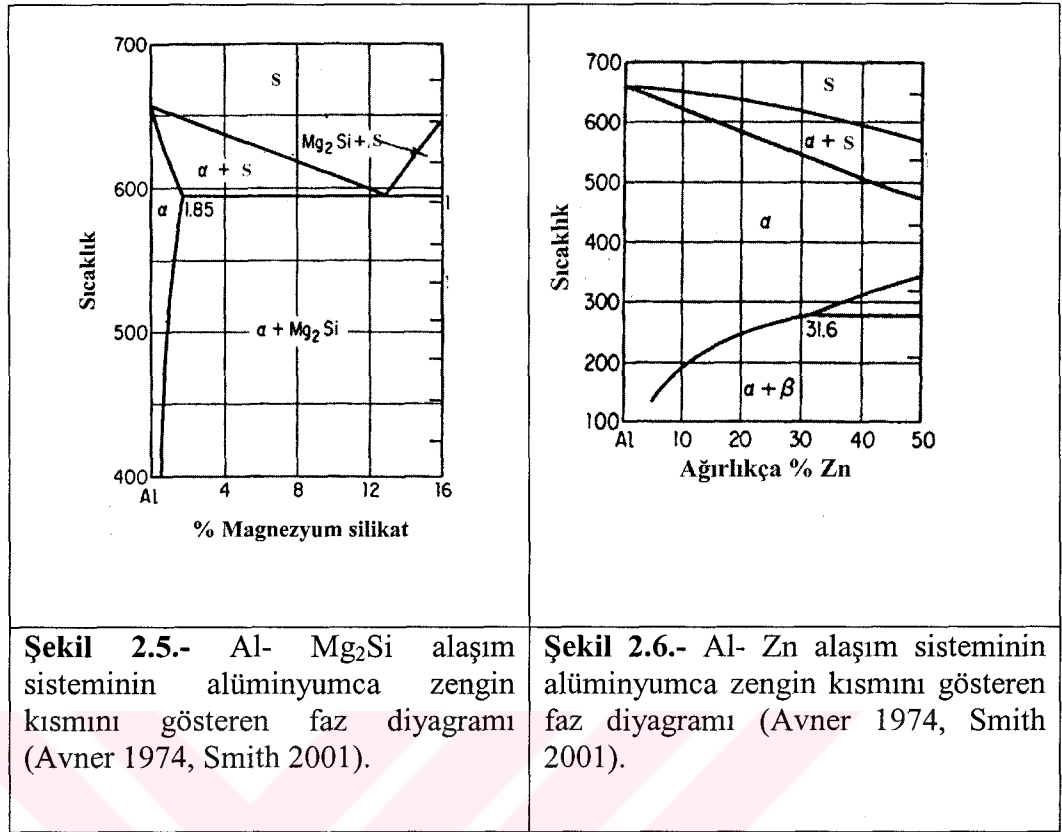
Şekil 2.2.- Al- Mn alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösteren faz diyagramı (Avner 1974, Smith 2001).



Şekil 2.3.- Al- Si alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösteren faz diyagramı (Avner 1974, Smith 2001).



Şekil 2.4.- Al- Mg alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösteren faz diyagramı (Avner 1974, Smith 2001).



2.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması ve Uygulanan Sertleştirme İşlemlerine Göre Simgelenirilmesi

Alüminyum alaşımları, alaşım elementlerinin çok farklı etkileri dolayısı ile, birbirinden çok farklı özelliklere sahiptirler ve bunlar genellikle dövme ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

2.3.1. Dövme alüminyum alaşımları

Bu türe giren alaşımlar Cu, Mg, Mn, Si ve Ni gibi elementler içerirler; çoğu kez önce sürekli döküm yöntemi ile blok biçiminde elde edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanır, haddeleme veya ekstrüzyon ile biçimlendirilirler. Döküm yapısında tane sınırlarında oluşan sürekli gevrek fazlar, şekillendirme sırasında parçalanır ve ana kütleye dağılır ve böylece alaşım soğuk şekillendirmeye uygun duruma geçer (Domke 1988).

Dövme alüminyum alaşımlarının simgelenmesi ve standardizasyonu ilk olarak sistematik biçimde 1954 yılında Alüminyum Birliği tarafından gerçekleştirilmiştir. Burada dört numaralı bir tanımlama sistemi kullanılır (Tablo 2.3).

Tablo 2.3.- Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre dövme alüminyum alaşımlarının simgelenmesi (Anderson 2000).

Alüminyum Birliği No.	Başlıca Alaşım Elementi
1xxx	Min. %99.0 veya daha fazla alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan seriler

Çeşitli ülkelerin ulusal standartlarında da farklı simgelenme ile tanımlanan dövme alüminyum alaşımları EN 573 serisi standartlarda detaylı olarak tanımlanmıştır. Dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarının simgelenmesi ve kimyasal bileşimleri EN 573-3: 1995'te tanımlanmış olup Tablo 2.4–Tablo 2.11'de verilmiştir. Ülkemizde de TS 412/Ocak 1987 “Biçimlenebilen Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları- Kimyasal Bileşimi” olarak standardlaştırılmışlardır. Bu konudaki EN standardı hazırlık aşamasındadır.

Değişik serilerdeki alüminyum alaşımlarının karakteristiklerindeki dikkate alınacak farklılıklar bulunmaktadır ve bunlar alaşımların uygulama alanlarında farklılıklar yaratmaktadır. Standard tanımlama sistemini anladıktan sonra, bir sonraki nokta önceden bahsedilen seriler içinde iki belirgin farklı alüminyum türü olduğunu kabul etmektir. Bunlar ısıtılabilir ve bu sayede mukavemetleri artırılabilen alüminyum alaşımları ve ısıtılabilir tutulabilen ve bu sayede mukavemetleri artırılabilen alüminyum alaşımlarıdır. Ark kaynağı uygulamalarının bu iki tür alaşım serisi üzerindeki etkileri göz önünde tutulduğunda bu fark özellikle önemlidir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan mukavemet artırıcı yöntemlere göre simgelenme EN 515: 1993'te yer almaktadır.

Tablo 2.4.- EN 573-3' e göre 1xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşımların Gösterimi	Alaşımların Simgesi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Düğümleri Herbiri	Düğümleri Toplamı	Alüminyum (min)
EN AW-1199		EN AW-Al 99,99	0,006	0,006	0,006	0,002	0,006	-	-	0,006	0,005	0,005	-	0,002	0,002	-	99,99
EN AW-1098		EN AW-Al 99,98	0,010	0,006	0,003	-	-	-	-	0,015	-	-	-	0,003	0,003	-	99,98
EN AW-1196		EN AW-Al 99,98(A)	0,010	0,006	0,006	0,006	-	-	-	0,010	0,006	-	-	0,006	0,003	-	99,96
EN AW-1090		EN AW-Al 99,90	0,07	0,07	0,02	0,01	0,01	-	-	0,03	0,03	0,05	-	0,01	0,01	-	99,90
EN AW-1085		EN AW-Al 99,85	0,10	0,12	0,03	0,02	0,02	-	-	0,03	0,03	0,05	-	0,02	0,01	-	99,85
EN AW-1080A		EN AW-Al 99,8(A)	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	-	-	0,06	0,03	-	-	0,02	0,02	-	99,80
EN AW-1070A		EN AW-Al 99,7	0,20	0,25	0,03	0,03	0,03	-	-	0,07	-	-	-	0,03	0,03	-	99,70
EN AW-1370		EN AW-EAl 99,7	0,10	0,25	0,02	0,01	0,02	0,01	-	0,04	0,03	-	0,02B; 0,02V + Ti	-	0,02	0,10	99,70
EN AW-1060		EN AW-Al 99,6	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	-	-	0,05	-	0,05	-	0,03	0,03	-	99,60
EN AW-1050A		EN AW-Al 99,5	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	-	0,07	-	-	-	0,05	0,03	-	99,50
EN AW-1350		EN AW-EAl 99,5	0,10	0,40	0,05	0,01	-	-	0,01	0,05	0,03	-	0,05 Bi; 0,02V + Ti	-	0,03	0,10	99,50
EN AW-1350A		EN AW-EAl 99,5(A)	0,25	0,40	0,02	-	0,05	-	-	0,05	-	-	0,03Cr + Mn + Ti + V	-	0,03	-	99,50
EN AW-1450		EN AW-Al 99,5 Ti	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	-	0,07	-	-	-	0,10-0,20	0,03	-	99,50
EN AW-1235		EN AW-Al 99,35	0,65 Si +	Fe	0,05	0,05	0,05	0,05	-	0,10	-	0,05	-	0,06	0,03	-	99,35
EN AW-1200		EN AW-Al 99,0	1,00 Si +	Fe	0,05	0,05	0,05	-	-	0,10	-	-	-	0,05	0,05	0,15	99,00
EN AW-1200A		EN AW-Al 99,0(A)	1,00 Si +	Fe	0,10	0,30	0,30	0,10	0,10	0,10	-	-	-	-	0,05	0,15	99,00
EN AW-1100		EN AW-Al 99,0 Cu	0,95 Si +	Fe	0,05-0,20	0,05	0,05	-	-	0,10	-	-	-	-	0,05	0,15	99,00

Tablo 2.5.- EN 573-3'e göre 2xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşım Gösterimi	Alaşım Simgesi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min)
EN AW- 2001		EN AW-AlCu5,5MgMn	0,20	0,20	5,2-6,0	0,15-0,50	0,20-0,45	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05Zr	0,20	0,05	0,05	Kalantı
EN AW- 2007		EN AW- AlCu4PbMgMn	0,8	0,8	3,3-4,6	0,50-1,0	0,40-1,8	0,10	0,20	0,10	0,20	0,8	-	0,20	0,10	0,30	Kalantı
EN AW-2011		EN AW- AlCu6BIPb	0,40	0,7	5,0-6,0	-	-	-	-	-	-	0,30	-	-	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2011A		EN AW- AlCu6BIPb(A)	0,40	0,50	4,5-6,0	-	-	-	-	-	-	0,30	-	-	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2014		EN AW- Cu4SiMg	0,50-1,2	0,7	3,9-5,0	0,40-1,2	0,20-0,8	0,10	-	-	-	0,25	-	0,15	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2014A		EN AW- AlCu4SiMg(A)	0,50-0,9	0,50	3,9-5,0	0,40-1,2	0,20-0,8	0,10	0,10	0,10	0,10	0,25	0,20 Zr + Ti	0,15	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2014B		EN AW- AlCu4SiMg(B)	0,50-1,2	0,30	3,9-5,0	0,40-1,2	0,20-0,8	0,10	-	-	-	0,25	-	0,15	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2017A		EN AW- AlCu4MgSi(A)	0,20-0,8	0,7	3,5-4,5	0,40-1,0	0,40-1,0	0,10	-	-	-	0,25	0,25 Zr + Ti	-	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2017		EN AW- AlCu2,5Mg	0,8	0,7	2,2-3,0	0,20	0,20-0,50	0,10	-	-	-	0,25	-	-	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2018A		EN AW- AlCu2Mg1,5Ni	0,15-0,25	0,9-1,4	1,8-2,7	0,25	1,2-1,8	-	0,8-1,4	-	-	0,15	0,25 Zr + Ti	0,20	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2019		EN AW- AlCu6Mn	0,20	0,30	5,8-6,8	0,20-0,40	0,20	-	-	-	-	0,10	0,10-0,25 Zr	0,02-0,10	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2019		EN AW- AlCu6Mn(A)	0,20	0,30	5,8-6,8	0,20-0,40	0,20	-	-	-	-	0,10	0,10-0,25 Zr	0,10-0,20	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2024		EN AW- AlCu4Mg1	0,50	0,50	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10	-	-	-	0,25	-	0,15	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2024		EN AW- AlCu4Mg1(A)	0,20	0,30	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10	-	-	-	0,25	-	0,15	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2030		EN AW- AlCu4PbMg	0,8	0,7	3,3-4,5	0,20-1,0	0,50-1,3	0,10	-	-	-	0,50	0,20Bi; 0,8-1,5Pb	0,20	0,10	0,30	Kalantı
EN AW- 2031		EN AW- AlCu2,5NiMg	0,50-1,3	0,6-1,2	1,8-2,8	0,50	1,6-1,2	-	0,6-1,4	-	-	0,20	-	0,20	0,05	0,15	Kalantı
EN AW- 2091		EN AW- AlCu2Li2Mg1,5	0,20	0,30	1,8-2,5	0,10	1,1-1,9	0,10	-	-	-	0,25	0,04-0,16Zr	0,10	0,05	0,15	Kalantı

Tablo 2.6.- EN 573-3'e göre 3xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşım Gösterimi	Alaşım Simgesi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min)
EN AW-3002		EN AW-Al Mn0,2Mg0,1	0,08	0,10	0,15	0,50-0,25	0,50-0,20	-	-	0,05	-	0,03	-	0,03	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-3102		EN AW-Al Mn0,2	0,40	0,7	0,10	0,05-0,40	-	-	-	0,30	-	0,10	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3003		EN AW-Al Mn1Cu	0,6	0,7	0,5-0,20	1,0-1,5	-	-	-	0,10	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3103		EN AW-Al Mn1	0,50	0,7	0,10	0,9-1,5	0,30	0,10	-	0,20	-	-	0,10 Zr + Ti	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3103A		EN AW-Al Mn1(A)	0,50	0,7	0,10	0,7-1,4	0,30	0,10	-	0,20	-	-	0,10 Zr + Ti	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3004		EN AW-Al Mn1Mg1	0,30	0,7	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	-	-	0,25	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3104		EN AW-Al Mn1Mg1Cu	0,6	0,8	0,05-0,25	0,8-1,4	0,8-1,3	-	-	0,25	0,05	0,10	-	0,10	0,03	0,15	Geri Kalan
EN AW-3005		EN AW-Al Mn1Mg0,5	0,6	0,7	0,30	1,0-1,5	0,20-0,6	0,10	-	0,25	-	-	-	0,10	0,03	0,15	Geri Kalan
EN AW-3105		EN AW-Al Mn0,5Mg0,5	0,6	0,7	0,30	0,30-0,8	0,20-0,8	0,20	-	0,40	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3105A		EN AW-Al Mn0,5Mg0,5(A)	0,6	0,7	0,30	0,30-0,8	0,20-0,8	0,20	-	0,25	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3207		EN AW-Al Mn0,6	0,30	0,45	0,10	0,40-0,8	0,10	-	-	0,10	-	-	-	-	0,05	0,10	Geri Kalan
EN AW-3207A		EN AW-Al Mn0,6(A)	0,35	0,6	0,25	0,30-0,8	0,40	0,20	-	0,25	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-3017		EN AW-Al Mn1Cu0,3	0,25	0,25-0,45	0,25-0,40	0,8-1,2	0,10	0,15	-	0,10	-	-	-	0,05	0,05	0,15	Geri Kalan

Tablo 2.7.- EN 573-3'e göre 4xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşım Gösterimi	Alaşım Simgesi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)															
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min)	
EN AW-4004		EN AW-Al Si10Mg1,5	9,0-10,5	0,8	0,25	0,10	1,0-2,0	-	-	0,20	-	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4104		EN AW-Al Si10MgBi	9,0-10,5	0,8	0,25	0,10	1,0-2,0	-	-	0,20	-	-	0,02-0,20 Bi	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4006		EN AW-Al Si1Fe	0,8-1,2	0,50-0,8	0,10	0,05	0,01	0,20	-	0,05	-	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4007		EN AW-Al Si1,5Mn	1,0-1,7	0,40-1,0	0,20	0,8-1,5	0,20	0,05-0,25	0,15-0,7	0,10	-	-	0,05Co	0,10	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4014		EN AW-Al Si2	1,4-2,2	0,7	0,20	0,35	0,30-0,8	-	-	0,20	-	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4015		EN AW-Al Si2Mn	1,4-2,2	0,7	0,20	0,6-1,2	0,10-0,50	-	-	0,20	-	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4032		EN AW-Al Si12,5MgCuNi	11,0-13,5	1,0	0,50-1,3	-	0,8-1,3	0,10	0,50-1,3	0,25	-	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4043A		EN AW-Al Si5(A)	4,5-6,0	0,6	0,30	0,15	0,20	-	-	0,10	-	-	-	0,15	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4343		EN AW-Al Si7,5	6,8-8,2	0,8	0,25	0,10	-	-	-	0,20	-	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4045		EN AW-Al Si10	9,1-11,0	0,8	0,30	0,05	0,05	-	-	0,10	-	-	-	0,20	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-4046		EN AW-Al Si10Mg	9,0-11,0	0,50	0,03	0,40	0,20-0,50	-	-	0,10	-	-	-	0,15	-	0,05	0,10	Geri Kalan
EN AW-4047A		EN AW-Al Si12 (A)	11,0-13,0	0,6	0,30	0,15	0,10	-	-	0,20	-	-	-	0,15	-	0,05	0,15	Geri Kalan

Tablo 2.8.- EN 573-3'e göre 5xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşım Gösterimi	Alaşım Simgesi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min).
EN AW- 5005		EN AW-Al Mg1(B)	0,30	0,7	0,20	0,20	0,50-1,1	0,10	-	0,25	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW5005A-		EN AW- Al Mg1(C)	0,30	0,45	0,05	0,15	0,7-1,1	0,10	-	0,20	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-5305		EN AW- Al 99,85Mg1	0,08	0,08	-	0,03	0,7-1,1	-	-	0,05	-	-	-	0,02	-	Geri Kalan	
EN AW- 5505		EN AW- Al 99,9Mg1	0,06	0,04	-	0,03	0,8-1,1	-	-	0,04	-	-	-	0,01	-	Geri Kalan	
EN AW- 5605		EN AW- Al 99,98Mg1	0,01	0,008	-	-	0,8-1,1	-	-	0,01	-	-	-	0,003	-	Geri Kalan	
EN AW- 5010		EN AW- Al Mg0,5Mn	0,40	0,7	0,25	0,10-0,30	0,20-0,6	0,15	-	0,30	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5110		EN AW- Al 99,85Mg0,5	0,08	0,08	-	0,03	0,30-0,6	-	-	0,05	-	-	-	0,02	-	Geri Kalan	
EN AW- 5210		EN AW- Al 99,9 Mg0,5	0,06	0,04	-	0,03	0,35-0,6	-	-	0,04	-	-	-	0,01	-	Geri Kalan	
EN AW- 5310		EN AW- Al 99,98Mg0,5	0,01	0,008	-	-	0,35-0,6	-	-	0,01	-	-	-	0,003	-	Geri Kalan	
EN AW- 5018		EN AW- Al Mg3Mn0,4	0,25	0,40	0,05	0,20-0,6	2,6-3,6	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5019		EN AW- Al Mg5	0,40	0,50	0,10	0,10-0,6	4,5-5,6	0,20	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5119		EN AW- Al Mg5(A)	0,25	0,40	0,05	0,20-0,6	4,5-5,6	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5040		EN AW- Al Mg1,5Mn	0,30	0,7	0,25	0,9-1,4	1,0-1,5	0,10-0,30	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5042		EN AW- Al Mg 3,5Mn	0,20	0,35	0,15	0,20-0,50	3,0-4,0	0,10	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5049		EN AW- Al Mg2Mn0,8	0,40	0,50	0,10	0,50-1,1	1,6-2,5	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5149		EN AW- Al Mg2Mn0,8(A)	0,25	0,40	0,05	0,50-1,1	1,6-2,5	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5249		EN AW- Al Mg2Mn0,8Zr	0,25	0,40	0,05	0,50-1,1	1,6-2,5	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5050		EN AW- Al Mg1,5(C)	0,40	0,7	0,20	0,10	1,1-1,8	0,10	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5050A		EN AW- Al Mg1,5(D)	0,40	0,7	0,20	0,30	1,1-1,8	0,10	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5051		EN AW- Al Mg2(B)	0,30	0,45	0,05	0,25	1,4-2,1	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5251		EN AW- Al Mg2	0,40	0,50	0,15	0,10-0,50	1,7-2,4	0,15	-	0,15	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5052		EN AW- Al Mg2,5	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	-	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5252		EN AW- Al Mg2,5(B)	0,08	0,10	0,10	0,10	2,2-2,8	-	-	0,05	-	-	-	0,03	0,10	Geri Kalan	
EN AW- 5352		EN AW- Al Mg2,5(A)	0,45 Si +	Fe	0,10	0,10	2,2-2,8	0,10	-	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5154A		EN AW- Al Mg3,5(A)	0,50	0,50	0,10	0,50	3,1-3,9	0,25	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5154B		EN AW- Al Mg3,5Mn0,3	0,35	0,45	0,05	0,15-0,45	3,2-3,8	0,10	0,01	0,15	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5354		EN AW- Al Mg2,5MnZr	0,25	0,40	0,05	0,50-1,0	2,4-3,0	0,05-0,20	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5454		EN AW- Al Mg3Mn	0,25	0,40	0,10	0,50-1,0	2,4-3,0	0,05-0,20	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5554		EN AW- Al Mg3Mn(A)	0,25	0,40	0,10	0,50-1,0	2,4-3,0	0,05-0,20	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5564		EN AW- Al Mg3,5Cr	0,45 Si +	Fe	0,05	0,01	31-3,9	0,15-0,35	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5754		EN AW- Al Mg3	0,40	0,40	0,10	0,50	2,6-3,6	0,30	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5056A		EN AW- Al Mg5															
EN AW- 5356		EN AW- Al Mg5Cr(A)	0,25	0,40	0,10	0,05-0,20	4,5-5,5	0,05-0,20	-	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5456A		EN AW- Al Mg5Mn1(A)	0,25	0,40	0,05	0,7-1,1	4,5-5,2	0,05-0,25	-	0,25	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	
EN AW- 5556A		EN AW- Al Mg5Mn	0,25	0,40	0,10	0,6-1,0	5,0-5,5	0,05-0,20	-	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan	

Yeni Gösterimi EN AW – 5019[AlMg5]

Tablo 2.8.- EN 573-3'e göre 5xxx serisi alüminyum alaşımları (devam).

Alaşım Gösterimini Simge	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyari	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min.)
EN AW- 5057	EN AW-Al99,85 Mg1(A)	0,08	0,10	0,10	0,03	0,6-1,0	-	-	0,05	0,03	0,05	-	-	0,02	0,05	Geri Kalan
EN AW- 5058	EN AW-Al Mg5Pb1,5	0,40	0,50	0,10	0,20	4,5-5,6	0,10	-	0,20	-	-	1,2-1,8Pb	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5082	EN AW-Al Mg4,5	0,20	0,35	0,15	0,15	4,0-5,0	0,15	-	0,25	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5182	EN AW-Al Mg4,5Mn0,4	0,20	0,35	0,15	0,20-0,50	4,0-5,0	0,10	-	0,25	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	0,40	0,40	0,10	0,40-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5183	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7(A)	0,40	0,40	0,10	0,50-1,0	4,3-5,2	0,05-0,25	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5283A	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7(B)	0,30	0,30	0,03	0,50-1,0	4,5-5,1	0,05	0,03	0,10	-	-	0,05 Zr	0,03	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5086	EN AW-Al Mg4	0,40	0,50	0,10	0,20-0,7	3,5-4,5	0,05-0,25	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 5087	EN AW-Al Mg4,5MnZr	0,25	0,40	0,05	0,7-1,1	4,5-5,2	0,05-0,25	-	0,25	-	-	0,10-0,20 Zr	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan

Tablo 2.9.- EN 573-3'e göre 6xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşımların Gösterimi	Alaşımların Sembolleri	Kimyasal Bileşim (%)														
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Digerleri Herbiri	Digerleri Toplam	Alüminyum (min)
EN AW-6101	EN AW-EAl MgSi	0,30-0,7	0,50	0,10	0,03	0,35-0,8	0,03	-	0,10	-	-	0,06B	-	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-6101A	EN AW-EAl MgSi(A)	0,30-0,7	0,40	0,05	-	0,40-0,9	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-6101B	EN AW-EAl MgSi(B)	0,30-0,6	0,10-0,30	0,05	0,05	0,35-0,6	-	-	1,10	-	-	-	-	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-6201	EN AW-EAl Mg _{0,7} Si	0,50-0,9	0,50	0,10	0,03	0,6-0,9	0,03	-	0,10	-	-	0,06B	-	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-6401	EN AW-Al99,9 MgSi	0,35-0,7	0,04	0,05-0,20	0,03	0,35-0,7	-	-	0,04	-	-	-	0,01	0,01	-	Geri Kalan
EN AW-6003	EN AW-Al Mg _{0,8} Si	0,35-1,0	0,6	0,10	0,8	0,8-1,5	0,35	-	0,20	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6005	EN AW-Al SiMg	0,6-0,9	0,35	0,10	0,10	0,40-0,6	0,10	-	0,10	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)	0,50-0,9	0,35	0,30	0,50	0,40-0,7	0,30	-	0,20	-	-	0,12-0,50Mn + Cr	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6005B	EN AW-AlSiMg(B)	0,45-0,8	0,30	0,10	0,10	0,40-0,8	0,10	-	0,10	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6106	EN AW-Al MgSiMn	0,30-0,6	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,8	0,20	-	0,10	-	-	-	-	0,05	0,10	Geri Kalan
EN AW-6011	EN AW-Al Mg _{0,9} Si _{0,9} Cu	0,6-1,2	1,0	0,40-0,9	0,8	0,6-1,2	0,30	0,20	1,5	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6012	EN AW-Al MgSiPb	0,6-1,4	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,30	-	0,30	-	-	0,7Bi; 0,40-2,0 Pb	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6013	EN AW-Al Mg _{1,8} CuMn	0,6-1,0	0,50	0,6-1,1	0,20-0,8	0,8-1,2	0,10	-	0,25	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6015	EN AW-Al Mg _{1,3} Cu	0,20-0,40	0,10-0,30	0,10-0,25	0,10	0,8-1,1	0,10	-	0,10	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6018	EN AW-Al Mg _{1,8} SiPbMn	0,50-1,2	0,7	0,15-0,40	0,30-0,8	0,6-1,2	0,10	-	0,30	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6351	EN AW-Al SiMg _{0,5} Mn	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	-	-	0,20	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6351A	EN AW-Al SiMg _{0,5} Mn(A)	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	-	-	0,20	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6951	EN AW-Al MgSi _{0,3} Cu	0,20-0,50	0,8	0,15-0,40	0,10	0,40-0,8	-	-	0,20	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6056	EN AW-Al SiMgCuMn	0,7-1,3	0,50	0,50-1,1	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,10-0,7	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	0,30-0,6	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,6	0,05	-	0,15	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6061	EN AW-Al MgSiCu	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6061A	EN AW-Al MgSiCu(A)	0,40-0,8	0,07	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6261	EN AW-Al Mg _{1,8} CuMn	0,40-0,7	0,40	0,15-0,40	0,20-0,35	0,7-1,0	0,10	-	0,20	-	-	-	0,10	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-6262	EN AW-Al Mg _{1,8} SiPb	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6063	EN AW-Al Mg _{0,7} Si	0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	-	0,10	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6063A	EN AW-Al Mg _{0,7} Si(A)	0,30-0,6	0,15-0,35	0,10	0,15	0,6-0,9	0,05	-	0,15	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6463	EN AW-Al Mg _{0,7} Si(B)	0,20-0,6	0,15	0,20	0,05	0,45-0,9	-	-	0,05	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6081	EN AW-Al Si _{0,9} MgMn	0,7-1,1	0,50	0,10	0,10-0,45	0,6-1,0	0,10	-	0,20	-	-	-	0,15	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6181	EN AW-Al SiMg _{0,8}	0,8-1,2	0,45	0,10	0,15	0,6-1,0	0,10	-	0,20	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6082	EN AW-Al SiMgMn	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-6082A	EN AW-Al SiMgMn(A)	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan

Tablo 2.10.- EN 573-3'e göre 7xxx serisi alüminyum alaşımları.

Alaşım Gösterimi	Alaşım Simge	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min)
EN AW-7003		EN AW-Al Zn6Mg0,8Zr	0,30	0,35	0,20	0,30	0,50-1,0	0,20	-	5,0-6,5	-	-	0,05-0,25 Zr	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7005		EN AW-Al Zn4,5Mg1,5Mn	0,35	0,40	0,10	0,20-0,7	1,0-1,8	0,06-0,20	-	4,0-5,0	-	-	0,08-0,20 Zr	0,01-0,06	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7108		EN AW-Al Zn5Mg1Zr	0,10	0,10	0,05	0,05	0,7-1,4	-	-	4,5-5,5	-	-	0,12-0,25 Zr	0,05	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7009		EN AW-Al Zn5,5MgCuAg	0,20	0,20	0,6-1,3	0,10	2,1-2,9	0,10-0,25	-	5,5-6,5	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7010		EN AW-Al Zn6MgCu	0,12	0,15	1,5-2,0	0,10	2,1-2,6	0,05	0,05	5,7-6,7	-	-	0,10-0,16 Zr	0,06	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7012		EN AW-Al Zn6Mg2Cu	0,15	0,25	0,8-1,2	0,08-0,15	1,8-2,2	0,04	-	5,8-6,5	-	-	0,10-0,18 Zr	0,02-0,08	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7015		EN AW-Al Zn5Mg1,5CuZr	0,20	0,30	0,06-0,15	0,10	1,3-2,1	0,15	-	4,6-5,2	-	-	0,10-0,20 Zr	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7016		EN AW-Al Zn4,5Mg1,5Cu	0,10	0,12	0,45-1,0	0,03	0,8-1,4	-	-	4,0-5,0	-	0,05	-	0,03	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-7116		EN AW-Al Zn4,5Mg1Cu0,8	0,15	0,30	0,50-1,1	0,05	0,8-1,4	-	-	4,2-5,2	0,03	0,05	-	0,05	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7020		EN AW-Al Zn4,5Mg1	0,35	0,40	0,20	0,05-0,50	1,0-1,4	0,10-0,35	-	4,0-5,0	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7021		EN AW-Al Zn5,5Mg1,5	0,25	0,40	0,25	0,10	1,2-1,8	0,05	-	5,0-6,0	-	-	0,08-0,18 Zr	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7022		EN AW-Al Zn5Mg3Cu	0,50	0,50	0,50-1,0	0,10-0,40	2,6-3,7	0,10-0,30	-	4,3-5,2	-	-	0,20 Ti + Zr	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7026		EN AW-Al Zn5Mg1,5Cu	0,08	0,12	0,6-0,9	0,05-0,20	1,5-1,9	-	-	6,2-5,2	-	-	0,09-0,14 Zr	0,05	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-7079		EN AW-Al Zn4,5Mg1,5Cu	0,10	0,12	0,50-0,9	0,03	1,3-2,0	-	-	4,2-5,2	-	0,05	-	0,05	0,03	0,10	Geri Kalan
EN AW-7129		EN AW-Al Zn4,5Mg1,5Cu(A)	0,15	0,30	0,50-0,9	0,10	1,3-2,0	0,10	-	4,2-5,2	0,03	0,05	-	0,05	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7030		EN AW-Al Zn5,5Mg1Cu	0,20	0,0	0,20-0,40	0,05	1,0-1,5	0,04	-	4,8-5,9	0,03	-	0,03 Zr	0,03	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7039		EN AW-Al Zn4Mg3	0,30	0,40	0,10	0,10-0,40	2,3-3,3	0,15-0,25	-	3,5-4,5	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7049A		EN AW-Al Zn8MgCu	0,40	0,50	1,2-1,9	0,50	2,1-3,1	0,05-0,25	-	7,2-8,4	-	-	0,25 Zr + Ti	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7149		EN AW-Al Zn8MgCu(A)	0,15	0,20	1,2-1,9	0,20	2,0-2,9	0,10-0,22	-	7,2-8,2	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7050		EN AW-Al Zn6CuMgZr	0,12	0,15	2,0-2,6	0,10	1,9-2,6	0,04	-	5,7-6,7	-	-	0,08-0,15 Zr	0,06	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7150		EN AW-Al Zn6CuMgZr(A)	0,12	0,15	1,9-2,5	0,10	2,0-2,7	0,04	-	5,8-6,9	-	-	0,08-0,15 Zr	0,06	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7060		EN AW-Al Zn7CuMg	0,15	0,20	1,8-2,6	0,20	1,3-2,1	0,15-0,25	-	6,1-7,5	-	-	0,05 Zr	0,05	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7072		EN AW-Al Zn1	0,7 Si +	Fe	0,10	0,10	0,10	-	-	0,8-1,2	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7075		EN AW-Al Zn5,5MgCu	0,40	0,50	1,2-2,0	0,30	2,1-2,9	0,18-0,28	-	5,1-6,1	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7175		EN AW-Al Zn5,5MgCu(B)	0,15	0,20	1,2-2,0	0,10	2,1-2,9	0,18-0,28	-	5,1-6,1	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7475		EN AW-Al Zn5,5MgCu(A)	0,10	0,12	1,2-1,9	0,06	1,9-2,6	0,18-0,25	-	5,2-6,2	-	-	-	0,06	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW-7173		EN AW-Al Zn7MgCu	0,40	0,50	1,6-2,4	0,30	2,4-3,1	0,18-0,28	-	6,3-7,3	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan

Tablo 2.11.- EN 573-3'e göre 8xxx serisi alüminyum alaşımları .

Alaşım Gösterimi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)														
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyarı	Ti	Diğerleri Herbiri	Diğerleri Toplam	Alüminyum (min)
EN AW- 8006	EN AW-Al Fe1,5Mn	0,40	1,2-2,0	0,30	0,30-1,0	0,10	-	-	1,10	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8008	EN AW- Al Fe1Mn0,8	0,6	0,9-1,6	0,20	0,50-1,0	-	-	-	0,10	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8011A	EN AW- Al FeSi(A)	0,40-0,8	0,50-1,6	0,10	0,10	0,10	0,10	-	0,10	-	-	-	0,05	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8111	EN AW- Al FeSi(B)	0,30-1,1	0,40-1,6	0,10	0,10	0,05	0,05	-	0,10	-	-	-	0,08	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8211	EN AW- Al FeSi(C)	0,40-0,8	0,50-1,0	0,10	0,05-0,20	0,10	0,15	-	0,10	-	-	-	0,05	0,06	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8112	EN AW- Al 95	1,0	1,0	0,40	0,6	0,7	0,20	-	1,0	-	-	-	0,20	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8014	EN AW- Al Fe1,5Mn0,4	0,30	1,2-1,6	0,20	0,20-0,6	0,10	-	-	0,10	-	-	-	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8016	EN AW- Al Fe1Mn	0,20	0,7-1,1	0,10	0,10-0,30	0,10	-	-	0,10	-	-	-	-	0,03	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8018	EN AW- Al FeSiCu	0,50-0,9	0,6-1,0	0,30-0,6	0,30	-	-	-	-	-	-	-	0,006-0,06	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8079	EN AW- Al FeSi	0,05-0,30	0,7-1,3	0,05	-	-	-	-	0,10	-	-	-	-	0,05	0,15	Geri Kalan
EN AW- 8090	EN AW- Al Li2,5Cu1,5Mg1	0,20	0,30	1,0-1,6	0,10	0,6-1,3	0,10	-	0,25	-	-	0,04-0,16 Zr	0,10	0,05	0,15	Geri Kalan

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıtıl işlem uygulanamayan türlerdir ve bunlar yalnızca şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıtıl işleme tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısıtıl işleme tabi tutulabilir hem de ısıtıl işleme tabi tutulamaz alaşımlar içerir (Anderson 2002).

Isıtıl işleme tabi tutulabilir alaşımlar, en yüksek mekanik özelliklerini en genel olarak çözeltiye alma ısıtıl işlemi veya yapay yaşlandırma ısıtıl işlemleri ile kazanırlar. Çözeltiye alma ısıtıl işleminde alaşım, çözelti (solution) içine alaşım elementleri veya bileşik katmak için yaklaşık 532°C'ye kadar ısıtılır, arkasından hızlı soğutma gelir, bu işlem; oda sıcaklığında aşırı doymuş çözelti sağlamak için genelde su içinde yapılır. Genellikle bunu, yaşlandırma ısıtıl işlemi takip eder. Yaşlandırma; istenen akma özellikleri için, aşırı doymuş çözeltiden bir miktar element veya bileşiğin çökeltilmesidir. İki yaşlandırma yöntemi vardır; ilki, oda sıcaklığında yapılan doğal yaşlandırma olarak adlandırılan yöntem, diğeri ise; yüksek sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırmadır. Yapay yaşlandırma sıcaklıkları genel olarak yaklaşık 160°C' dir. Burada, çökeltme sonucunda tanelerin içinde, ışık mikroskobu ile seçilemeyen çok ufak zerreler oluşur. Bu submikroskopik zerreler kaymayı önler ve alaşım sertleşir ve mukavemeti artar. Tavlama devam edilirse bu taneler büyür ve görünür duruma gelir ve bu durumda da kaymayı engelleyemediklerinden dolayı alaşım kazanmış olduğu mukavemet özelliklerini yitirir.

Çökeltme sertleştirmesinde uygulanan ısıtıl çevrimler, her alaşım için farklıdır ve deneyler ile saptanmıştır, istenen sonucu elde etmek için verilmiş olan tav sıcaklık dereceleri ve sürelerine hassas olarak uyulmalıdır (Tülbentçi 1987, Anık ve diğ. 1993).

Çözeltiye alma ısıtıl işlemi ve yapay yaşlandırma koşulları içinde, bir çok ısıtıl işleme tabi tutulabilir alüminyum alaşımları kaynaklı üretim için kullanılır.

Isıtıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekillendirme yoluyla sertlik ve mukavemeti artırma yöntemi olan şekil değiştirme sertleştirmesi ile kazanırlar. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan temel sertleştirme işlemlerinin gösterimi Tablo 2.12, 2.13 ve 2.14'de verilmiştir. Ayrıca, ülkemizde halen geçerli olan TS 1321'e göre de tanımlanan bu işlemler toplu olarak Tablo 2.15'de gösterilmiştir.

6061-T6, 6063-T4, 5052-H32 ve 5083-H112 alaşımlarının gösteriminde olduğu gibi alaşım numaralama sistemini ısıtma işlemiyle bir tire ile birleştiren, serilerin harflerini alaşım gösterim numarasının takip ettiği sistemdir ve bu gösterim tüm standartlarda aynıdır.

Tablo 2.12.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının temel ısıtma (temperleme) işlemlerinin gösterimi (Anderson 2000, Metals Handbook 1991).

Harf	Anlamı
F	Üretim- Ürünlerde hiç bir özel ısıtma kontrol veya sertleştirme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi
O	Tavlama- Uygulanan tav, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için uygulanır.
H	Şekil değiştirme sertleştirme- soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısıtma işlemi uygulanması takip eder. H' 1 genelde iki veya daha çok sayı takip eder.
W	Çözeltiye alma (çökelti sertleştirme) ısıtma işlemi- kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözeltiye alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanmayı sağlayan tav uygulanır.
T	Isıtma İşlemi- F, O, H' dan daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünler tav uygulaması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleştirmeyle birlikte uygulanır.

Tablo 2.13.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının H (sertleştirme) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi (Anderson 2000, Metals Handbook 1991).

H' dan sonraki ilk rakam temel işlemi tanımlar.
H1— Sadece Şekil Değiştirme Sertleştirme
H2— Şekil Değiştirme Sertleştirme ve Yapay Yeniden Kristalleştirme
H3— Şekil Değiştirme Sertleştirme ve Yapı Dengeleme
H4— Şekil Değiştirme Sertleştirme ve Parlatma veya Boyama
H' dan sonraki ikinci harf şekil değiştirme sertliğinin derecesini tanımlar.
HX2— Dörtte bir
HX4— Yarım Sert
HX6— Üç-çeyrek Sert
HX8— Tam Sert
HX9— Çok Sert

Tablo 2.14.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının T (ısıtım işlem) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi (Anderson 2000, Metals Handbook 1991).

T1— Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaşlandırma
T2— Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma
T3— Çözeltiye alma ısıtım işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma
T4— Çözeltiye alma ısıtım işlemi ve doğal yaşlandırma
T5— Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra yapay yaşlandırma
T6— Çözeltiye alma ısıtım işlemi ve yapay yaşlandırma
T7— Çözeltiye alma ısıtım işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaşlandırma)
T8— Çözeltiye alma ısıtım işlemi, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma
T9— Çözeltiye alma ısıtım işlemi, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme
T10— Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaşlandırma

Eklenen numaralar gerilme gidermeleri tanımlar.

Örnek:

TX51 veya TXX51— Çekmeyle gerilim giderme

TX52 veya TXX52— Basmayla gerilim giderme

2.3.1.2. Dövme alüminyum alaşımlarının türlerinin incelenmesi

2.3.1.2.1. 1xxx serisi alaşımlar

Bu seri en yüksek 70- 190 N/mm² lik çekme mukavemetli, ısıtım işleme tabi tutulmaz seridir. Bu seri genelde saf alüminyum serisidir, zira bu seriden en az %99.0 alüminyum içeriğine sahip olması istenir. Bu alaşımlar kaynak edilebilir, ancak dar ergime bölgesi nedeniyle uygun kaynak prosedürleri uygulanması önemle istenir.

Üretim için, bu alaşımlar, özellikle kimyasal madde tankları ve boru hatları gibi yüksek korozyon direnci gerektiren uygulamalarda veya elektrik iletim hatları gibi yüksek elektrik iletkenliği gereken uygulamalarda seçilir. Bu alaşımlar gerçekte düşük mekanik özelliklere sahiptir ve nadiren yapısal uygulamalarda kullanılır. Bu esas metaller genelde uygulama ve mekanik özellik gereksinimlerine bağlı olarak benzer ek kaynak metali veya 4xxx serisi ek kaynak metalleri ile kaynak edilirler (Anderson 2000, Domke 1988).

Tablo 2.15.- TS 1321'e göre alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan temel sertleştirme işlemlerinin gösterimi (Topbaş 1993).

M	Üretildiği biçimde		
F	İşlendiği biçimde		
O	Yumuşak tavllanmış		
H	Soğuk biçimlendirme ile sertleşmiş (H harfinden sonra temel işlem tipini belirten bir rakam ve soğuk biçimlendirmenin durumunu gösteren ikinci bir harf kullanılır).		
<u>Temel işlem tipleri</u>			
H1	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş		
H2	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve kısmi tavllanmış		
H3	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve stabilize edilmiş		
<u>Soğuk biçimlendirme sertleşmesinin son durumu</u> (x harfi, 1, 2 ve 3'ten uygun olanını ifade eder; ancak bazı uygulamalarda bu rakamlar kullanılmadan belirtme yapıldığı da görülür.			
HxH	Tam sertleştirme işlemi		
HxI	Çekme dayanımı yaklaşık O hali ile HxH değerleri arasında		
HxF	Çekme dayanımı yaklaşık O hali ile HxD değerleri arasında		
HxD	Çekme dayanımı yaklaşık HxD hali ile Hx Hdeğerleri arasında		
HxJ	Çekme dayanımı HxH değerinden çok.		
T	M, F, O ve H'dan başka ısı işlem görmüş (T harfinden sonra, işlemlerin belirli sırasını gösteren ikinci bir harf kullanılır).		
TA	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış		
TB	Katı çözelti ısı işlemi uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış		
TC	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş, Doğal yaşlandırılmış.		
TD	Katı çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk biçimlendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.		
TE	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş ve katı çözelti ısı işlemi uygulanmış.		
TF	Katı çözelti ısı işlemi uygulanmış ve katı çözelti işlemi uygulanmış.		
TG	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş ve çözelti işlemi görmüş.		
TH	Katı çözelti işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve katı çözelti işlemi uygulanmış.		
TL	Katı çözelti ve katı çözelti işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş.		
TM	Çözelti işlemi uygulanmış ve stabilize edilmiş (dengeleştirilmiş).		
TS 1321'deki gösterim	Alternatif gösterim	TS 1321'deki gösterim	Alternatif gösterim
M	H 112	TB	T4
F	F	TC	T2
O	O	TD	T3
H1B, H2B, H3B	H12, H22, H32	TE	T5
H1D, H2D, H3D	H14, H24, H43	TF	T6
H1F, H2F, H3F	H16, H26, H36	TG	T10
H1H, H2H, H3H	H18, H38, H38	TH	T8
H1J, H2J, H3J	H19, H29, H39	TL	T9
TA	T1	TM	T7

2.3.1.2.2. 2xxx serisi alaşımlar

Bu serinin üyeleri ısıl işleme tabi tutulabilir ve 186 ile 428 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir. Bu alaşımlar alüminyum/bakır alaşımlarıdır (toplam bakır oranı %0.7'den %6.8'e kadardır) ve yüksek mukavemet, yüksek performans alaşımları genellikle uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılır. Bu alaşımlar geniş sıcaklık alanları üzerinde yüksek mukavemete sahiptir (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

Bu alaşımlardan bazıları sıcak çatlama ve gerilmeli korozyon çatlağı hassasiyeti nedeniyle ark kaynak yöntemleri ile kaynak edilemezler, ancak diğerleri uygun kaynak yöntemi kullanarak başarıyla kaynak edilirler. Bu esas metaller genelde yüksek mukavemetli performanslarına uygun düşünölmüş 2xxx serisi ek kaynak metalleriyle kaynak yapılır, ancak bazı uygulama ve istenen çalışma isteklerine uygun 4xxx serisi silisyum ve silisyum-bakır içeren ek kaynak metalleri ile de kaynak edilebilirler (Anderson 2000, Metals Handbook 1990, Welding Handbook 1996).

2.3.1.2.3. 3xxx serisi alaşımlar

Bu ısıl işleme tabi tutulamayan seri, 110- 283 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar alüminyum/mangan alaşımlarıdır (toplam mangan oranı %0.05'ten %1.8'e kadardır). Bu alaşımlar iyi korozyon dirençli ve yüksek sıcaklıkta kullanım için uygunlukla birlikte orta mukavemetlidir. Bu alaşımların bazı kullanım alanları tencere ve tava yapımıdır, bugün arabalardaki ısı eşanjörleri ve güç üniteleri için temel bileşen bu alaşımlardır. Orta mukavemetleri genellikle mukavemetli uygulamalar için kullanımlarına engel olmaktadır. Bu esas metaller, kimyasal bileşimleri, çalışma isteklerine bağlı olarak 1xxx, 4xxx ve 5xxx serisi ek kaynak metalleri ile kaynak edilebilir (Anderson 2000, Metals Handbook 1990, Welding Handbook 1996).

2.3.1.2.4. 4xxx serisi alaşımlar

Yalnızca bu seri hem ısıl işleme tabi tutulabilir hem ısıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar içermektedir. Bu alaşımlar 172- 379 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar alüminyum/ silisyum alaşımlarıdır. (toplam silisyum oranı %0.6'dan %21.5'e kadardır)

Silisyum alüminyuma eklendiğinde ergime sıcaklığını yükseltir ve ergimiş durumdaki akışkanlığını iyileştirmiş olur. Özellikle, yaklaşık %12 Si içeren alaşımın akışkanlığı yüksektir ve bu açıdan döküm kabiliyeti iyidir ve ıslatma özeliği de iyi olduğundan kaynak teli olarak kullanımı oldukça yaygındır. Bu karakteristikler, tüm ergitme kaynakları ve lehimlemenin her ikisi için de kullanılan ek kaynak metalleri için istenir. Bundan dolayı bu seriler, çoğunlukla ek kaynak metali olarak kullanılırlar. Alüminyum içindeki serbest silisyumdan dolayı ısıtılma işlemi tabii tutulamaz, bunun yanında silisyum alaşımlarının bazıları ısıtılma işlemi tabii tutulabilme yeteneği sağlayan magnezyumla veya bakırla birlikte bulundurulur. Örneğin, bu ısıtılma işlemi uygulanabilir ek kaynak metalleri yalnızca kaynak sonrasında tav uygulamalarına bağlı olarak seçilerek kullanılırlar (Anderson 2002, Metals Handbook 1990, Welding Handbook 1996).

2.3.1.2.5. 5xxx serisi alaşımlar

Bu ısıtılma işlemi tabii tutulamayan seri 124- 352 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar alüminyum/magnezyum alaşımlarıdır (toplam magnezyum oranı %0.2'den %6.2'ye kadardır) ve ısıtılma işlemi tabii tutulamayan alaşımlar içinde en yüksek mukavemete sahiptir. Bu alaşımlar; kolay kaynak edilebilirliği nedeniyle gemi yapımı, taşımacılık, basınçlı kaplar, köprüler ve binalar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

Deniz suyu korozyonuna da dirençli olan Al-Mg alaşımları, yüksek korozyon dirençleri ve kolay şekillendirilme istenen, mekanik özelliklerin fazla önemli olmadığı atmosfer etkilerine açık olan yapı elemanları gibi yerlerde de tercih edilirler. Bu alaşımlar, levha, band, boru, çubuk, tel ve profil olarak biçimlendirilerek kullanılırlar (Topbaş 1993).

Magnezyum alaşımları genellikle esas metal içindeki magnezyuma, kaynak dikiş bileşimine ve çalışma koşullarına bağlı olarak belirlendikten sonra seçilen ek kaynak metali ile kaynak edilir. Bu serideki %3.0'dan fazla magnezyumlu alaşımlar, 66°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklar için zorlamaya hassasiyeti ve daha sonra gelen gerilmeli korozyon çatlama hassasiyeti nedeniyle önerilmez. % 2.5'ten az magnezyum içeren esas metaller genellikle 5xxx veya 4xxx serisi ek kaynak metalleri ile başarıyla kaynak edilirler. 5052 alaşımı genellikle 4xxx serisi bir ek kaynak metali ile kaynak edilebilen en

çok kaynak edilebilir esas metal olarak kabul edilir. Ötektik ergime ve zayıf mekanik özelliklerdeki kaynak problemleri nedeniyle bu serideki yüksek oranda magnezyum içeren alaşımlar için 4xxx serisi ek kaynak metalleri ile kaynak yapılması önerilmez. Daha yüksek magnezyum içeren esas metaller, yalnız esas alaşım bileşimine göre seçilen 5xxx serisi ek kaynak metalleri ile kaynak edilir(Anderson 2000, Metals Handbook 1990, Welding Handbook 1996).

2.3.1.2.6. 6xxx serisi alaşımlar

Bu seri ısı işleme tabi tutulabilir ve 124- 221 N/mm² lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar; Al/ Mg-Si alaşımları (toplam magnezyum ve silisyum oranı yaklaşık %1'dir). Kaynaklı üretimde geniş çapta kullanılırlar, çoğunlukla ekstrüzyon ürünü ve farklı yapı bileşenlerini birleştirmek için kullanılırlar. Alüminyuma magnezyum ve silisyum eklemekle ki silisyum tavlama çözünen magnezyum silikat bileşimi oluşur. Bu alaşımlar doğal olarak çatlama duyarlılığı nedeniyle (ek kaynak metali kullanılmadan) kaynak edilmemelidir. Ark kaynağı yöntemi süresince uygun miktarda ek kaynak metali kullanmak esas metalin ısınmasını sağlar, bu sayede sıcak çatlama problemi önlenmiş olur. Bu alaşımlar, uygulama ve çalışma isteklerine bağlı olarak 4xxx ve 5xxx ek kaynak metallerinin her ikisi ile de kaynak edilirler (Anderson 2000, Metals Handbook 1990, Welding Handbook 1996).

2.3.1.2.7. 7xxx serisi alaşımlar

Isıl işleme tabi tutulabilir, 221- 607 N/mm² çekme mukavemetli bu alüminyum / çinko alaşımları (toplam çinko oranı %0.8'den %12'ye kadardır) alüminyum alaşımları içinde en yüksek mukavemet değerine sahip olanlardır.

Bu alaşımlar genellikle havacılık, uzay ve spor malzemeleri gibi yüksek performans istenen uygulamalarda kullanılır. 2xxx serisi gibi bu seri de, diğerleri gibi genelde başarıyla kaynak edilirken ark kaynağı için uygun olmayan bazı alaşımlar içermektedir. Genellikle bu serideki 7005 alaşımı gibi kaynak edilebilir alaşımlar çoğunlukla 5xxx serisi ek kaynak metali kullanımıyla kaynak edilirler (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

2.3.1.3. Dövmeye alüminyum alaşımlarının önemli türleri

AlMn: Sertleştirilemeyen bir alaşımdır. % 0.8- 1.5 Mn içerir. Özellikleri ve kullanımı saf alüminyum gibidir, ancak mukavemet değerleri biraz yüksektir (Domke 1988).

AlMg: Sertleştirilemeyen bir alaşımdır. % 0.6- 7 Mg ve % 0.2- 0.6 Mn içerir. Deniz suyu direnci yüksektir. Mg oranına göre çok farklı yerlerde kullanılır. AlMg1 saf Al gibidir. AlMg5'in yumuşak durumdaki çekme mukavemeti 200 N/mm²'den fazladır. Taşıt ve gemi yapımında kullanılır. Mg'un %5'den fazla olması durumunda kaynak edilmesi ve işlenebilmesi zorlaşır, artık kaynak gerilmeleri nedeniyle korozyona uğrar ve çok iyi eloksallanabilme özelliğine sahiptir (Domke 1988).

AlMgMn: AlMg alaşımlarının sertleştirilemeyen türüdür. % 1.6 Si ve % 0- 1 Mn içerir. En çok 320 MPa çekme mukavemetine sahip orta mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır. Akma mukavemeti (Rp_{0.2}) 110- 260 MPa arasında değişebilir. Korozyon direnci iyidir, parlatma ve eloksallanmaya uygundur. Bu grupta elektroteknikte iletken olarak kullanılan E-AlMgSi (Aldrey) ve E-AlMgSi0.5 alaşımlarının mukavemetleri saf alüminyuma göre yüksek ve iletkenlikleri saf alüminyumdan daha az düşüktür. Yüksek derecede (%90) soğuk şekil değiştirme ve çökeltme sertleştirilmesi ile mukavemetin biraz azalmasına karşın elektrik iletkenliği daha da artırılır (Domke 1988, Topbaş 1993).

AlCuMg: Sertleştirilebilir bir alaşımdır, % 2.5- 4.5Cu, % 0.4- 1.5Mg ve % 0.5- 1 MN içerir. Çekme mukavemetini 440 MPa ve akma mukavemetini (Rp_{0.2}) 290 MPa değerine yükseltmek olanağı vardır. Mg'un etkisiyle hızlanan çökeltme oda sıcaklığında gerçekleştirilebilir. Ancak, daha soy olan Cu eklenmesiyle korozyona karşı hassaslaşır ve bu durum malzeme yüzeyine saf alüminyum ince bir tabaka kaplanmasıyla giderilebilir (Domke 1988, Topbaş 1993).

AlZnMg: Yaklaşık 350 MPa çekme mukavemetleriyle AlCuMg alaşımlarından daha düşük mukavemetli olmalarına karşılık, kimyasal etkilere karşı daha dirençlidirler. Bu alaşım grubu, mekanik özellikler ve korozyon dirençleri bakımından optimum çözümü verir (Topbaş 1993).

AlZnMgCu alaşımları: Yalnızca çökeltme sertleştirmesi uygulanmış durumda, 530 MPa çekme mukavemeti değeriyle en yüksek mukavemetli alaşımlardır. Ancak, bakırdan dolayı korozyon dirençleri düşüktür, bu nedenle gerektiğinde saf alüminyum ile kaplanarak kullanılırlar (Topbaş 1993).

En önemli dövme alüminyum alaşımları, yaklaşık % 1 ile 5 Mg içeren sertleşmeyen alaşımlar ve sertleşebilir Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg alaşımlarıdır. Bu alaşımların çekme mukavemetleri, yumuşak tavlı durumlarında oldukça düşüktür. Mukavemet, Al-Mg alaşımlarında soğuk şekillendirmeyeyle iyileştirilebilir ve yumuşak tavlı malzemenin dışında, yarı sert ya da sert olarak ta üretilerek pazara sunulabilirler. Bu kalitede mukavemet, örneğin AlMg5 alaşımında (6 mm'ye kadar saclar için) 240, 280 ye 320 MPa kadardır. Kopma uzaması (A_5) aynı sıraya uygun olarak, % 17'den % 4'e düşer. Sertleşebilir alaşımlar, haddelenmiş olarak elde edilen sertlikte, yumuşak ya da çökeltme ile sertleştirilmiş olarak pazara sunulabilirler. Yumuşak durumdaki alaşımların çekme mukavemeti, sertleşmeyen alaşımlardan pek farklı değildir (Örneğin, AlCu4Mg2 alaşımında yumuşak tavlı durumda, 6 mm'ye kadar saclar için çekme mukavemeti yaklaşık 240 MPa kadardır, ancak sertleştirilmiş durumda, soğuk haddelemeyle sertleşmeye göre oldukça fazla mukavemet değerlerine ulaşılır. Örneğin, AlCu4Mg2 (6 mm'ye kadar saclarda) soğuk çökeltme sertleşmesiyle 440 MPa çekme mukavemetine ulaşılır. Orta mukavemetli Al-Mg-Si alaşımlarının, teknikte ayrı bir önemi vardır. Bunlar çok iyi şekillendirilebilirler ve bundan dolayı, ekstrüzyon presleme ile profil üretiminde kullanılırlar. AlMgSi0,5 alaşımında şekillendirme sıcaklığı, yaklaşık olarak ayrışma tavlaması sıcaklığı kadardır ve çökeltme sertleştirmesi ısıl işlemindeki ayrışma tavlaması sıcaklığı yerine kullanılabilir (Topbaş 1993).

2.3.2. Döküm alüminyum alaşımları

Bu tür alaşımların büyük çoğunluğu silisyum içerir; %11.7 Si içeren alaşım ötektik bileşimde olduğundan çok üstün döküm özelliklerine sahiptir. Bu alaşımın korozyona direnci ve kaynak kabiliyeti de oldukça iyidir. Döküm alüminyum alaşımlarına bir miktar bakır katılması, talaş kaldırma özelliklerini geliştirir, buna karşın, korozyon direncinde azalmaya neden olur. Döküm alüminyum alaşımlarına silisyumdan başka

magnezyum katılarak çökeltme yolu ile sertleştirilebilen ve deniz suyunun korozif etkilerine dirençli alaşımlar elde edilir. 2xx.x, 3xx.x, 4xx.x ve 7xx.x serisi döküm alaşımlar ise, ısı işleme tabi tutulabilirler. Şekil değiştirme sertleştirilmesi genelde döküm alaşımlarına uygulanamaz (Tülbentçi 1987).

Alüminyum Birliği'nin standardizasyonuna göre alaşımları ülkemizde de TS 410/Nisan 1975'de yayımlanmış "Alüminyum Alaşımlarından Yapılan Dökümlerin Bileşimi" adlı standardda tanımlanmışlardır. Günümüzde bu tür alaşımlar için hazırlanmış olan EN 1706 ve EN 1780 serisi standartlar geçerlidir. Ancak, bu çalışmada bu tür alaşımlar kullanılmadığından burada bu gösterimlere yer verilmemiştir.

Tablo 2.15.- Alüminyum Birliği standartlarına göre döküm alüminyum alaşımlarının simgelenmesi (Tülbentçi ve Kaluç 1985).

Alüminyum Birliği No.	Başlıca Alaşım Elementi
1 xx.x	Saf alüminyum (%99'dan daha fazla)
2 xx.x	Bakır
3 xx.x	Silisyum+bakır ve/veya Magnezyum
4 xx.x	Silisyum
5 xx.x	Magnezyum
6 xx.x	Kullanılmayan seriler
7 xx.x	Çinko
8 xx.x	Kalay
9 xx.x	Diğer elementler

Tablo 2.16.- ISO'ya göre standardize edilen kaynak edilebilir döküm alüminyum alaşımları ve uygulama alanları (Tülbentçi ve Kaluç 1985).

ISO	Uygulama Alanları
Al 99.5	Kuma döküm, kimya ve gıda endüstrisi
AlSi 10 Cu 2 Fe	Metal kalıba döküm
AlSi 5 Cu 3	Kuma döküm, metal kalıba döküm, genel mühendislik uygulamaları
AlMg 5 AlSi 12	Kuma döküm, metal kalıba döküm, deniz taşıtları
AlSi 12 Mg	Kuma döküm, soğutma plakalı döküm, metal kalıba döküm, genel mühendislik uygulamaları
AlSi 12 CuFe	Soğutma plakalı döküm, metal kalıba döküm, genel mühendislik uygulamaları
AlSi 7 Mg AlSi 7 Cu 2	Kuma döküm, soğutma plakalı dökümler, genel mühendislik uygulamaları

2.4. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Kollarında Kullanımı

2.4.1. Otomotiv endüstrisi

Günümüzde, alüminyumun kaynak edilerek birleştirilmesinde en dinamik ilerleme, otomotiv endüstrisinde olmaktadır. Otomobilde görülen birçok bileşen alüminyumdan yapılmakta ve korozyon direnci, artırılmış yakıt verimi, yeniden dönüştürülebilmesi ve kullanımı gibi çevresel konulardan dolayı uygulamalar artmaktadır. Motor blokları, ön ve arka süspansiyon elemanları, şaft ve tekerlek jantları gibi ana yapısal bileşenlerin tamamen alüminyumdan üretilmesi; ısı eşanjörleri, radyatör ve klima birimleri gibi daha geleneksel, yapısal olmayan bileşenleri bütünlemektedir.

Kaynaklı yapı bileşenlerinin çoğu, karmaşık ekstrüde edilmiş biçimleri verebilmek ve MIG yöntemiyle kaynak edebilmek için; 6xxx serisi kullanılarak üretilmektedir. Yakıt verimi sağlamasının dışında alüminyumun kullanımıyla ilgili bir diğer etken de emniyettir. Alüminyumun temel fiziksel karakteristikleri, otomobil tasarımında; yalnızca çarpışmalarda daha iyi performans göstermekte kalmaz, kazaların tümünü önlemeye de yardım eder. Alüminyumun mukavemet/ağırlık oranı, daha üstün enerji absorpsiyonu için daha büyük araç parçaları tasarımına olanak sağlamaktadır. Çelikte aynı enerjiyi absorbe edebilmek için, ağırlığın sadece % 55'inde alüminyum yapılar tasarlanabilir. Bu ağırlık tasarrufu; bir çarpışmada daha az kinetik enerji absorbe gereksinimini getirir. Alüminyumun çok kullanıldığı araçlar, daha iyi taşıma ve fren kabiliyeti sağlar ve bu sayede kazalardan sakınım kabiliyeti de gelişir. Otomotiv endüstrisindeki kaynak uygulamaları çeşitlilik göstermesine karşın, olanaklı olan yerlerde robot kullanımı da artmaktadır.

İnce et kalınlıklı ısı eşanjörlerinin üretiminde %11' den %13' e kadar silisyum içeren ve kendini çekme oranını azaltan üstün akıcılığı sağlayan, verimliliği artıran 4047 ek kaynak metali (AlSi12) kullanılmaktadır. Bu endüstride, daha üstün mukavemet değerleri ve çentik darbe özellikleri için, daha kalın malzeme uygulamalarında 5356 ek kaynak metali kullanılır (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

2.4.2. Gemi yapım endüstrisi

Deniz taşımacılığındaki yeni gelişmelerde, alüminyumun gemi yapımında kullanımıyla hızlı feribot projelerinde ilerlemeler ortaya çıkmıştır. Kar amacıyla, nakliye firmaları; hızlı, verimli ve az tamir- bakım gerektiren alüminyum gövdeli yüksek hızlı feribotların yapımını araştırmaktadırlar. Hızlı feribotlar terimi, büyük yolcu yükü ve kargoyu yüksek hızlarda taşımak için yapılan küçük gemiler, dalgakıran sallar ve tek veya çok bölmeli gemileri ifade etmektedir. Bu gemiler genellikle 100- 130 feet (30- 40 m) uzunlukta ve 30- 35 knots (35- 40 mph) hızda seyahat etmektedir. Alüminyumun ağırlıkça çok kullanıldığı çok büyük feribotlar ise 260 feet (80 m) uzunluğundadır, 700 yolcu ve 150 otomobil taşımaktadır. Quadrimanlar, deniz taşımacılığında kullanılan en yeni araçlardır, 180 feet (54 m) uzunluğundadır ve 600 yolcu taşıma kapasitesinde yeni versiyonları tasarlanmıştır. Bu hızlı feribotlar 60 knots (69 mph) hızlarında seyahat etmekte, ancak 110 knots (126.5 mph) hızlarına çıkabilmektedirler.

Gemi yapımı endüstrisi, yönergelerde istenen minimum çekme mukavemetlerini elde etmek amacıyla 5183 ek kaynak metali ile kaynak edilen, yüksek mukavemetli, magnezyumlu 5083 alaşımının kullanımına geçmiştir.

İyi kalitede kaynak dikişi için, gözenekliliği azaltmak ve daha derin nüfuziyet sağlamak için genellikle Ar/He koruyucu gaz karışımları kullanılmaktadır. Alüminyumun düşük ağırlık/yüksek mukavemet oranı ve korozyona dirençli olması, yüksek hızlı deniz taşıtı uygulamalarının gelişimini olanaklı kılmaktadır (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

2.4.3. Eğlence ve spor malzemeleri yapım endüstrisi

İleri teknoloji spor malzemelerindeki ilerleme ve 7xxx serisi gibi yüksek mukavemetli ısıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının kullanımındaki artış, endüstride tamamen değişmiştir. Son tasarımlar; hafif, yüksek performanslı alüminyum malzemeleri içermektedir. Bisiklet iskeletleri, beyzbol sopaları, golf raketleri, kızaklar ve motorlu kızaklar; alüminyum alaşımlarının kullanıldığı bazı

ürünlerdir. Bu endüstride özel ısıl işlemlere cevap veren ek kaynak metal tasarımlarının kullanımı ve geliştirilmesi, esas metal mukavemetine uyumlu kaynak teknikleri ve ekipmanlarının geliştirilmesini ortaya çıkarmıştır (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

2.4.4. Taşımacılık ve konteyner yapım endüstrisi

Otomotiv endüstrisindeki nedenlere benzer olarak taşıma araçları daha çok alüminyum içerecek tasarımlarda üretilmektedirler. ısıtma sistemi demiryolu vagonları ve buhar hatlarında, mukavemet ve yüksek sıcaklık özeliğinden dolayı 5554 ek kaynak metaliyle kaynak edilmiş 5454 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Sıfırlı sıcaklıklarda kullanılan depolama tankları, düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet için 5183 ek kaynak metali ile kaynak edilmiş 5083 alüminyum alaşımından üretilirler. Kamyon gövde ve panetleri 5052, 5086, 5083 ve 6061' den üretilirler ve genellikle 5356 ek kaynak metal alaşımı ile kaynak edilirler (Anderson 2000, Metals Handbook 1990).

2.4.5. Savunma ve havacılık endüstrisi

Bu endüstri dalları, bazı uygulamalar için, ısıl işlem yapılamayan, yüksek mukavemetli 5xxx serisini kullanmakta, ancak ayrıca bazı özel tür, üstün mekanik özellikler veren, ısıl işlem yapılabilen alüminyum alaşımlarını da tercih etmektedirler. Darbe mukavemeti ve mukavemet/ağırlık oranı için; alüminyum zırh kaplama yapılmaktadır. 5083 ve 7039 alaşım esas malzemeleri 5356 ek kaynak metaliyle; 2519 esas metali ise 2319 ek kaynak metaliyle kaynak edilmektedir. Mermiler; 4145 ek kaynak metali ile kaynak edilmiş 2019'dan ve 2319 ek kaynak metali ile kaynak edilmiş 2219 alaşımlarından üretilmektedir. Geniş bir sıcaklık spektrumunda iyi mukavemet özellikleri veren alüminyum alaşımları havacılıkta kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar, 2219, 2014, 2090, 2024 ve 7075'i içermektedir. Bu esas malzemeler, özel olarak yüksek performans uygulamalarında kullanılmaktadır; zira kendilerine has kaynak özellikleri ve birleştirme sırasında özel dikkat gerektiren sorunları bulunmaktadır (Anderson 2000).

3. ALÜMİNYUM ve ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ

3.1. Giriş

Endüstri devriminin başlarında metal kullanım alanlarının genişlemesi, kaynaklı yapılarda ortaya çıkan ani kırılma olayları dolayısı ile ortaya çıkan kazaların da artmasına yol açmıştır. Özellikle, bu yıllarda demiryolları kazaları sonucundaki can ve mal kayıpları oldukça yüksek rakamlara erişmiştir. Bu kazaların birçoğu tasarım hataları sonucunda ortaya çıkmış ise de, deneyimler ve gözlemler bu kazalardan bir bölümüne, malzemede var olan mikro ölçüdeki çatlakların zamanla büyüyerek kırılmaya yol açmasının neden olduğunu ortaya çıkarmıştır. Malzeme kalitesinin iyileştirilmesi ve özelliklerinin daha uygun ve hassas bir şekilde saptanması, tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve çatlak varlığı olasılığının azaltılması bu ani kırılmalar sonucu ortaya çıkan kazaların kabul edilebilir bir düzeye inmesini sağlamıştır. Tasarımda en önemli mühendislik kriteri, daha doğrusu mühendisliğin amacı, ürünlerin gerek üretim gerekse kullanım sırasında sağlam, emniyetli ve ekonomik bir biçimde görevlerini yerine getirme koşuludur (Anık ve diğ. 1991, Tülbentçi 1998, Kaluç 2000).

Bir parçanın veya yapının görevini yerine getiremeyecek derecede tahrip olması sonucunda saptanan hasar türleri şunlardır:

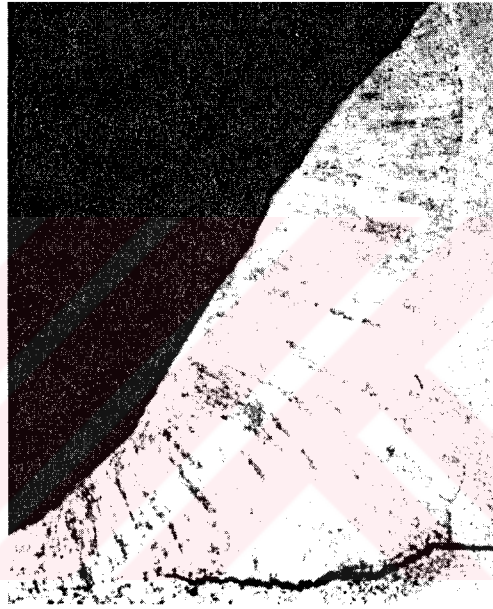
- Genel akma, yapının veya bir elemanın zorlanma sonucunda plastik deformasyona uğraması,
- Yapının veya bir elemanın elastik veya plastik bir biçimde burkulması veya aşırı elastik şekil değiştirmesi,
- Kırılma ile yapının bir parçasının kısmen veya tamamen bütününden ayrılması,

Akma veya plastik şekil değişimi, genel olarak malzeme elastiklik sınırını aşan gerilme ile zorlanınca ortaya çıkan bir olaydır. Akma sonucunda, parçanın boyutları değişmiş ve ölçü toleransları aşılmış olduğundan, parça iş göremez duruma gelir. Sünek malzemelerden yapılmış makina parçalarında akma genellikle kopma ile sonuçlanmaz, çünkü malzeme akma sırasında sertleşir ve mukavemeti artar, akmanın devam edebilmesi ve kopmanın oluşabilmesi için sürekli olarak yükün artırılması gereklidir. Makina parçaları durumunda ise, genellikle daha bu seviyeye gelmeden parça boyut toleranslarını aşacağından iş göremez duruma gelir. Akma sınırının altında sabit gerilme ile sürekli olarak zorlanan parçalarda da zamana bağlı olarak sürünme veya sünme (creep) adı verilen bir plastik şekil değişimi oluşur. Endüstride kullanılan metelsel malzemelerde, normal çalışma sıcaklıklarında sürünme sonucu oluşan şekil değişimi önemli bir seviyede değildir, uygulamada ölçülebilecek bir büyüklüğe erişmesi için ürünün ömrünün birkaç katı zamana gerek vardır; ancak yüksek sıcaklıklarda bu olay kendini şiddetle hissettirir.

Burkulma bir kararsız denge olayıdır, narin bir kolon veya çubuk biçimindeki bir elemanın aksenal yüklenmesinde, yükün Euler kritik değerini aşması sonucunda ortaya çıkar. Kırılma ise, katı durumdaki bir malzemenin, etkiyen gerilmeler altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya daha kaba bir deyimle parçalanmasıdır. Kırılma gevrek ve sünek olmak üzere iki türde gerçekleşir (Tülbentçi 1998).

Sünek kırılma, parçanın kırılmadan önce veya çatlakların ilerlemesi sırasında göstermiş olduğu deformasyon ve çatlak ilerleme hızının yavaş olması ile karakterize edilir. Özellikle, kırık yüzeyine yakın bölgelerde fazla miktarda şekil değişimi görülür. Metallerde gevrek kırılma, çatlakların büyük bir hızla büyümesi ile karakterize edilir; burada büyük bir kalıcı şekil değişimi görülmez, sadece kırık yüzeylerinde mikro ölçüde bir şekil değişimine rastlanır. Metelsel malzemelerin gevrek kırılmaya olan eğilimi; azalan sıcaklık, şekil değişimi derecesinin artması, çatlak ve çentik diplerinde üç eksenli gerilme durumunun oluşması, yaşlanma veya ısıl işlem sertleşmesi ile artar. Yapılarda, gevrek kırılma ne pahasına olursa olsun önlenmesi gereken bir olaydır, zira hiçbir uyarıda bulunmadan aniden gelir ve tamiri olanaksız olaylara yol açar (Tülbentçi 1998, Anık ve diğ. 1991).

Kaynaklı ve zaman içinde tamiri olanaksız hasarlara uğrayan bu yapılar oldukça rijit ve çok az plastik şekil değiştirme kabiliyetine sahip olduklarından; zorlamaların oluşturduğu gerilmelerin var olan mikroçatlaklar veya kaynak hatalarından doğan çatlakların genişlemesine neden olduğu ve kaynak dikişi boyunca özellikle ısıdan etkilenmiş Bölge'de (IEB), bu çatlakların büyük bir hızla ilerleyerek yapıyı oluşturan kaynaklı elemanın iki parçaya ayırdığı anlaşılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, keskin çentik ve çatlakların ucunda oluşan üç eksenli gerilme halinin düşük sıcaklıklarda gerilmeyi teşvik ettiği görülmüştür (Tülbentçi 1998).



Şekil 3.1.- Kaynak dikişinin ısıdan etkilenen bölgesinde oluşan soğuk çatlak (Hidrojen nüfuziyet çatlağı).

Kaynaklı yapılarda karşılaşılan kırılma olaylarında; kırılmanın, kaynak bölgesinde sürekli olarak ısıdan etkilenmiş bölgede var olan bir hatadan veya oluşmuş bir çatlaktan başlayarak geliştiği görülmektedir. Kaynaklı yapılarda bu tür kırılmalara neden vermemek için, kaynak sırasında, ısıdan etkilenmiş bölgede oluşan olayların iyi bilinmesi, ortaya çıkan yapının mekanik özelliklerinin hassas bir şekilde saptanması ve bunların bir tasarım kriteri olarak gözönüne alınması gereklidir. Bu konuya daha uygun bir çözüm ise, ısıdan etkilenen bölgenin özellikleri, bu tür olaylara neden olmayacak türde malzemelerin geliştirilmesi yolunda verilecek uğraşlardan geçmektedir (Tülbentçi 1998, Kaluç 2000).

3.2. Kaynak Kabiliyeti

Üretim yöntemi olarak kaynak uygulanarak inşa edilmiş bir yapının, üretilmiş bir makina parçasının veya tamir edilmiş hasarlı bir parçanın kullanma emniyeti ve kalitesi sadece kullanılan ek kaynak metalinin cinsine ve diğer bir deyimle seçimine bağlı değildir. Bir kaynak bağlantısının özeliğine etkiyen faktörlerin en önemlisi kaynak işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklığın yerel dağılımı ve değişimi karşısında esas metalin davranışdır.

Tüm ergitme kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemi andırır. Kaynak metali, elektrik arkı veya gaz alevinin yüksek sıcaklığı karşısında ergir ve daha önceden hazırlanmış olan kaynak ağzı içine dökülür, bu arada kaynak ağzının kenar yüzeyleri de bir miktar ergir ve dolayısı ile ergimiş ek kaynak metali ve esas metal karışarak kaynak ağzı içinde katılaştır. Bu oluşum sırasında, kaynak edilen malzemelerin kaynak dikişine komşu bölgelerinde, metalin ergime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar, değişik sıcaklık derecelerinde ısınmış bölgeler ortaya çıkar. Böylece malzemeye; sıcaklık derecesi kaynak işlemince belirlenmiş, bir ısı çevrim uygulanmış olur. Olay, özellikle çelik malzemeler için çok önemlidir. Bu ısı çevrimlerin tepe sıcaklıklarına ve soğuma hızlarına göz atarsak, bunlar içinde çeliğin normalizasyon, temperleme, su verme ve yeniden kristalleşme tavlamalarına karşılık gelenlerin bulunduğunu görürüz. Bu tür ısı işlemler sonucunda çeliğin iç yapısının ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerinin de ne ölçüde değiştiği her mühendis tarafından çok iyi bilinen bir konudur. Bu olaydan ötürü, kaynak bölgesinde, çeşitli ısı işlemler görmüş ve dolayısı ile mekanik özellikleri ve iç yapısı gerek esas metal ve gerekse kaynak metalinden farklı değişik bölgeler ortaya çıkar. Farklı özelliklerdeki bu bölgelerde, tüm yapının zorlanması halinde, gerilme ve şekil değişiminde olduğu gibi korozyona dirençte de esas metalden farklı davranışlar görülür.

Sıcaklığın reaksiyonlar üzerine olan etkisi bilinen bir gerçektir; genel olarak tüm reaksiyonların oluşum ve gelişim hızı ile metallerin birbiri içinde çözülme kabiliyeti yükselen sıcaklıkla artar; örneğin, çökeltme sonucu elde edilmiş olan bir takım özellikler yüksek sıcaklıklarda kaybolur. Bu durum özellikle çökeltme sertleştirilmesi

ile sertleştirilmiş alüminyum ve alaşımlarının kaynağında karşılaşılan metalurjik bir olaydır. Genel olarak kaynak işlemi, gerektirdiği yüksek sıcaklık derecesinden dolayı metalin iç yapısına ve bazı hallerde de kimyasal bileşimine etki etmekte ve sonuçta malzemenin özellikleri değişmektedir (Tülbentçi 1998, Tülbentçi 1987).

Kaynak edilen bir malzemede oluşan kaynak bölgesini; ergime bölgesi ve ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) olmak üzere iki bölümde inceleyebiliriz.

3. 2. 1. Ergime Bölgesi

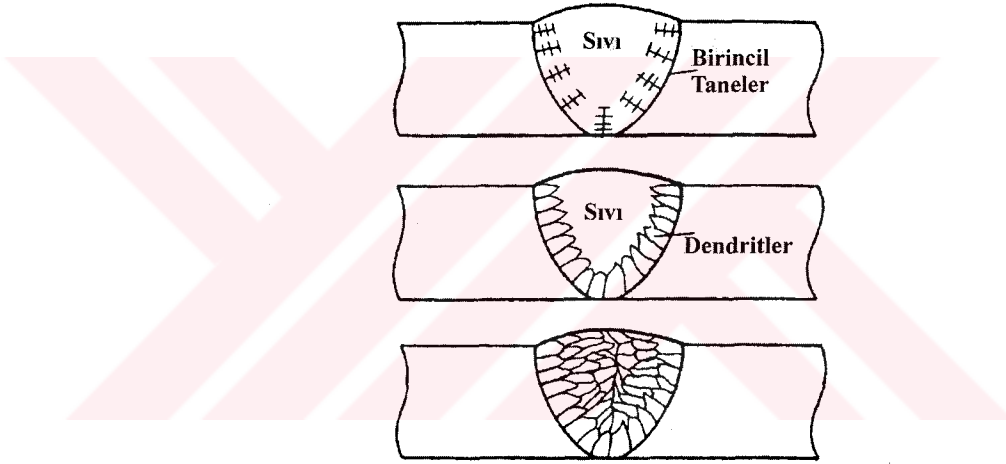
Bir kaynak dikişinin kesiti, metalografik olarak incelendiğinde ergimiş olan bölgeyi sınırlayan ergime çizgisi oldukça belirgin bir şekilde görülür. Metalin solidüsünden daha yüksek bir sıcaklık derecesine kadar ısınmış olan ergime bölgesi kimyasal bileşim olarak esas metal ve ek kaynak metali karışımından oluşur. Karışım oranı her pasoda farklı olduğundan, her pasonun kimyasal bileşimi de birbirinden farklıdır. Tek pasolu kaynak dikişlerinde, bu bölgede esas metal ve kaynak metali, kaynak banyosundaki şiddetli türbülansın etkisiyle iyice karışmıştır ve oldukça homojen bir bileşim gösterir. Buna karşın, çok pasolu kaynaklarda, her pasonun esas metalle karışma oranı farklıdır. Örneğin, kalın parçaların çok pasolu kaynak dikişlerinde, orta kısımlarda, esas metale rastlanmayabilir. Ergime bölgesinde esas metalin kaynak metaline oranı, uygulanan kaynak yöntemi ve paso sayısına bağlı olarak geniş bir aralıkta değişir.

Ergime bölgesinde, esas metal ve kaynak metali oranı tam olarak bilinse de hesap yolu ile ergime bölgesinin kimyasal bileşiminin belirlenmesine olanak yoktur; çünkü, bir çok alaşım elementi kaynak sırasında ark içinde yanarak kayba uğrar. Bu kayıpları azaltmak için kaynak bölgesi, kaynak süresince atmosferin etkisinden korunur.

İyi bir kaynak bağlantısı, kaynak bölgesinin atmosferin etkisinden korunması ile elde edilebilir; çünkü, oluşan kimyasal ve metalurjik reaksiyonlar ancak bu şekilde kontrol altına alınabilir. Oksijen ile olan reaksiyonları kontrol etmek için ergime bölgesine çeşitli yöntemler ile dezoksidasyon maddeleri (örtüye, toza, tele katılarak)

ile alaşım elementleri katılır. Ayrıca bu bölge, bir curuf örtüsü veya oluşturulan kontrollü bir atmosferle de korunabilir.

Sıvı durumdaki metal içinde atomlar birbirleri arasında hareket serbestliğine sahiptirler. Soğuma sırasında; sıcaklık, metal veya alaşımın katılaşma noktasına kadar düşünce, atomların kristal kafesleri oluşturmak üzere birleşmeleri ile çekirdek oluşur. Bu sırada, metalden ısı çekilir ve soğumaya devam edilirse, çekirdekler taneleri oluşturmak üzere yeni atomların ve kristal kafeslerin eklenmesi ile büyümeye devam eder. Katılaşma sırasında ortaya çıkan ergime ısı, doğal soğuma hızını etkileyerek tanelerin daha fazla büyümesini önler (Tülbentçi 1998, Anık ve diğ. 1991, Anık 1975).



Şekil 3.2. Kaynak metalinin katılaşma evreleri.

Tanelerin büyüebilmesi için ısının sürekli olarak metalden çekilmesi gereklidir. Kaynak halinde ısının büyük bir kısmı ergime bölgesinden kondüksiyonla esas metale iletilir, dolayısı ile soğuma yönüne paralel, oldukça iri silindirik taneler oluşur.

Özellikle kalın parçaların, tek paso ile yapılmış kaynak dikişlerinde, bu iri silindirik tanelerin birleştiği orta kısımlarda katışkılar (gayri safiyetler) ve kalıntıların segregasyonuna rastlanır; bu olay, bu tür dikişlerin zayıflamasına ve kaynaktan hemen sonra dikiş eksenini boyunca oluşan sıcak çatlaklara neden olur (Tülbentçi 1998, Anık ve diğ. 1991, Anık 1975).

3. 2. 2. Isıdan Etkilenmiş Bölge

Metalsel malzemeler bir kaynak işlemi gördükleri zaman, kaynak dikişine bitişik olan bölge, kaynağa uygulanmış olan sıcaklık derecesinin, daha doğrusu ısı çevrimin etkisi altında kalır. Özellikle, yüksek mukavemetli yapı çeliklerinde bu ısı çevrim, çeliğin eldesi sırasında görmüş olduğu ısı çevrimlerden farklı olduğundan, ortaya çıkan içyapısı, buna bağlı olarak ta mekanik özellikleri farklı bir bölge ortaya çıkar.

Ergime çizgisinin esas metal tarafında, kaynak sırasında uygulanmış olan ısının oluşturduğu çeşitli çevrimlerden etkilenmiş ve dolayısı ile iç yapı değişimine uğramış bir bölge vardır; bu bölgeye ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) adı verilir. Isıdan etkilenmiş bölge, kaynak metali ile esas metalin birleştiği sınırdan başlayarak, kaynak işlemi sırasında sıcaklığın iç yapıyı, dolayısı ile esas metalin özelliklerini etkilediği bölgedir. Bu bölgedeki metalurjik değişimlerin anlaşılabilmesi özellikle çelikler halinde oldukça kolaydır. Çeliklerin kaynağında bu bölgede sıcaklık 1450°C-700°C arasında değişmektedir; burada erişilen maksimum sıcaklığa bağlı olarak çeşitli içyapılar ve farklı özellikler gösteren bölgeler görülür. Bu bölgede erişilen maksimum sıcaklık derecesi, kaynak dikişi eksenine olan uzaklığın ve sıcaklığın değişimi de zamanın fonksiyonu olarak bilinirse; kaynak işlemi sonunda oluşabilecek içyapı, esas metalin özellikleri ve bileşimi gözönünde tutularak bir dereceye kadar önceden tahmin edilebilir.

Kaynak sırasında ısıdan etkilenmiş bölge hızlı bir şekilde ısınmakta ve sonra parça kalınlığı, kaynağa uygulanan enerji (ısı) girdisi ve ön tav sıcaklığının fonksiyonu olarak yine hızlı bir biçimde soğumaktadır. Çeliğin bileşimine göre bu soğuma hızı, kritik soğuma hızını aştığında, genellikle 900°C'nin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısınmış bölgelerde sert, dolayısı ile kırılğan bir yapı oluşur. Bu bölge bağlantının en kritik bölgesidir ve birçok çatlama ve kırılma bu bölgede ortaya çıkarak yapının tahrip olması ile sonuçlanır. Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenmiş bölge, içyapıdaki tane büyüklüğü bakımından şu değişik bölgeleri gösterir:

- İri taneli bölge,
- İnce taneli bölge,

- Kısmen dönüşüme uğramış bölge,
- İçyapı değişikliğine uğramamış bölge.

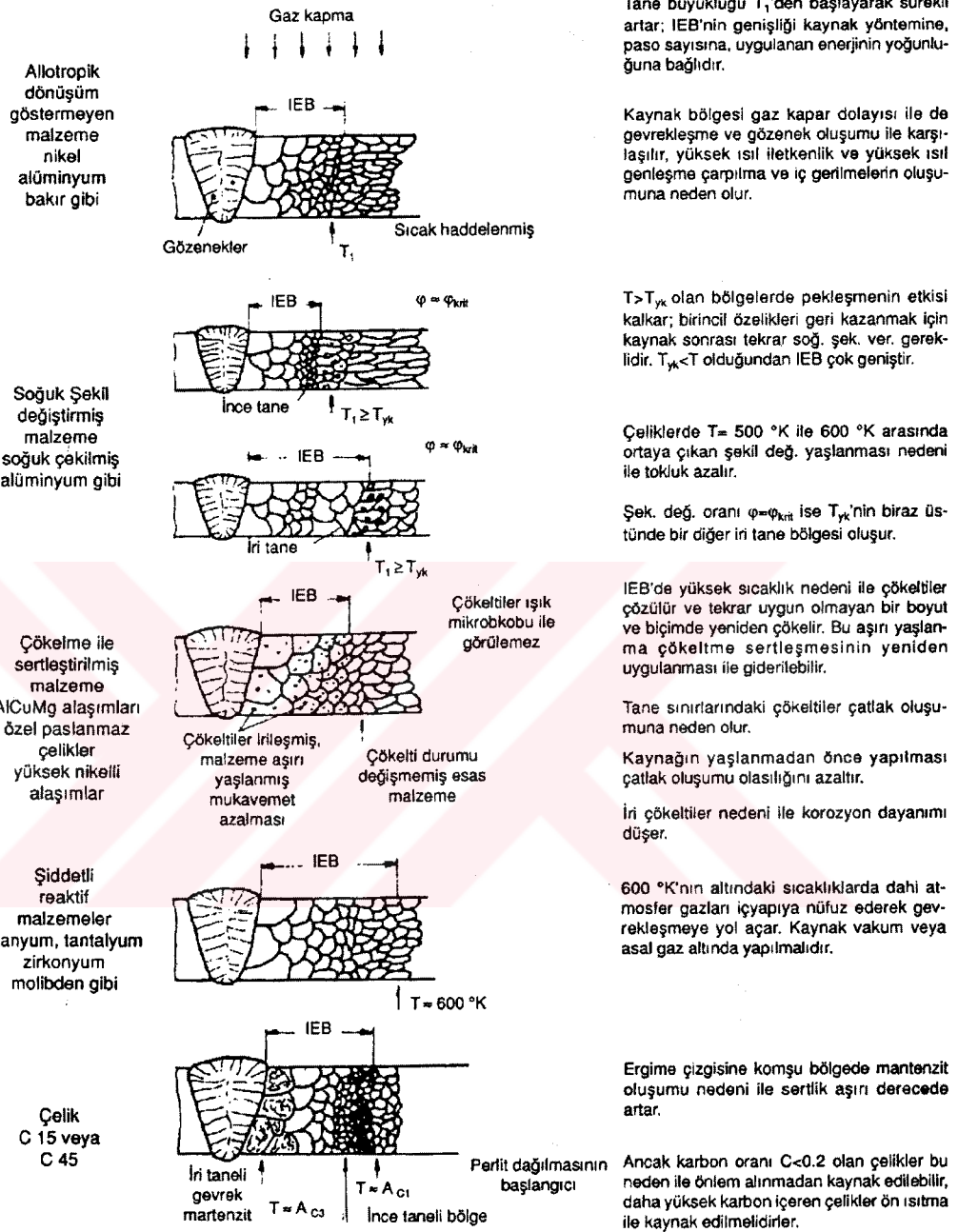
• İri taneli bölge: Ergime bölgesine bitişik olan ve kaynak sırasında 1450°C ile 1150°C arasındaki sıcaklıklarda kalmış bölgedir. Bilindiği gibi, metaller yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında tane büyümesi adı verilen bir olay oluşur. Bazı taneler büyüyerek kısmen veya tamamen küçük tanelerin yerine geçer ve dolayısı ile ortalama tane boyutu büyür. Tane büyümesi hızı sıcaklık arttıkça artar ve metalin solidüsüne yaklaştığında büyüme çok hızlanır. İri taneli yapılar, ince taneli yapılara oranla daha gevrek ve kırılgan olduklarından oluşmaları istenmez.

Çeliklerde kaynak sırasında ergime çizgisine bitişik olan esas metal, solidüse yakın bir sıcaklığa eriştiğinden ostenit içinde fazla miktarda tane büyümesine rastlanır. Bir çeliğin kaynak edilebilirliği açısından tane büyümesi çok önemlidir, çünkü soğuma olayı sürecinde oluşan dönüşümlere, ostenit tane büyüklüğünün etkisi oldukça şiddetlidir.

• İnce taneli bölge: Kaynak sırasında 900-1150°C arasında bir sıcaklığın etkisinde kalmış bu bölgede tane büyümesine rastlanmaz. Yeniden kristalleşmiş bölge olarak adlandırılan bu bölgede de ostenit oluştuğundan, soğuma sırasında soğuma hızına ve çeliğin bileşimine bağlı olarak aynen iri taneli bölgedeki yapıya benzer ince taneli bir içyapı görülür.

• Kısmen dönüşüme uğramış bölge: İnce taneli bölgenin devamı olan bu bölge, kaynak işlemi sırasında 911°C ve 723°C arası bir sıcaklığa kadar ısınmış olup, bölgesel bir ostenitizasyona uğramıştır. Ostenit, dönüşüme uğradığından yapısındaki ostenit miktarına bağlı olarak, ilk iki bölgeyi andıran bir içyapı ortaya çıkar.

• İçyapı değişikliğine uğramayan bölge: Bu bölge 723°C' nin altındaki bir sıcaklık derecesine kadar ısınmış olup, ısınma sürecinde çelikte bir dönüşüm oluşmamıştır. Bu bölgede bazen içyapılarda hafif bir temperleme etkisi görülebilir.



Şekil 3.3.- Çeşitli tür metal ve alaşımlarının kaynağında IEB'nde ortaya çıkabilecek iç yapılar.

Kaynak işleminde genellikle metal önce liküdüsünün üstünde bir sıcaklığa kadar hızla ısıtılmakta ve sonra soğutulmaktadır. Dolayısı ile, çeliklerin kaynağında kaynak bölgesinde, yukarıda belirtilmiş olan tüm bu dönüşümler sırasıyla oluşacaktır.

Isıtmayı takibeden soğuma yavaş bir şekilde gerçekleştiğinde veya çeliğin karbon ve alaşım elementi içeriği sertleşme oluşturacak miktarlarda değilse, elde edilen içyapı tane büyüklüğü hariç, ilkel yapının aynı olacaktır. Buna karşın, sertleşme eğilimi olan çeliklerde ise, soğumanın hızlı olduğu durumlarda daha önce anlatılmış olan ve genellikle arzu edilmeyen özellikleri taşıyan içyapılar oluşur ki; işte çeliklerin kaynağını etkileyen en önemli etken budur. Isıdan etkilenmiş bölge ergitme kaynağında devamlı olarak ortaya çıkar ve bundan kaçınılması olanaksızdır. Büyüklüğü ise; kaynak işlemine uygulanan enerji, soğuma hızı, parçanın şekli, boyutları ve sıcaklığı ile malzemenin ısı iletim katsayısının etkisi altındadır. Bu faktörlerden değiştirilmesi olanaklı olanlar yardımı ile ısıdan etkilenmiş bölge bir dereceye kadar kontrol altında tutulabilir.

Isıdan etkilenmiş bölgede sert ve kırılgan bir yapının ortaya çıkması, soğuk çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Kaynaktan sonra ortaya çıkan iç gerilmelerin, çalışma koşullarındaki zorlanmaların ve kaynak banyosundan yayılan hidrojenin etkilerinin birbiri üzerine çakışması ve sertleşen bölgenin plastik şekil değiştirme özelliğinin olmaması nedeni ile kılcal çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle, yüzeyden görülmeyen bu çatlaklar zamanla kritik büyüklüğe erişince hiç beklenmedik bir anda ve büyük bir hızla (çelik içerisindeki ses hızının yaklaşık 1/3' ü kadar) parçanın kaynak dikişine paralel olarak boydan boya kırılmasına neden olur. İkinci Dünya Savaşı sürerken ABD'de inşa edilmiş Liberty türü şileplerin ve T2 türü tankerlerin büyük bir bölümü bu gevrek kırılma olayının kurbanı olmuş ve gemiler aniden iki parçaya bölünerek batmıştır. Bu çatlaklar, genellikle ergime çizgisine çok yakın olduklarından (esas metal tarafında) bazen bir birleşme hatası gibi değerlendirilir ve kusur kaynakçıya veya kaynak metaline yüklenir. Ancak, bu olayda gerçek neden çeliğin sertleşmeye olan eğilimidir. Sertleşen çelikler ancak özel önlemler alınarak kaynak edilmelidirler.

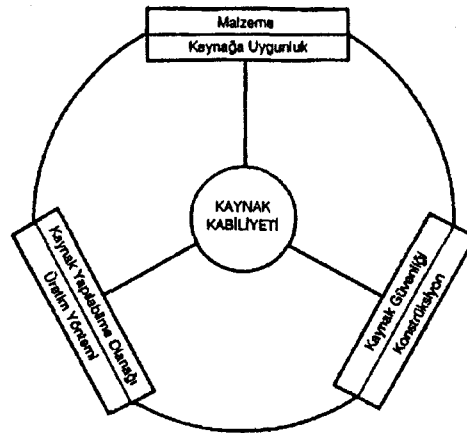
Bir metalsel malzeme, eğer ısıdan etkilenmiş bölgedeki özellikleri fazla miktarda tahribe uğramamış ise kaynağa uygun olarak kabul edilebilir. Bazı durumlarda, bu bölgenin özelliklerinin korunması bakımından, özel önlem ve yöntemlere gerek duyulabilir; işte bu gibi durumlarda malzemenin kaynak kabiliyeti özelliğinin incelenmesi gerekir.

Kaynak kabiliyeti, kesin ve kantitatif olarak tanımlanamayan ve de karmaşık bir anlamı olan özelliktir. Uluslararası Kaynak Enstitüsü'nün IX no'lu Komisyonu kaynak kabiliyetini şu şekilde açıklamaktadır:

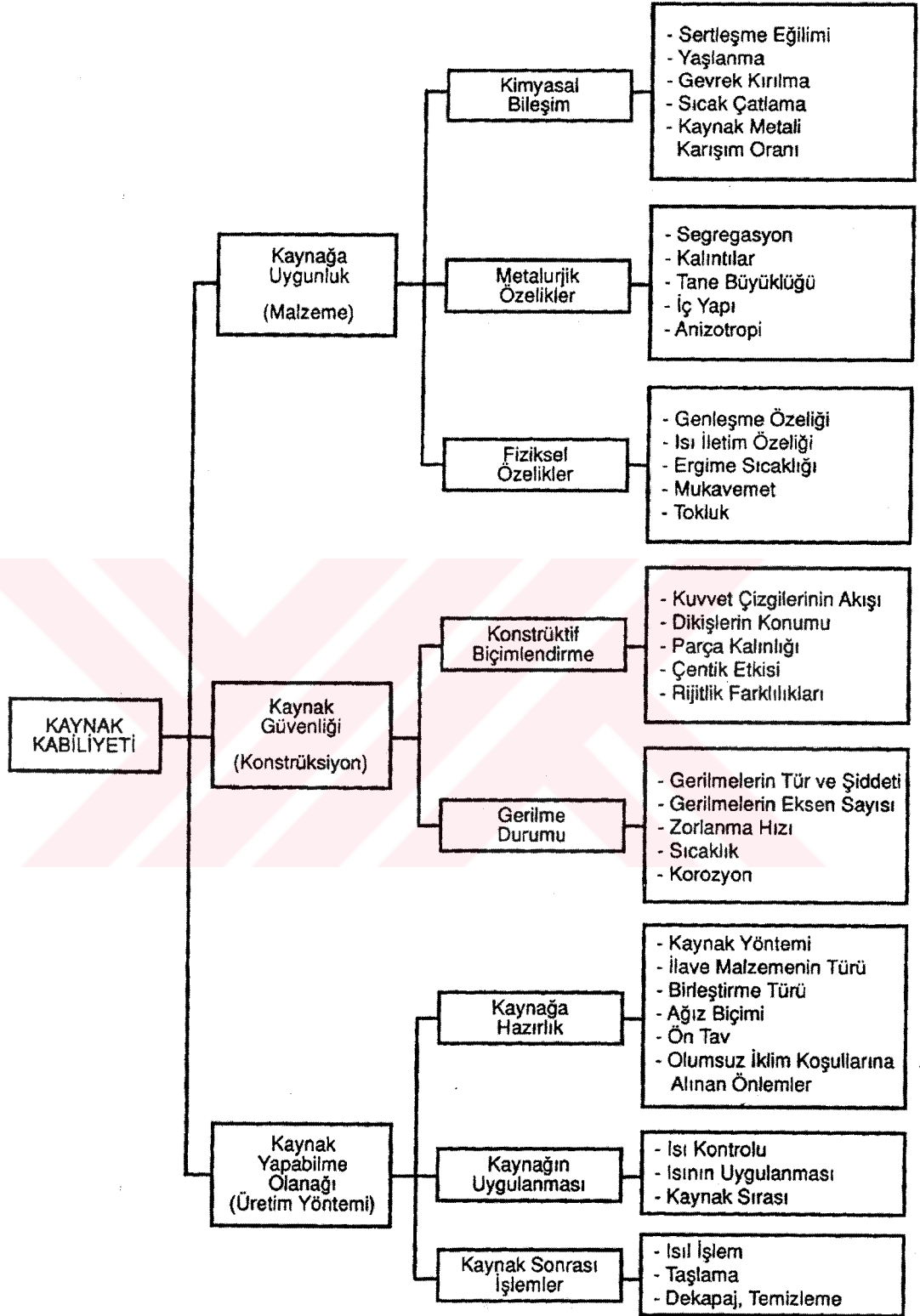
“Bir metalsel malzeme, verilen bir yöntem ile bir dereceye kadar kaynak edilebilir; uygun bir yöntem uygulanarak metalik bağlantı elde edildiği zaman, bağlantı yerel özellikleri ve bunların kontrüksiyona etkisi bakımından, belirlenmiş bulunan özellikleri sağlamalıdır.”

Açıklamadan da görüldüğü gibi, kaynak kabiliyeti yalnız malzemeye bağlı bir özellik değildir, aynı zamanda kaynak yöntemine ve konstrüksiyona da bağlıdır. Bir malzeme bir yöntem ile oldukça iyi bir kaynak kabiliyeti göstermesine karşın diğer bir yöntem ile zayıf bir kaynak kabiliyetine sahip olabilir. Örneğin, alüminyum ve paslanmaz çelikler oksii-asetilen yönteminde zayıf bir kaynak kabiliyeti göstermelerine karşın, ergitme esaslı kaynak yöntemleri olan gazaltı kaynağı (örneğin; MIG veya TIG) yöntemlerinde iyi bir kaynak kabiliyetine sahiptirler. Özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımları katı faz kaynak yöntemleri ile de daha kolay kaynak edilebilmektedirler.

Bir metalsel malzeme yüksek derecede kaynak kabiliyetine sahiptir denildiği zaman, özel önlemlere başvurulmadan, doyurucu bir kaynak kalitesinin elde edilebileceği anlamı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.4.- Kaynak kabiliyetinin malzeme, üretim yöntemi ve konstrüksiyona bağlılığının gösterilmesi.



Şekil 3.5.- Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler.

Kaynak kabiliyeti derecesini belirten özellikler, yukarıda belirtilmiş olduğu gibi malzemeye, konstrüksiyona ve kaynak yöntemine bağlı olarak değişir, iyi bir kaynak kabiliyeti derecesinde, kaynak bölgesinin mekanik ve kimyasal özellikleri olabildiği kadar esas metale yaklaşmış olmalıdır.

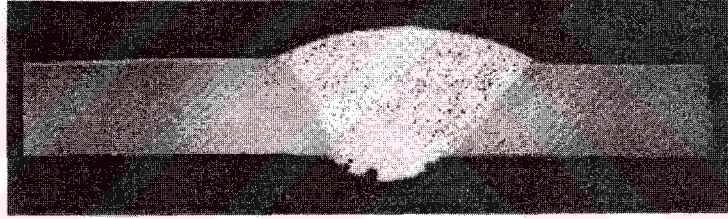
Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında, birçok problemle karşılaşılır. Bu problemler;

- Gaz gözenekleri,
- Oksit kalıntıları ve oksit tabakası,
- Sıcak çatlak veya sıcak yırtılma,
- Kaynak metali ve IEB'de mukavemet düşmesi,
- Ergime eksikliği,
- Korozyon direncinde azalma,
- Elektrik direncinde azalma.

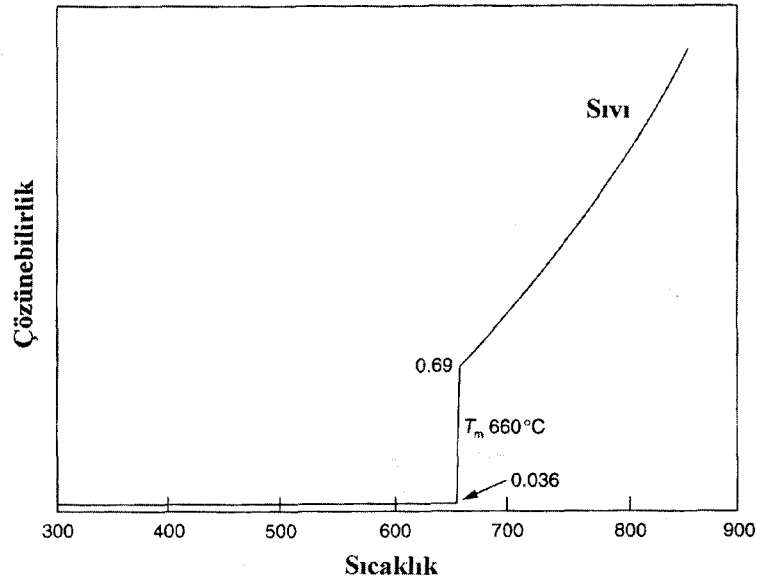
Özellikle, bu problemlerden ilk dördü olan; gözenek, oksit filmi, sıcak çatlama ve mukavemet azalması ve bunların önlenme yolları aşağıda anlatılmaktadır (Mathers, 2002).

Gözenek, kaynak metalinde çözünen gaz nedeniyle oluşur ve katılaşma sırasında kaynak metalinde hapsolarak kalan gaz boşlukları olarak oldukça önemli bir problemdir; çünkü kesitin azalmasına, mekanik değerlerinin düşmesine ve zorlanmalar sırasında çentik etkisi yaratarak kırılmasına neden olur. Gözenekler, mikrogözenek biçiminde oluşabildiği gibi 3- 4 mm çaplarında balık gözü olarak tabir edilen boyutlara da ulaşabilmektedir. Burada, ergimiş alüminyumda yüksek miktarda çözünebilirliğe ancak katı durumda çok düşük çözünebilirliğe sahip olan hidrojen etkilidir (Şekil 3.7). Çünkü, katılaşma o kadar hızlı olmaktadır ki hidrojen, katı çözelti içinde; gaz halinde hapsolarak kalmaktadır. Bu açıdan alüminyumun kaynağında, gözeneksiz kaynak dikişleri oluşturmak çok zordur. Kaynak teli kullanılmayan kaynak yöntemlerinde gözenek oluşma eğilimi oldukça düşüktür; ancak, ek kaynak metali kullanıldığında telden gelen kirlilikler dolayısı ile gözenek oluşma eğilimi artar. TIG kaynak yönteminde, MIG kaynak yöntemine göre, telin

hidrojen oluşturan kirliliğine bağlı olarak daha düşük gözeneklilik oluşur (Mathers, 2002). Kaynak akımının artırılması veya ilerleme hızının azaltılması, ark geriliminin yükseltilmesi gibi kaynak parametreleri ile oynanarak hidrojen nedenli gözeneklilik değiştirilebilir. Alaşım elementi içeriği de gözenek oluşmamasında yararlı bir etki sağlayabilir. Özellikle magnezyumun bu problemi azaltıcı etkisi olduğu varsayılmaktadır. Örtülü elektrod ve tozaltı kaynak yöntemlerinde örtü ve tozdan gelebilecek nem, gözenek oluşumu üzerinde başlıca etkiye sahiptir. Bu açıdan, kullanılmadan önce alüminyum ve alüminyum alaşımları için geliştirilmiş örtülü elektrod ve tozların kurutulmaları gerekir. Gazaltı kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gazın da oldukça saf olması ve gaz hortumlarının su emmez türde olması gözenekliliği önlemede etkilidir; çünkü son araştırmalar göstermiştir ki özellikle su soğutmalı torçlar kullanılması durumunda su hortumlarından koruyucu gaz hortumlarına su geçişi olabileceğini; bu açıdan torç bağlantı paketi içinde kullanılan gaz hortumlarının malzemelerinin su emme özellikleri düşük olan plastiklerden yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Mathers 2002).

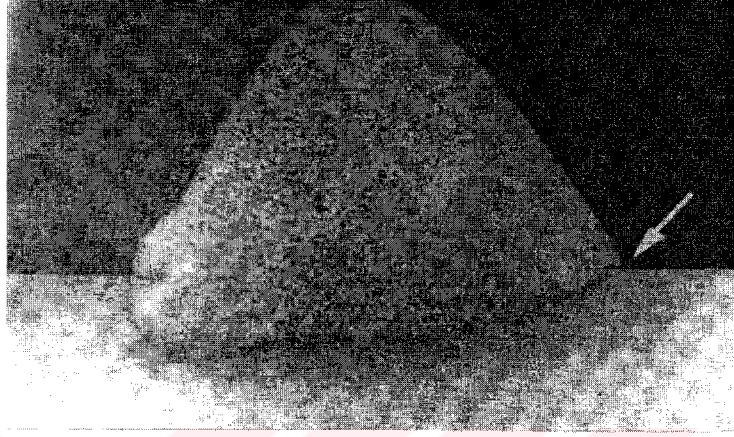


Şekil 3.6.- 6 mm kalınlığında TIG kaynaklı bir parçada, çok ince dağılmış gözenekler (Mathers 2002).



Şekil 3.7.- Alüminyumda hidrojenin çözünürlüğü (Mathers 2002).

Kaynaktan önce oksit filminin temizlenmesi gereksinimi, gözenek oluşum tehlikesini azaltmak içindir. Bu filmin, kaynak sırasında kırılarak dağıtılmasının bir gereksinimi de eksik ergime ve oksit film tutulmasından sakınmaktır. Şekil 3.8’de köşe kaynağında oksit tutulmasının bağlantının mukavemeti üzerindeki güçlü etkisi görülmektedir.



Şekil 3.8.- Köşe kaynağında alüminyum oksit filminin yarattığı olumsuz etki.

Aslında alüminyum oksit, alüminyum malzemenin yüzeyini kaplayan dirençli ve hızlı oluşan bir oksittir ve alüminyuma çok iyi korozyon direnci kazandırır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları, içerdikleri alaşım elementleri miktarlarına bağlı olarak farklı ergime sıcaklıkları gösterebilirler de genellikle saf metalin ergime sıcaklığı 660°C ’ dir. Buna karşın malzemenin yüzeyinde oluşan alüminyum oksitinin ergime sıcaklığı 2050°C ’ dir ve bu oksit tabakası kaynak sırasında ergimiş banyonun üzerinde yüzer. Alüminyum, kaynak edildiği zaman tav rengi vermediğinden, esas metalin ergime sıcaklığına gelip gelmediği, bu oksit filminin varlığından dolayı anlaşılabilir ve kaynakçı ısıtmaya devam ederken, esas metalin kendisi eriyerek akmaya başlar ve kaynak dikişinin oluşması güçleşir. Aynı zamanda ergimiş metal damlalarının kaynak ağzına nüfuz etmeden yapışarak kalması problemi ile karşılaşılır. Bu açıdan, kaynak öncesinde, oksit filminin çok iyi temizlenmesi ve temizleme ürünlerinin kaynak ağız bölgesinden uzaklaştırılması gereklidir. Bu problem kaynak makinası üreticileri tarafından bilindiğinden günümüzde, alüminyumun kaynağı için geliştirilmiş oksit kırma özellikli değişken kutuplamalı, alternatif akım yada doğru akım kaynak makinaları da üretilmektedir (Mathers 2002, Kaluç 2004, Tülbentçi 1998).

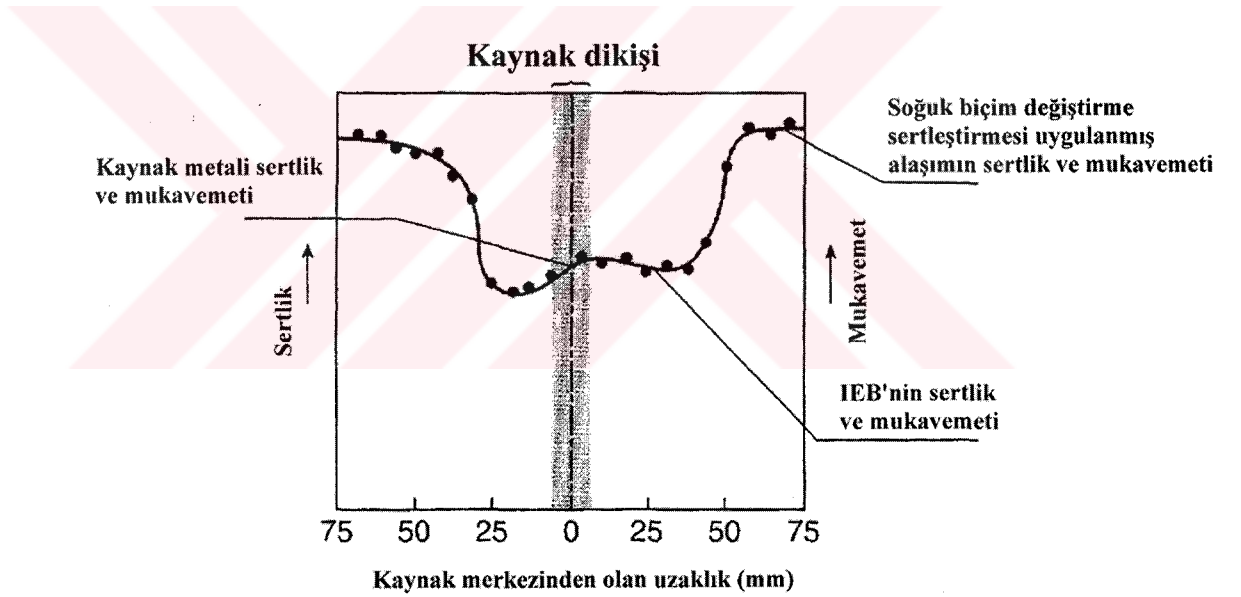
Sıcak çatlama problemi, saf metallerde görülmeyen ancak alaşımlarda görülen bir kaynak problemidir ve yalnızca alüminyum alaşımlarında değil aynı zamanda çelikler, nikel ve bakır alaşımlarında da ortaya çıkar. Kaynak metalinde katılma sırasında soğuk ağız cidarlarından başlayan ve metal orta eksenine doğru uzayan iğnemsiz tanelerin, alaşım içindeki katılma sıcaklığı daha yüksek olan katışkıları ortaya doğru sürmesi ve bu bölgede katışkıcı zengin segregasyon bölgeleri ortaya çıkararak; bu bölgelerin soğuma sırasındaki çatlama kaynak ısı girdisi nedeniyle oluşan gerilmelerden dolayı çatlama hassas hale getirmesi sonucunda sıcak çatlaklar oluşur. Alüminyum ve alüminyum alaşımları halinde özellikle ek kaynak metal bileşimi ile oynanarak ve de kaynak ağız aralıkları değiştirilerek bu sorunun önüne geçilmeye çalışılır (Mathers 2002).

Kaynağa bağlı mukavemet azalması, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak metallere ve IEB'lerinde ortaya çıkan bir durumdur. Bilindiği üzere ergitme kaynak yöntemlerinde, kaynak metal, esas metal ve ek kaynak metalinin karışımından oluşmuş bir döküm yapısındadır. Kaynak metalinin özellikleri, ek kaynak metalinin tane boyutu, kalitesi ve bileşimine bağlı olarak değişir. Hızlı soğuma, çok ince tane yapıları verirken yavaş soğuma, daha iyi mekanik özellikler kazandırır. Küçük boyutlu kaynak dikişleri, büyük boyutlu kaynak dikişlerinden daha iyi özelliklere ve daha yüksek sıcak çatlama direncine sahiptir.

Kaynak metal mukavemet özelliklerini düzeltebilmek için uygun kaynak metalinin seçimi ve katı çözelti mukavemetlendirmesi; yüksek kaynak metal mukavemeti sağlamada başlıca etkenlerdir. Bu açıdan, esas metalin mukavemetlendirme özellikleri ve uygun ek kaynak metal seçiminde titiz davranmak gerekmektedir. Örneğin; 6061 alüminyum alaşımında alternatif akım TIG kaynağı gerçekleştirilmesinde, 4043 alaşım tel kullanıldığında ve kaynaktan sonra kaynaklı parçalara yaşlandırma işlemi uygulandığında, maksimum çekme mukavemetlerinin 300 N/mm^2 olduğu; aynı alaşımın 4043 teli ile çok pasolu MIG kaynağında ise maksimum çekme mukavemetinin 230 N/mm^2 olduğu görülmüştür. 4043 teli yerine sadece % 0.2 Mg içeren 4643 teli kullanıldığında yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında MIG kaynaklı bağlantının da çekme mukavemetinin alternatif akım TIG kaynağı ile yapılmış olan ile aynı seviyeye çıktığı görülmüştür. Bu da alüminyum alaşımlarının

kaynağı sırasında doğru ek kaynak metali seçiminin çok önemli olduğunun en önemli örneğidir.

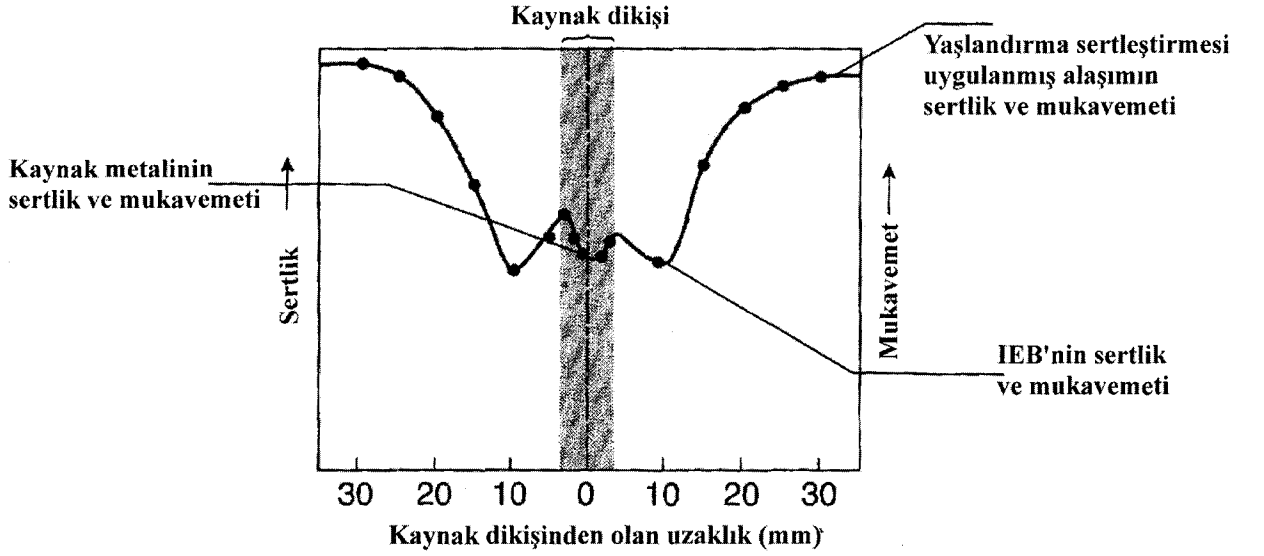
Alüminyum ve alüminyum alaşımları; daha önceden de belirtildiği gibi ya mekanik olarak (soğuk şekillendirme) yada çökeltme sertleştirilmesi (yaşlandırma) uygulanarak mukavemet özellikleri artırılan alaşımlardır. Bu özellikler, döküm durumunda veya tavlama durumunda ortadan kalkarak mukavemetin azalmasına neden olur. Soğuk şekillendirilmiş alaşımlarda IEB'deki yeniden kristalleşmeye bağlı olarak mukavemet azalması ile karşılaşılır. Yeniden kristalleşme sıcaklığı, IEB'de 200°C ile 300°C arasındadır. Ve bu nedenden dolayı tavlanan IEB yapısında da mukavemet azalır. Bu durum TIG kaynaklı 5xxx serisindeki bir alaşım için Şekil 3.9'da gösterilmiştir (Mathers 2002)



Şekil 3.9.- Soğuk biçimlendirilmiş alaşımda mukavemet üzerine kaynağın etkisi (Mathers 2002).

Benzer durum, ısıl işlem yapılabilir alaşımlarda da görülmektedir ve hatta soğuk şekillendirilerek sertleştirilmiş alaşımlardan daha karmaşık bir durumdadır.

Örneğin; 2xxx serisi alaşımlarda, çökeltelerin yeniden çözünmesi, mukavemet azalmasına; 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlarda çökeltelerin aşırı yaşlanması veya irileşmesi, mukavemet azalmasına neden olmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10.- Yaşlandırma ile sertleştirilmiş 6061- T6 alüminyum alaşımında kaynaklı durumda kaynak ısı girdisinin sertlik ve mukavemet üzerine etkisi (Mathers 2002).

Alaşım elementlerinin kaynak arkı içinde yanarak yani oksijen ile reaksiyona girerek azalması sonucunda kaynak metallere mukavemet azalması bilinen bir gerçektir. Bu durum, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında da geçerlidir.

Örneğin; lityumun oksijen ile reaksiyona girerek yanması ya da magnezyumun düşük kaynama sıcaklığı, magnezyum kaybına veya bazı alaşımlarda lityum kaybına neden olmakta ve böylece kaynak metallere mukavemetin azalması durumuyla karşılaşılmaktadır ve uygulamada koruyucu gazın dikkatlice seçilerek bu problemlerin minimuma indirilmesi olanağı vardır (Mathers 2002).

3.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliği

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı, az karbonlu çelikler ile karşılaştırıldığında bazı zorluklar göstermesine karşın, gerekli önlemler alınarak, uygun bir kaynak bağlantısı elde etmek olanağı vardır. Bu alaşımların kaynak kabiliyetini alüminyumun aşağıda belirtilen özellikleri sınırlamaktadır:

- Alüminyum ve alaşımlarının yüzeyi çok yüksek sıcaklıkta (2050°C) ergiyen refrakter karakterli bir oksit tabakası ile kaplıdır. Bu oksit tabakası çok sıkı bir şekilde yüzeyi sarar ve oksitlenmenin iç kısımlara doğru ilerlemesini önler.
- Kaynak sıcaklığında ergimeyen bu oksitin varlığı, kaynak dikişine elektrodun ergimesi ile geçer ve bağlantının sürekliliğini sağlayan damlacıkların bağ oluşturmaya engel olur; bunun yanısıra kaynak banyosu içinde kalıp katılaştıran oksit tabakası, bağlantının mukavemetini azaltır.
- Bu oksitin etkisini ortadan kaldırmak için alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında özel yöntemler veya bu oksit ile bileşikler oluşturup curufa geçiren özel dekapanlar kullanmak gereklidir.
- Şiddetli bir şekilde korozif olan bu kaynak dekapanlarının kalıntıları, kaynak işleminden sonra, korozyonu önlemek açısından dikkatli bir temizlemeyi gerektirmektedir, bu hem zor olmakta ve hem de maliyeti artırmaktadır.
- Bazı alüminyum alaşımlarında, kaynak sırasında uygulanan ısı çevrim, ana katı çözelti içinde bulunan alaşım elementlerinin, ergimiş bölge veya esas metalde çökmesine neden olur ve bu olayda bağlantının mekanik ve kimyasal özelliklerinin esas metalden farklı olmasına yol açar.
- Alüminyumun düşük sıcaklıkta ergimesi ve ergiyen metalin tav rengi göstermemesi kaynak işlemini güçleştirmektedir; kaynak bölgesinin kaynak sıcaklığına erişip erişmediği ancak çok deneyimli kaynakçılar tarafından farkına varılabilmektedir.
- Alüminyumun ısı iletkenliğinin yüksek olması, kaynak bölgesinde yerel sıcaklık yoğunlaştırmasını zorlaştırmakta ve birçok durumda ön tavi gerekli kılmaktadır.
- Alüminyumun ısı genleşme katsayısının yüksek olması, kaynak bölgesinde şiddetli şekil değişimlerine yol açmakta ve çarpılmaları artırmaktadır.

Yukarıda anlatılan bu konular alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak edilebilme olanaklarını sınırlamakta ve kaynak işlemini zorlaştırmakta ise de, gerekli önlemler alınarak ve uygun bir teknik uygulanarak, örneğin bir katı faz kaynak yöntemi kullanılarak oldukça sağlıklı kaynak bağlantıları elde edebilme olanağı vardır.



4. ALÜMİNYUM ve ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

4.1. Genel

Alüminyum alaşımları; hafiflik, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, kolay biçimlendirilebilirlik ve birçok kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirlikleri açısından mühendislik malzemesi olarak yaygın kullanım alanına sahiptirler. Daha önceden belirtildiği gibi, alüminyumun özgül ağırlığı; çeliğin yaklaşık olarak 1/3' i kadardır. Ayrıca alüminyum ve alüminyum alaşımları; havada, su içinde, yağlarla temasta ve birçok kimyasal maddeye karşı oldukça iyi korozyon direncine sahiptir; çünkü atmosfer ile temas sonucunda yüzeyde oluşan ince, ancak yoğun refrakter karakterli oksit tabakası korozif etkilere karşı direnç sağlar. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağının çelikten farklı olmasını sağlayan bir dizi özellik vardır. Bunlar; yüzeyde bulunan alüminyum oksit tabakası, yüksek ısı iletkenlik, yüksek ısı genleşme katsayısı, ergime sıcaklığına yaklaştıkça renk değişimi göstermemesi olarak sıralanabilir. Bu özellikler; alüminyumun kaynağı açısından dikkat edilmesi gereken ve kaynak kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının geliştirilmeye başlandığı yıllarda, bu alaşımların uçak endüstrisinde kullanılması ve kaynakla birleştirilmesi gereksinimi, günümüzde gazaltı kaynak yöntemleri olarak adlandırılan TIG ve MIG kaynak yöntemlerinin keşfini ve geliştirilmesini sağlamış; alüminyum alaşımlarının kesilebilmesi için plazma arkı ile kesmenin geliştirilmesi gerekmiş, uzaya giden roketlerin alüminyum parçalarının kaynağında, plazma ark kaynağının kullanımı gündeme gelmiş ve bu arayış diğer ileri kaynak yöntemlerinin de alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanımını teşvik etmiştir. Aslında alüminyum ve alüminyum alaşımları, ergitme kaynak yöntemlerinden olan gaz ergitme kaynağı (oksi-asetilen) ve örtülü elektrod ile ark kaynağı yöntemleri kullanıldığında sınırlı olarak kaynak edilebilirken, gazaltı kaynak yöntemlerinin ortaya çıkması daha kaliteli bağlantıların oluşturulmasına yol açmıştır. Gazaltı kaynak yöntemleri daha da geliştirilerek yüksek

akımlı MIG, plazma MIG, ince tel MIG, darbeli MIG, doğru akım helyum TIG, çift gaz koruyuculu TIG, değişken kutuplamalı plazma ark kaynağı gibi yeni teknikler uygulamaya alınmıştır (Tülbentçi ve Kaluç 1995, Carey 2002, Ellis ve Spiller 1993, Anderson 2001, Blewett 1992, Lahti ve Jernström 1999).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına, basınç esaslı kaynak yöntemleri de (katı faz kaynak yöntemleri) uygulanmaya başlamıştır. Özellikle 1991 yılında, İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde bulunan sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi (FSW) o yıllara kadar MIG, TIG ya da plazma ark kaynağı uygulanan alüminyum ve alüminyum alaşımı levhaların alın birleştirmelerinin oluşturulmasında yeni bir kavramın ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu açıdan yöntem, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanıldığı birçok endüstri kolunda hızla uygulamaya girmiş, yöntem üzerine gerek endüstriyel gerek akademik çalışmalar yaygınlaşmış ve yöntem günümüzde oldukça popüler bir konuma gelmiştir (Mathers 2002, Thomas ve diğ. 1999). Tablo 4.1'de alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan kaynak yöntemleri sırasıyla özetlenmiştir.

Tablo 4.1.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak yöntemleri (Mathers 2002).

Yöntem	Uygulama
Ergitme Kaynağı	
TIG Kaynağı	Yüksek kaliteli; tüm pozisyonlarda kullanılan ergimeyen elektrod ile yapılan kaynak yöntemidir; kaynak metalini oluşturmak amacı ile tel kullanılabilir ya da kullanılmayabilir; el ile, mekanize ya da otomatik olarak uygulanabilir; düşük dolgu oranı vermesine karşın kızgın tel kullanımı ile TIG kaynağında dolgu oranı artırılabilir; yöntem doğru ya da ters kutuplama ile gerçekleştirilir.
MIG Kaynağı	Yüksek kaliteli, tüm pozisyonlarda kullanılan ergiyen elektrodla kaynak yöntemidir; el ile, mekanize veya otomatik olarak uygulanabilir; yüksek dolgu oranı verir; iki tel (twin wire) uygulanarak dolgu oranı yükseltilebilir; yöntem doğru ya da ters kutuplama ile gerçekleştirilir.
Örtülü Elektrod İle Ark Kaynağı	Sınırlı oranda uygulanır; gerilmesiz ya da hafif gerilmeli bağlantılar oluşur; alüminyum ve alaşımlarının kaynağı için ekonomik değerini yitirmiş bir yöntemdir.
Gaz Ergitme (Oksi-asetilen) Kaynağı	Düşük kalitede kaynak metali verir; gerilmesiz bağlantılar oluşur; yöntem, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak uygulamalarında ekonomik değerini oldukça yitirmiş ancak tamir amaçlı kullanılabilen bir yöntem konumuna gelmiştir.

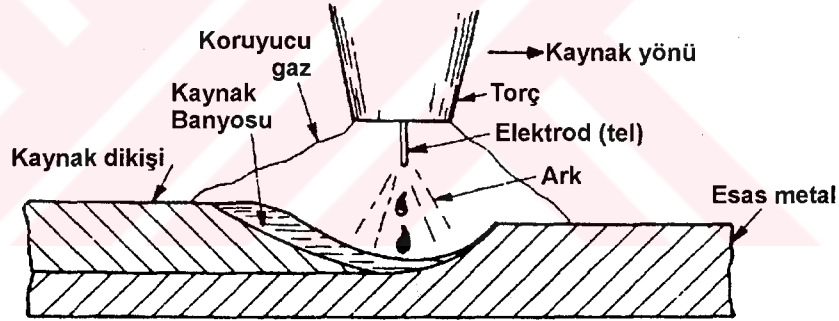
Elektron Işın Kaynağı	Yüksek kaliteli; hızlı ve hassas bir kaynak yöntemidir. Uzay, havacılık ve elektronik ekipman elemanlarının üretiminde kullanılır. Yüksek yatırım maliyeti ve vakum kamarası gereksinimi bulunmaktadır.
Laser Işın Kaynağı	Yüksek kaliteli; hızlı ve hassas kaynak yöntemidir. Uzay, havacılık ve elektronik ekipman elemanlarının üretiminde kullanılır; yüksek yatırım maliyeti gerektirir; ancak vakum kamarası gerektirmez.
Elektrogaz, Elektrocuruf, Tozaltı Kaynağı	Sınırlı uygulaması vardır; otobüslerin kaportayı destekleyen kaburga kesitlerinin kaynağı, gözenek problemi; alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanması açısından ekonomik değerini oldukça yitirmiş yöntemlerdir.
Ergitme- Basınç Kaynağı	
Manyetik Alanla Ark Alın Kaynağı	Boruların alın birleştirilmesinde kullanılır; yakma alın kaynağından daha az yatırım maliyeti; tam otomatik uygulama yapılabilir.
Elektrik Direnç Kaynağı	
Nokta, Kabartı ve Dikiş Kaynağı	İnce sac işlerinde bindirme bağlantılarında; otomotiv, uzay ve havacılık, mutfak eşyaları yapım endüstrilerinde kullanılır; yüksek yatırım maliyeti gerektirir; yüksek verim sağlar.
Kombine Bağlantı (Nokta Kaynağı+Yapıştırma)	Bindirme bağlantılarında nokta kaynağı ve yapıştırmanın birlikte kullanımı; Otomotiv endüstrisinde kullanılır; çok iyi yorulma mukavemeti verir.
Yüksek Frekans Endüksiyon Kaynağı	Alın birleştirmeleri; sactan dikişli boru kaynağı; yüksek yatırım maliyeti ve yüksek üretim hızına sahiptir.
Yakma Alın Kaynağı	Sac, çubuk ve içi boş kesitli parçaların alın birleştirilmeleri; örneğin, Al-Cu gibi farklı metallerin kaynağı; yüksek yatırım maliyeti; yüksek üretim oranları.
Saplama Kaynağı	
Kondenser, Kapasitör Deşarjı İle Saplama Kaynağı	En çok saplama yarıçapı 6 mm , örneğin, izolasyon pimleri, tava tutucuları, otomobil kaporta pimleri, elektrik temas elemanları.
Ark İle Saplama Kaynağı	Saplama çapları 5 ile 12 mm arasında değişir.
Katı Faz Kaynağı	
Sürtünme Kaynağı	Dairesel, kare ya da dikdörtgen kesitli çubukların ve içi boş elemanların alın birleştirmeleri; levha ve haddelenmiş kesitlerin alın altına birleştirme kaynağı (Sürtünen Eleman İle Birleştirme Kaynağı); farklı metallerin kaynağı; yüksek fiyatlı ekipman gereklidir.
Patlamalı Kaynak	Ulusal ve uluslararası boru hatlarında kullanılan boruların sahada kaynağı; farklı metallerin kaynağı; yüzey kaplama (zırhlama).
Ultrasonik Kaynak	Folyo, ince ve kalın kesitli sacların bindirme birleştirmeleri; elektrik iletim hatlarındaki Al-Cu birleştirmeler.
Soğuk Basınç Kaynağı	Bindirme ve alın birleştirmeleri; örneğin, Al- Cu, Al- Çelik, Al sac ve teller.
Sıcak Basınç Kaynağı	Bindirme bağlantıları, eğik kenar hazırlıklı alın birleştirmeleri.

Bu çalışmada, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında en yaygın kullanımı olan ve tezin konusunu oluşturan MIG, TIG ve Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak (FSW) yöntemleri detaylı olarak ele alınmış, diğer yöntemler üzerinde durulmamıştır.

4.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının MIG Kaynağı

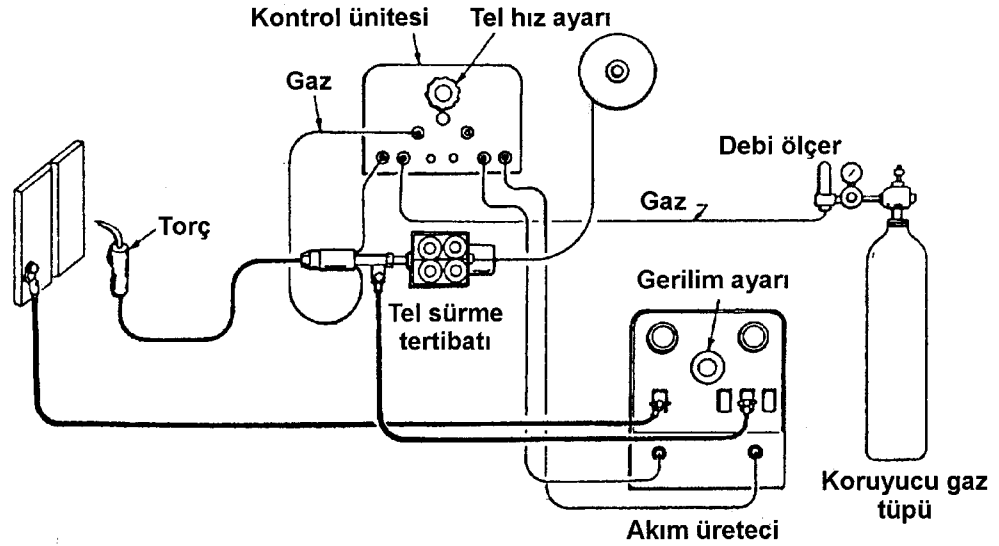
4.2.1. Yöntemin tanıtımı

Yapılan araştırmalar sonucu geliştirilmiş ve ilk kez 1948 yılında ABD’de alüminyum ve alaşımlarının, sonra da sırası ile yüksek alaşımlı çeliklerin, bakır ve alaşımlarının, karbonlu çeliklerin kaynağında uygulanmış olan MIG (Metal Inert Gas) kaynak yönteminde ark, helyum ve argon gibi soy bir gazın koruması altında yanar (Anık ve diğ. 1993, Tülbentçi 1998, Kaluç 2004).



Şekil 4.1.-MIG kaynak yönteminde ark bölgesi.

Ergiyen elektrod ile gazaltı kaynağı çok geniş bir uygulama alanına sahiptir, çok ince saclar hariç, her kalınlıktaki demir esaslı ve demir dışı metal ve alaşımların kaynağında uygulanabilmektedir. Yatay karakteristikli, diğer bir deyim ile sabit gerilimli kaynak makinalarının gelişmesi sonucu ince çaplı kaynak teli ile yüksek akım şiddeti uygulama olanağı, ısıdan etkilenmiş bölgesi (IEB) daha dar ve daha derin nüfuziyetli kaynak bağlantılarının eldesine olanak sağlamaktadır (Tülbentçi 1998, Kaluç 2004).



Şekil 4.2.-MIG kaynağı donanım blok şeması.

Bu yöntemin uygulanması çok basittir, operatör hiçbir zorlukla karşılaşmaz; toprak kablosunu iş parçasına bağlayıp, torcun ucundaki tel elektrodu kaynak ağzına değdirmek yeterlidir, torç önceden belirlenmiş bir debide koruyucu gazı ve ergiyen elektrod miktarını karşılamak üzere, sabit hızda tel elektrodu bölgeye göndermekte, sistem uygun ark boyunu, kendisi otomatik olarak ayarlamakta ve sabit tutmaktadır.

Uygulama kolaylığı nedeni ile tüm demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağında çok popüler ve aranan bir yöntem haline gelen MIG yönteminin başlangıçta yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde uygulama alanı bulamamasının nedeni soygazın pahalılığı olmuştur (Cary 2002, Minnick 1996, Mathers 2002, Kaluç 2004).

CO₂ gibi aktif bir koruyucu gaz altında yapılan kaynak yöntemine Metal Active Gas kelimelerinin baş harflerinden yararlanılarak MAG yöntemi adı verilmiştir.

MIG/ MAG kaynak yönteminin en önemli üstünlüğü; kaynak bölgesine sürekli olarak koruyucu bir gazın ve tel elektrodun beslenmesi ile kaynağın dolgu oranının yüksek olmasıdır. Ayrıca, tel haline getirilebilen metal ve alaşımları herhangi bir örtü içermediğinden (özlü teller hariç) kaynakta bir curuf temizliğine gerek duyulmamaktadır. Dolayısıyla, örtülü elektrod kullanımında olduğu gibi kaynakta durma, curuf temizleme ve koçan kaybı yoktur. Yöntem, kolaylıkla mekanize

edilebildiği gibi robot uygulamalarına da yatkındır (Minnick 1996, Mathers 2002, Metals Handbook 1983, Cary 2002, Tülbentçi 1998, Kaluç 2004, Anık ve diğ. 1994).

Her kaynak yönteminde olduğu gibi bu kaynak yöntemini de uygulayabilmek için özel bir kaynak donanımına gereksinim vardır. MIG kaynak donanımı, örtülü elektrod ile yapılan ark kaynak donanımı ile karşılaştırıldığında bir parça daha karmaşık görünmesine karşın aslında sistem olarak bir tozaltı kaynak donanımından daha basittir. Bir MIG kaynak donanımı aşağıda sıralanan kısımlardan oluşur: (Minnick 1996, Mathers 2002, Tülbentçi 1998, Kaluç 2004, Welding Handbook 2004, Welding Handbook 1991).

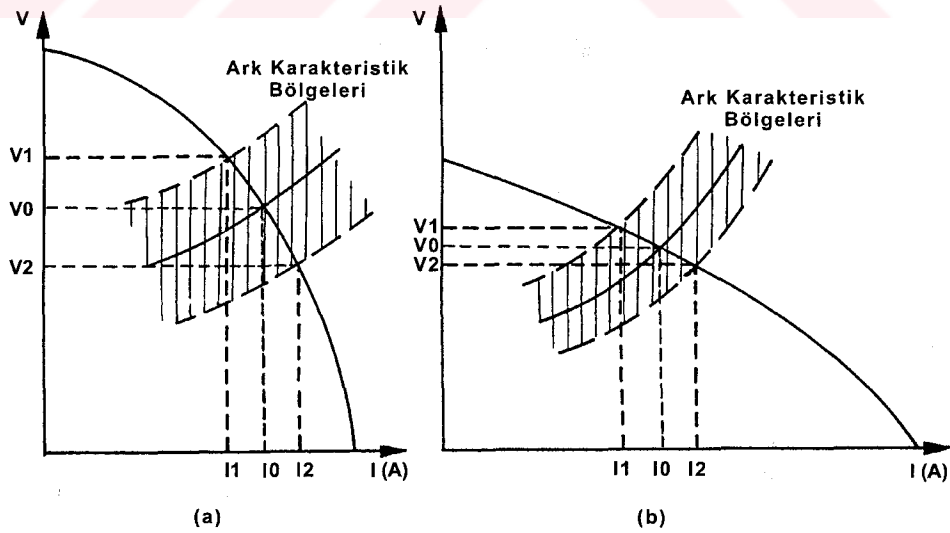
- Kaynak akım üretici.
- Kaynak tabancası olarak ta adlandırılan bir kaynak torcu.
- Tel biçiminde elektrod ve kılavuzunu, kaynak akım ve şalter kablolarını, gaz hortumunu, gerektiğinde soğutma suyu giriş ve çıkış hortumlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli hortum; torç bağlantı paketi.
- Tel biçimindeki elektrodun ilerlemesini sağlayan tel sürme tertibatı.
- Kumanda ve kontrol donanımı.
- Koruyucu gaz donanımı.
- Sulu soğutma sistemi
- Mekanize ve otomatik kaynak için yardımcı donanımlar

Bir elektrik ark kaynak yöntemi olan MIG kaynak yönteminde üç tür sarf malzemesi bulunmaktadır.

Birincisi olan elektrik akımı; akım üreticiden sağlanmaktadır, diğer sarf malzemeleri ise kullanılan koruyucu gaz ve sürekli kaynak bölgesine beslenen ve ergiyen çeşitli metal ve alaşımlarından üretilmiş kaynak telidir. Bu açıdan, yöntem tanımında kullanılan akım üreteçleri, telin akım ve gerilim ile yüklenmesini sağlayan ve koruyucu gaz nozulunu üzerinde bulunduran kaynak torçları, kullanılan koruyucu gazlar ve kullanılan teller, özellikle alüminyum ve alaşımlarına uygulanması yönünden daha detaylı olarak ele alınacaktır.

4.2.1.1. MIG kaynak akım üreteçleri

MIG kaynak yöntemi, doğru akım üretecek ve kaynak akım şiddeti ile gerilimi arasında uygun bir ilişki sağlayacak olan bir akım üretici gerektirir. MIG kaynağında kullanılan kaynak akım üreteçlerinin V-I karakteristiği, örtülü elektrod ile yapılan elektrik ark kaynağı ve TIG kaynağında kullanılan akım üreteçlerinde olduğu üzere düşey karakteristikli olabildiği gibi bunlardan çok farklı olan, yatay karakteristikli türler çok daha yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Kaluç 2004). Bir kaynak makinasının statik ve dinamik karakteristikleri elektriksel karakteristiklerdir ve makinanın seçiminde bir kaynak yöntemi için uygun olup olmadığını belirtirler. Statik karakteristik, makinanın akım şiddeti (I) ile gerilimi (V) arasındaki bağıntıyı gösterir. Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağında ve TIG kaynak yönteminde düşey statik karakteristikli makinalar kullanılmasına karşın MIG gazaltı kaynak yöntemlerinde yatay karakteristikli makinalar kullanılır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3.- Kaynak akım üreteçlerinde volt-amper karakteristikleri (Kaluç 2004, Tülbentçi 1998).

- (a) Düşey karakteristik (örtülü elektrod ile ark kaynağı ve TIG kaynağı için)
(b) Yatay karakteristik (MIG kaynağı için)

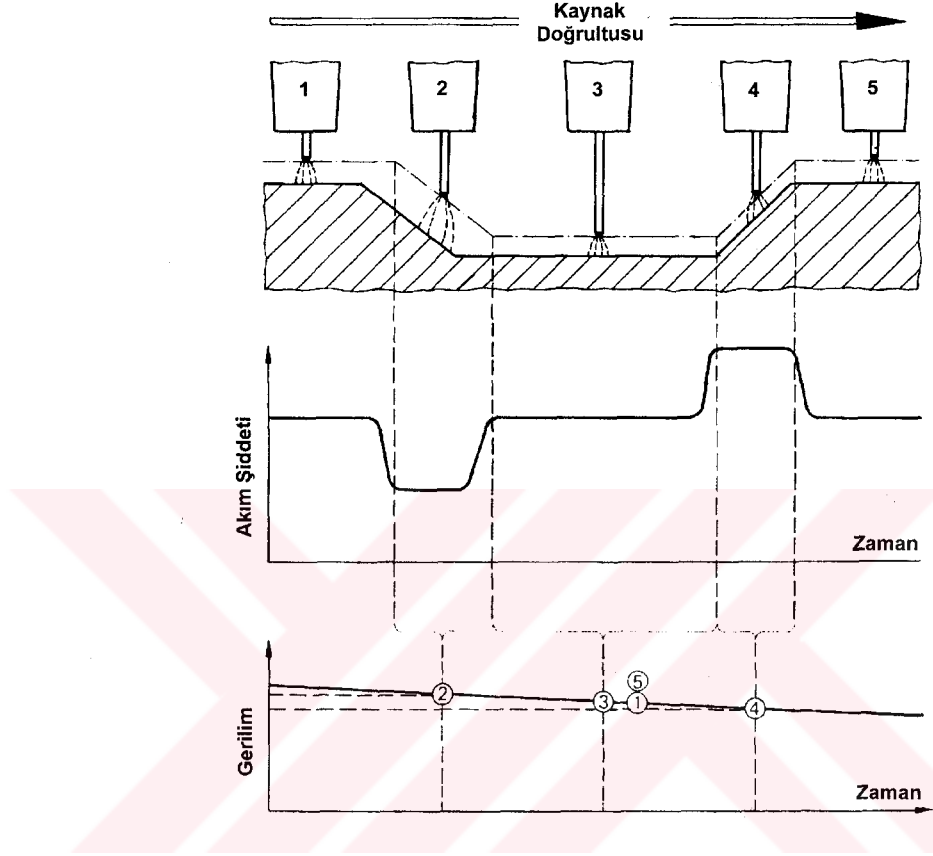
Sabit gerilimli (CV) olarak ta adlandırılan yatay karakteristikli kaynak akım üreteçlerinde; ark geriliminin dolayısı ile de ark boyunun az bir miktarda değişmesine karşın, akım şiddetinde yani ergime gücünde değişim çok daha şiddetlidir. Bu tür kaynak akım üreteçlerinde iç ayar diye adlandırılan ve hiçbir ek donanım gerektirmeden kendinden oluşan bir ark boyu ayarı vardır. Bu akım üreteçlerinde, ark gerilimi, tel ilerleme hızı ve buna bağlı olarak ta akım şiddeti ayarlanır. Bu tür makinalarda tel ilerleme motoru, seçilmiş sabit bir devirde döner, yani tel hızı sabittir.

Kaynak sırasında herhangi bir nedenle ark boyu uzadığı zaman, akım şiddeti büyük miktarda azalır. Buna bağlı olarak ta ergiyen tel miktarı azalır ve bu sırada tel sürme devam ettiğinden ark normal boyuna döner; tersi durumda, yani ark boyunun kısılması durumunda ise akım şiddeti sürekli artar, ergiyen tel miktarı da buna bağlı olarak artacağından sonuçta ark boyu normale döner. Bu kaynak yönteminde görüldüğü gibi; ark boyunun ayarlanması yarı otomatik kaynak durumunda dahi, kaynakçının kişisel el becerisine bırakılmamıştır. Ark boyu kaynak akım üreticinin yatay karakteristiği sayesinde kendinden ayarlanmaktadır.

Sabit gerilimli diye adlandırılan bu tür kaynak akım üreteçlerinde, gerilimin tamamen sabit tutulmasına olanak olmadığı gibi aynı zamanda sakıncalıdır; çünkü böyle bir üreteçte elektrod iş parçasına temas ettiğinde gerilim düşecek ve akım şiddeti sonsuz yükselecektir ve bu da elektrod ucunda ani bir patlamaya ve şiddetli sıçramaya neden olur; bu bakımdan bu tür kaynak akım üreteçlerinde her 100 Amper için en çok 7 Volt kadar ark gerilimi düşümüne izin verilir; bu değer kaliteli üreteçlerde 2 ile 5 V arasındadır (Şekil 4.4).

Dinamik karakteristik, çalışma sırasında ani yük değişimlerine karşı makinanın davranışını belirtir. İyi bir makina, ani yük değişimlerine çok kısa bir sürede (saniyenin yüzde birkaçı kadar bir zamanda) uyum sağlayabilmektedir. Bir kaynak makinasının karakteristikleri, laboratuvarında yapılacak ölçümlerle, kolaylıkla saptanabilir. Elektrik ark kaynağı makinaları, genel olarak yüksek gerilim ve düşük akım şiddetinde bulunan normal elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetindeki kaynak akımına çeviren cihazlardır. El ile yapılan normal ark

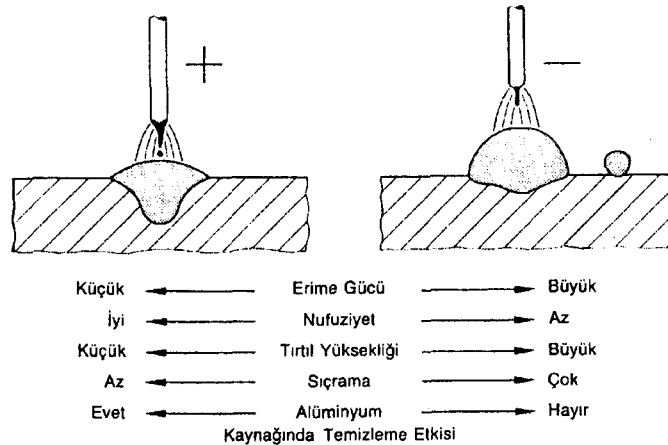
kaynağında, ark gerilimi 25- 55 Volt ve akım şiddeti de 70- 600 Amper arasındadır; tüm kaynak makinaları, kullanılan elektrodun çapına uygun bir akım şiddetini sağlayan bir ayar düzeni ile donatılmışlardır.



Şekil 4.4.- Sabit gerilimli akım üreticinde ark boyunun kaynak süresince sabit kalması (ΔI ayarı) (Tülbentçi 1998).

Düşey karakteristikli akım üreteçlerinde ark geriliminin önemli bir büyüklükte değişmesine karşın, akım şiddetindeki değişim çok azdır, dolayısıyla bu tür akım üreteçleri sabit akımlı olarak ta adlandırılır (CC). Bu olay ark boyunun kaynakçı tarafından ayarlandığı örtülü elektrod ile ark kaynağı ve TIG kaynağında çok önemli bir özelliktir, kaynakçının el hareketleri nedeni ile ark boyunda bir değişme olduğu zaman ergime gücünde meydana gelen değişim çok azdır ve bu da düzgün kaynak dikişi eldesi için çok önemli bir etkidir. Ark boyunun kaynak donanımı tarafından ayarlandığı ve sabit tutulduğu MIG yönteminde bu karakteristiğe sahip bir akım üretici kullanıldığında ark boyunun değişmesi, yani ark geriliminin değişmesi sonucu ark boyunu sabit tutabilmek için ark boyundan kumanda alan bir elektronik tertibat yardımı ile tel sürme tertibatının motor devri değiştirilir. Diğer bir anlatım ile

bu tür bir akım üretici kullanıldığında, ark boyunun değişimi tel sürme motorunun hızının değiştirilmesi ile ark boyu sabit tutulur. Bu sistem hem pahalıdır ve hem de çok hızlı değildir, ancak tel ilerleme hızının yavaş olduğu kalın çaplı tel elektrod durumu için uygundur. MIG yönteminde genelde ince tel elektrod (0.8, 1.0, 1.2 ve 1.6 mm) kullanıldığından, bu kumanda sistemi yavaş kalmakta ve iyi sonuç vermemektedir; bu sistem 2.5 mm' den daha kalın çaplı tel elektrodların kullanıldığı otomatik kaynak sistemlerinde, tozaltı kaynak yönteminde ve elektrocuruf kaynak yönteminde uygun sonuçlar vermektedir (Tülbentçi 1998, Kaluç 2004). Ancak, bu tür akım üreticileri, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağında bazı üstünlüklere sahiptir. Sabit akımlı (CC) akım üreticilerinde, yatay karakteristikli akım üreticilerine göre ısı girdisi sabittir ve nüfuziyet daha iyidir. Buna karşın kaynakçının yeterli derecede deneyime sahip olması gereklidir (Mathers 2002). Ergiyen elektrod ile gazaltı kaynağında büyük bir çoğunlukla doğru akım ve yatay karakteristikli, nadiren de düşey karakteristikli kaynak akım üreticileri kullanılır. Bilinen diğer ark kaynak yöntemlerinde olduğu gibi doğru akım kullanılması durumunda elektrod pozitif veya negatif kutba bağlanabilir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında banyo üzerinde oluşan oksit tabakasının parçalanabilmesi için elektrodun kesinlikle pozitif kutba (ters kutuplama) bağlanması gereklidir. Diğer metal ve alaşımlarının özellikle çeliklerin kaynağında her iki kutuplama türü kullanılabilirse de, çok daha derin bir nüfuziyet sağladığından uygulamada genellikle ters kutuplama tercih edilir; doğru kutuplama çok nadir olarak, nüfuziyetin çok az olmasının gerekli olduğu durumlarda kullanılır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5.- MIG kaynağında kutuplamanın etkisi (Kaluç 2004, Tülbentçi 1998).

MIG kaynak yönteminde kullanılan ve doğru akım veren akım üreteçleri ve çalışma prensipleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

4.2.1.1.1. Motor generatör tipi akım üreteçleri

Bu tür akım üreteçleri şantiyelerde, elektrik akımının bulunmadığı yerlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş, dizel veya benzin motoru tarafından tahrik edilen generatörlerdir. Bunlar genellikle hem yatay hem de düşey karakteristik ile çalışabilecek biçimde tasarlanırlar ve bu şekilde özellikle boru hatlarının kaynağında hem örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı ve hem de MIG yönteminde kullanılabilir. Bu özellik şantiyelerde büyük bir kolaylık sağlamaktadır.

4.2.1.1.2. Redresör türü akım üreteçleri

Normal şebekeye bağlanan bu cihazların monofaze ve trifaze akım ile çalışanları vardır. Trifaze akım ile çalışan üreteçler gerek daha kararlı bir kaynak arki oluşturmaları ve gerekse de şebekeyi dengeli bir şekilde yüklemeleri nedeni ile tercih edilirler. MIG kaynak yönteminde güvenilir kaynak bağlantısı elde edebilmek için ayarlanması gereken kaynak parametrelerinin başında akım şiddeti ve gerilimi gelir. Sabit gerilimli veya diğer bir deyimle yatay karakteristikli kaynak akım üreteçlerinde bu iki parametre birbirlerinden bağımsız olarak ayarlanabilir. Kaynak akım gerilimi, akım üreticinin ince ve kaba ayar düğmelerinden kademeli olarak veya bazı özel tiplerde ise potansiyometre ile kademesiz olarak ayarlanabilir. Kaynak akım şiddeti ise MIG kaynak üreteçlerinde tel ilerletme düğmesinden ayarlanır. Uygun seçilmiş bir çalışma noktası arkın sakin ve kararlı bir şekilde yanışı ile kendini belli eder (Kaluç 2004, Tülbentçi 1998).

Bir MIG kaynak akım üreticinde sabit gerilim karakteristik ayar olanağı ne kadar fazla olursa optimal çalışma noktasının saptanması da o derece kolay olur. Genel olarak standard akım üreteçlerinde 3 kaba ayar ve 5 adet de ince ayar vardır, bu da toplam 15 kademede gerilim ayar olanağı sağlar (Tülbentçi 1998).

4.2.1.1.3. Sinerjik darbeli akım üreteçleri

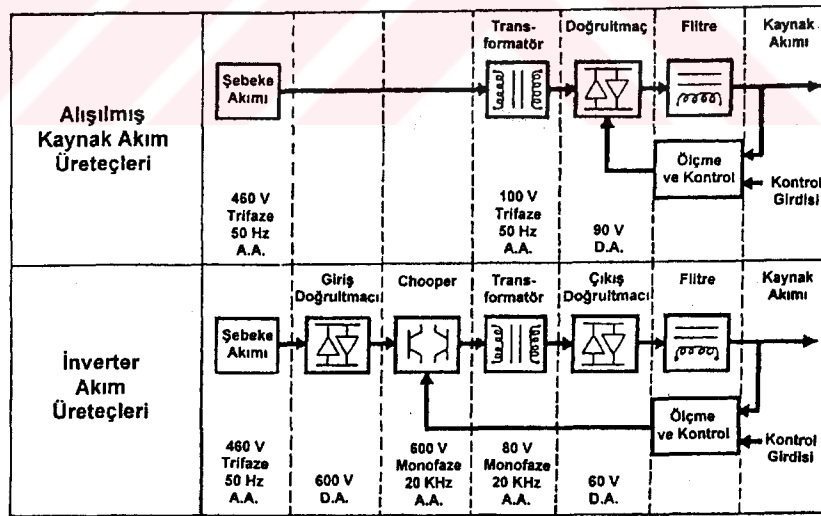
İyi bir nüfuziyetin, buna karşın parçaya ısı girdisinin sınırlı tutulmasının gerekli olduğu durumlarda, darbeli doğru akım yöntemi uygulanır. Darbeli doğru akım (pulsed direct current) ile alternatif akımı birbirlerine karıştırmamak gerekir; darbeli doğru akım halinde, seçilen akım şiddeti önceden saptanmış iki değer arasında, arzu edilen bir frekansta değişmektedir. Bu sistemin üstünlüğü tel elektrodan ergiyen damlaların kaynak banyosuna geçişinin temel ve darbe akım şiddetine göre iki farklı hızda gerçekleşmesidir. Darbe akımı sırasında, tepe akımda, kaynak metali hızlı bir biçimde ergir ve kaynak banyosuna spray ark biçiminde taşınır; bunu takibeden temel akım periyodunda elektrod ucunun ergimesi azalır hatta gerekirse hiç ergimemesi sağlanır ve kaynak banyosuna da ısı girdisi azalır ve bu sırada banyo kısmen katılaşmaya başlar; temel akım şiddeti arkın sönmeyeceği bir değerde tutulduğundan arkın yeniden tutuşturulması sorunu ortadan kalkar. Bu şekildeki bir ark ile her pozisyonda kaynak yapmak kolaylaşmış olur. Bu türde üretilen ilk akım üreteçlerinde ya frekans ya da temel ve darbe akımı şiddetleri ayar edilebilmekteyken; bugün güç elektroniği yardımı ile frekans, temel akım şiddeti, darbe akım şiddeti ile bunların sürelerini birbirlerinden bağımsız olarak ayarlayabilen akım üreteçleri geliştirilmiş ve artık günümüz endüstrisinde, her akım darbesinde kaynak banyosuna tek bir damla kaynak metali geçişi MIG kaynak donanımları uygulama alanına girmiştir (Tülbentçi 1998).

4.2.1.1.4. İnverter türü akım üreteçleri

Son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanıma giren bu tür akım üreteçleri sayesinde MIG kaynak yöntemi daha kolay ve sıçrantsız bir biçimde gerçekleştirilmektedir. Kaynak teknolojisindeki en son gelişmelerden bir tanesi hatta en önemlisi, inverter türü akım üreteçlerinin uygulamaya girmiş olmasıdır. İnverterler daha önceleri uçak endüstrisinde, güç kaynağı uygulamalarında ve kontrol devrelerinde doğru akım üretiminde kullanılmaya başlanmış ve kazanılan deneyimler bunların kaynak endüstrisinde de güç kaynağı olarak kullanılmasına olanak vermiştir.

Alışılmış kaynak akım üreteçlerinde, normal elektrik devresinden çekilen A.A doğrudan bir transformatöre girer, burada akımın frekansı değişmez sadece gerilimi ayarlanır ve bu akım redresörde doğrultulur ve filtre edilerek kaynak için gerekli koşullarda doğru akım elde edilir, burada kontrol devreleri de çıkış akımından aldıkları sinyalleri giriş kontrol sinyalleri (akım üretcinin ayar değerleri) ile karşılaştırarak redresör çıkışını ayarlarlar.

İnverterlerde ise, şebekeden çekilen A.A. önce bir redresöre girer ve doğru akım haline dönüştürülür ve bu akım Chooper diye adlandırılan özel bir cihazda yüksek frekanslı A.A. durumuna dönüştürülür; kaynak işlerinde kullanılan inverterlerde bu frekans 20.000 Hz mertebesindedir. Bu yüksek frekanslı AA'nın gerilimi transformatörde kaynak için uygun bir değere indirilir ve buradan çıkan akım aynen alışılmış redresörlerde olduğu gibi doğrultmaçta (diyotta) doğrultulur ve bir filtreden geçirilerek kaynak için gerekli koşullarda doğru akım elde edilir. Sonuç olarak, gerek alışılmış akım üreteçlerinde gerekse inverterlerde şebeke akımı kaynak için gerekli koşullardaki doğru akıma dönüştürülmüş olur; ancak burada inverterin sağladığı çok önemli üstünlükler vardır.



Şekil 4.6.- İnverter türü kaynak akım üreteçlerinin prensibi ve alışılmış akım üreteçleri ile karşılaştırılması (Kaluç 2004).

Transformatör büyüklüğü A.A.'nın frekansı ile ters orantılıdır; frekans büyüdükçe transformatör boyutu küçülür. Normal şebeke akımı olan 50 Hz'lik alternatif akım durumunda transformatörün çekirdeği sac destelerinden oluşmak zorundadır, buna

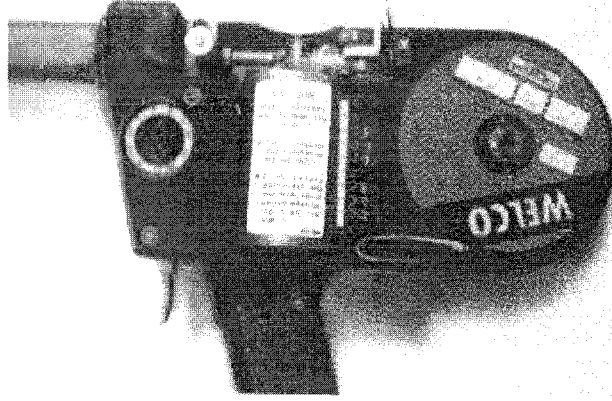
karşın 5 kHz'i aşan frekanslarda çekirdek doğrudan ferrit'ten yapılabilir ve buna ek olarak sargılarda kullanılan tellerin çapları daha küçüktür, bu bakımdan aynı akım gücündeki bir normal redresör ve inverter karşılaştırıldığında, inverterin ağırlık olarak %25 ve boyut olarak ta %33 daha küçük olduğu görülür. İnverterler daha yüksek bir verim ve daha büyük bir güç faktörüne sahiptirler dolayısı ile inverter kullanımı durumunda elektrik giderlerinde önemli bir azalma ortaya çıkmaktadır ve özellikle 200A'in altındaki akım şiddetleri ile çalışma durumunda bu verimlilik daha da büyümetedir.

Son yıllarda alışılmış kaynak akım üreteçleri, birden fazla kaynak yöntemi için (örtülü elektrod ile ark, MIG, TIG gazaltı kaynak) kullanılabilir düzenlemeler ile pazara sunulmaktadır; ancak bu tür üreteçlerde bazı sınırlamalar ortaya çıkmaktadır. Zira, bir yöntemin verimli bir biçimde uygulanabilmesi için diğer bir yöntemin performansı azaltılmaktadır. Hatta, özel anahtar ayarları için de yetişmiş personel gerekmektedir. İnverterlerde ise, tek bir ünite ile birçok kaynak yönteminin tam olarak istenen performansta uygulanabilmesi olanağı doğmuştur. Bu şekilde, örtülü elektrod ile ark kaynağı- MIG, TIG- özlü tel ile ark kaynağı ve darbeli akım TIG kaynağı gibi yöntemler tek bir anahtar ile seçilerek üstün performanslı kaynak uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir (Tülbentçi ve Kaluç 1997).

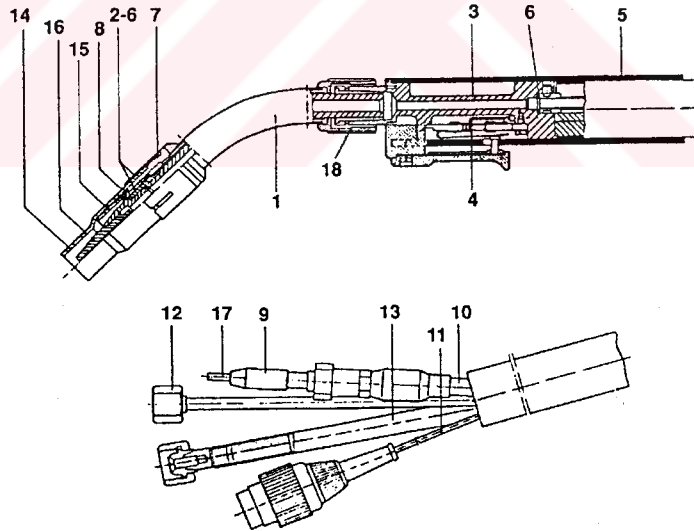
4.2.2. MIG Kaynak Torçları

MIG kaynağında tel elektroda akımın yüklenmesi ve kaynak bölgesine iletilmesi, ark bölgesine koruyucu gazın gönderilmesi torcun görevidir. Kaynak işleminde kullanılan akımın şiddetine ve kaynak yönteminin otomatik veya yarı-otomatik uygulanmasına göre çeşitli tür ve büyüklüklerde torçlar geliştirilmiştir. Ark sıcaklığından etkilenen torcun sürekli olarak soğutulması gereklidir; düşük akım şiddetlerinde yapılan çalışmalarda koruyucu gaz akımı, gerekli soğutmayı yapabilmektedir. Şekil 4.8' de hava soğutmalı kuğu boyunlu standard bir kaynak torcu görülmektedir. Ayrıca, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan, üzerinde küçük tel makarası bulunan çekmeli tür dik torçlar da vardır. Bu tür bir torcun görünümü, Şekil 4.7'de verilmiştir. Büyük çaplı elektrodlar, yani yüksek akım şiddetlerinin kullanılması durumunda ise ($I \geq 250A$) su ile soğutma

sistemi gerekmektedir. Su ile soğutma, doğal olarak düşük akım şiddetlerinde de daha iyi bir soğutma sağlasa da, uygulamada torçta sızdırmazlığın sağlanması için kullanılan contaların bakımı külfetli olduğundan ve torç ağırlaştığından tercih edilmez (Tülbentçi 1998).



Şekil 4.7.- Çekmeli tür bir torç (Minnick 1996).



- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1. Torç Boynu | 10. Kılavuz Hortumu |
| 2. Akım Memesi Tutucusu | 11. Şalter Kablosu |
| 3. Torç Gövdesi | 12. Gaz Hortumu |
| 4. Torç Şalteri | 13. Akım Kablosu |
| 5. Kabza | 14. Gaz Nozulu |
| 6. Conta | 15. İzolasyon Ringleri |
| 7. Bağlama Ringi | 16. Akım Memesi |
| 8. İzolasyon Yüksüğü | 17. Elektrod Kılavuzu (spiral) |
| 9. Kılavuz Lülesi | 18. Torç Bağlantı Rakoru |

Şekil 4.8.- Hava soğutmalı kuğu boynu tür bir torç kesiti ve torç bağlantı paketi.

4.2.3. MIG kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazlar

MIG kaynak yönteminde kaynak telinin kimyasal bileşimi ve koruyucu gazın türü, kaynak metalinin bileşimini ve mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir.

Bütün gazaltı kaynak yöntemlerinde olduğu gibi MIG yönteminde de koruyucu gazın ark bölgesini tamamen örtmesi ve atmosferin olumsuz etkilerinden koruması gerekmektedir. Koruyucu gaz, ergimiş kaynak banyosu içindeki alaşım elementlerinin atmosferdeki oksijen ile reaksiyona girmesini engellemek, azot ve hidrojen gibi diğer zararlı gazların kaynak metaline sıvı kaynak banyosunda çözülerek girmesini önlemek işlevlerini yerine getirir. Ergimiş halde hemen hemen tüm metaller, havadan oksijen ile azot absorbe ederler ve ergimiş metalde çözünen bu gazlar, katılaştan kaynak metalindeki elementler ile birleşerek yeni bileşikler oluştururlar; bu olay kaynak metalinin kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkiler, gözenek oluşumuna ve gevrekleşmeye neden olur.

MIG kaynağında soy gazlar veya bunların çeşitli oranlardaki karışımları kullanılır. Genel olarak soy gazlar, diğer elementler ile reaksiyona girmediklerinden demir dışı metallerin kaynağında, soy gaz karışımları da çeşitli tür paslanmaz çeliklerin kaynağında uygulama alanı bulmaktadır (Minnick 1996, Tülbentçi 1998, Tulbentci ve Kaluc 1997).

Kaynak işlemi için gaz seçiminde çeşitli etmenlerin göz önünde bulundurulması gereklidir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kaynak edilen metal veya alaşımın türü,
- Ark karakteristiği ve metalin damla geçiş biçimi,
- Kaynak hızı,
- Parça kalınlığı, gereken nüfuziyet ve kaynak dikişinin biçimi,
- Kaynak dikişinden beklenen mekanik özellikler,
- Kaynak banyosunda oluşan oksitlerin temizlenmesi,
- Bulunabilirlik ve gazın maliyeti (Minnick 1996, Tülbentçi 1998, Cary 2002).

Gazaltı kaynak yöntemlerinde kullanılan gazların tür ve bileşimleri, dünyanın her gelişmiş ülkesinde standartlar ile belirlenmiştir. Avrupa Birliği'nin kurulmasından sonra, AB üyesi devletler bu konuda EN 439'u hazırlamışlar ve bu standard da TS EN 439 olarak yürürlüğe girmiştir (EN 439 ve TS EN 439 1995).

4.2.3.1. Soy gazlar

Soy gazlar, dış kabuklarındaki tüm yerlerin elektronlar ile dolu olması, diğer bir deyimle dış kabuğun kapalı olması nedeni ile diğer elementlerin atomları ile elektron alışverişinde bulunmazlar; yani herhangi bir koşulda kimyasal bir reaksiyona girmezler. Bu bakımdan yöntemin ilk gelişme yıllarında koruyucu gaz olarak sadece helyum ve argon gibi soygazlardan yararlanılmıştır (Tülbentçi 1998, Welding Handbook 1991, Sacks 1976).

4.2.3.1.1. Argon

Argon tamamen soy monoatomik bir gazdır, sıvı metaller içinde çözülmez ve yoğunluğunun havadan daha yüksek olması nedeni ile özellikle yatay kaynak pozisyonlarında, kaynak sırasında çok etkin bir örtü oluşturarak kaynak banyosunu çok iyi bir biçimde korur. Günümüzde argon genellikle havanın sıvılaştırılarak oksijen ve azotun ayrıştırıldığı tesislerde yan ürün olarak elde edilmektedir. MIG kaynak yöntemi için argon ve argon içeren gaz karışımları soy gaz karakterinde olmalarından dolayı gerek koruyucu gaz ve gerekse kök gazı olarak, düşük iyonizasyon potansiyeline sahip olmaları nedeni ile en uygun özellikleri göstermektedirler. Arkın tutuşması kolaydır ve alternatif akımla, alüminyum ve magnezyumun kaynağında çok üstün oksit temizleme etkisi gösterirler. Argon gazı içinde oluşan arkın gerilim düşümü, diğer koruyucu gazlara örneğin, helyuma göre daha azdır, ayrıca argonun ısı iletme kabiliyetinin de zayıf olması nedeni ile ark sütunu daha geniş ve sıcaklığı da özellikle dış kısımlarda düşüktür. Sütunun merkezinde gerek metal buharları ve gerekse damla geçişi dolayısı ile sıcaklık daha yüksektir. Bu bakımdan argonun koruyucu gaz olarak kullanıldığı kaynak dikişlerinde nüfuziyet dikişin merkezinde derin, kenarlarda daha azdır. İyonizasyon potansiyelinin helyuma göre düşük olması, çalışma akımında ark geriliminin daha

düşük olmasını sağladığından özellikle ince parçaların kaynağında helyuma tercih edilir (Tülbentçi 1998, Welding Handbook 1991, Cary 2002).

4.2.3.1.2. Helyum

En hafif monoatomik gazlardan birisi olan helyum, argona göre 10 kat daha hafiftir ve bu özeliği ile de kaynak sırasında etkin bir korumanın gerçekleştirilebilmesi için gerekli gaz sarfiyatını artırmaktadır; örneğin yatay pozisyonlarda aynı koşullarda argonun yaptığı korumayı sağlamak için 3 kat helyuma gerek vardır. Atmosferde çok az miktarda bulunan helyumu ayrıştırmak endüstriyel olarak olanaksızdır; helyum günümüzde doğal gazdan ayrıştırılarak elde edilmektedir ve bu bakımdan ABD'de kolay ve ekonomik olarak sağlanabilmektedir. Helyum atmosferi ısıyı iyi iletmediğinden, bu gazın koruyucu gaz olarak kullanılması halinde derin nüfuziyetli kaynak dikişleri elde edilir. Helyumun iyonizasyon potansiyeli argona nazaran daha yüksek olduğundan, helyum atmosferinde oluşan kaynak arkı daha yüksek enerjilidir. Bu bakımdan ısıyı iyi ileten bakır, alüminyum ve magnezyum gibi metallerin kalın kesitlerinin kaynağında genellikle ön tav gerektirmez. Helyumun koruyucu gaz olarak kullanıldığı MIG uygulamalarında daha geniş ve argona nazaran da daha derin nüfuziyetli kaynak dikişleri elde edilir; bu olay, yüksek hızda çalışan mekanize kaynak uygulamalarında önemli bir üstünlük olarak karşımıza çıkar (Tülbentçi 1998, Welding Handbook 1991, Hilton 1990, Lucas 1992, Lucas 1992b).

4.2.3.1.3. Karışım gazlar

Koruyucu gazın seçiminde, kaynak ile birleştirilecek metalin özelliklerinin yanısıra, koruyucu gazın ekonomikliği ve kaynak sırasındaki özellikleri de göz önüne alınmaktadır. Gazların ayrışma enerjileri, iyonizasyon potansiyelleri, yoğunlukları, ısı ve elektrik iletim özellikleri, maliyetleri büyük farklılıklar göstermekte ve bunun sonucu olarak ta arkın oluşumu ve kaynak sırasındaki davranışı, ark içinde malzemeninin taşınımı ve elde edilen kaynak bağlantısının profili farklılıklar göstermektedir. Sadece tek bir tür gazın kullanımında gazların herbiri bir takım üstünlükler ve sınırlamalar gösterdiklerinden, günümüzde gazların iyi özelliklerini optimize edebilmek, sınırlamalarını en aza indirebilmek için MIG kaynak

yönteminde çeşitli karışım gazlar kullanılır. Ark atmosferinin karakteri, çeşitli gaz ve gaz karışımlarına bağlı olarak değişir. Argon ve helyum karışımları hem argonun hem de helyumun en üstün özelliklerini bir arada elde edebilmek amacı ile geliştirilmiş ve bu sayede nufuziyet ve ark kararlılığı optimize edilmiştir; helyuma %25 argon eklenmesi ile saf argon durumuna göre daha derin nufuziyet ve saf argon durumundan daha üstün ark kararlılığı bir arada elde edilebilmektedir. Uygulamada, bu iki gazın %80 He ve %20 Ar'dan, % 75 Ar+ % 25 He'a kadar çok değişik karışımları ile karşılaşılmaktadır. Ar+ He karışımı gazlar alüminyum, magnezyum ve bakır, nikel alaşımlarının kaynağında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu karışımlar saf argon haline göre daha yüksek bir sıcaklığa sahip, saf helyum haline göre de daha kontrol edilebilir bir ark oluşturmakta ve daha az miktarda gözenek oluşumuna neden olmaktadır (Tülbentçi 1998, Welding Handbook 2004, Welding Handbook 1991, Hilton 1990, Lucas 1992, Lucas 1992b).

Tablo 4.2.- Günümüz endüstrisinde MIG kaynak yönteminde sık kullanılan koruyucu gaz ve gaz karışımları (AWS).

Koruyucu Gaz:	Kimyasal Davranışı	Uygulama Alanı
Argon	Soy	Çelik hariç tüm endüstriyel metal ve alaşımların kaynağında
Helyum	Soy	Daha yüksek sıcaklık ve gözenek miktarını azaltmak için Al ve Cu alaşımlarının kaynağında
Argon+Helyum % 20-80 / 50-50	Soy	Yüksek sıcaklık ve gözenek miktarını azaltmak ve daha sakin ve kontrollü bir ark ile çalışmak için Al ve Cu alaşımlarının kaynağında
Argon+Klor (Klor eser miktarda)	Soy	Gözenek miktarını azaltmak için alüminyum ve alaşımlarının kaynağında
Azot	Redükleyici	Çok güçlü bir ark için bakırın kaynağında
Ar+ %25-30 N	Redükleyici	Güçlü fakat daha yumuşak ve kontrollü bir ark için bakırın kaynağında
Ar + %1-2 O ₂	Oksitleyici	Bazı dezokside bakır alaşımlarının kaynağında
Ar + %3-5 O ₂	Oksitleyici	Yüksek oranda dezokside edilmiş tel elektrod ile paslanmaz ve karbonlu çeliklerin kaynağında
Ar + %5-10 O ₂	Oksitleyici	Yüksek oranda dezokside edilmiş tel elektrod ile çeşitli çeliklerin kaynağında
Ar + %20-30 CO ₂	Oksitleyici	Kısa ark ile çeşitli çeliklerin kaynağında
Ar + % 5O ₂ + % 15 CO ₂	Oksitleyici	Özellikle Avrupada, dezokside edilmiş tel elektrod ile çeşitli çeliklerin kaynağında
CO ₂	Oksitleyici	Dezokside edilmiş tel elektrod ile yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağında
CO ₂ + %3-5 O ₂	Oksitleyici	Özellikle Avrupada, dezokside edilmiş tel elektrod ile çeşitli çeliklerin kaynağında
CO ₂ + %20 O ₂	Oksitleyici	Özellikle Japonyada, dezokside edilmiş tel elektrod ile çeşitli çeliklerin kaynağında

4.2.4. Alüminyumun MIG kaynağında kaynak telleri

Alüminyum alaşımı kaynak tellerinin, ana alaşım elementleri magnezyum, manganez, çinko, silisyum ve bakırdır. Bu elementleri katmanın en önemli amacı, alaşımın mekanik özelliklerinin artırılmasıdır, doğal olarak bu işlem yapılırken ortaya çıkan alaşımın korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti de gözönünde bulundurulur.

Hangi tür alüminyum elektrodun, hangi tür alaşım ile beklenen sonucu verdiği denemeler ile saptanmıştır ve genellikle bir tür tel birden fazla alaşım ile rahatlıkla kullanılabilir; doğal olarak burada üzerinde durulması gereken konu kaynak bağlantısından beklenen özelliklerdir.

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak telleri AWS A5.10'a ve EN ISO 18273'e göre standardlaştırılmıştır.

Tablo 4.3'de AWS A5.10'a göre alüminyum kaynak telleri, Tablo 4.4'de de EN ISO 18273'e göre alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak telleri görülmektedir.

Tablo 4.3.- AWS A5.10'a göre alüminyum kaynak telleri.

Tür	Kimyasal Bileşim (%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1100	1.0 Si + Fe		0.05-0.20	0.05	-	-	0.10	-	min 99.0
4043	4.5-6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	Kalan
5154	0.45 Si + Fe		0.10	0.10	3.1-3.9	0.15-0.35	0.20	0.20	Kalan
5154	0.45 Si + Fe		0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	0.20	0.05	Kalan
5652	0.45 Si + Fe		0.04	0.01	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	-	Kalan
5554	0.45 Si + Fe		0.10	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20	0.25	0.05-0.20	Kalan
5356	0.50 Si + Fe		0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	0.06-0.20	Kalan
5183	0.40	0.40	0.10	0.50-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15	Kalan
5556	0.45 Si + Fe		0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.04-0.35	0.25	0.05-0.20	Kalan
6061	0.40-0.80	0.70	0.15-0.40	0.15	0.80-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	Kalan

Tablo 4.4.- EN ISO 18273'e göre alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak telleri.

Alaşım		Kimyasal Bileşim (%) ¹⁾²⁾³⁾											Diğer Elementler
Sembol	Nu-merik	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ga	Ti	Zr	Açıklama	
Al99.8(A)	1080A	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	-	.06	0.03	0.02	-	min.99.8 Al	0.02
Al99.5Ti	1450	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	-	.07	-	0.10-0.20	-	min.99.5 Al	0.03
Al Mn l	3103	0.50	0.7	0.10	0.9-1.5	0.30	0.10	.20	-	-	-	(Ti+Zr)0.1	0.05 ⁴⁾
AlSi7Mg	4018	6.5-7.5	0.20	0.05	0.10	0.50-0.8	-	.10	-	0.20	-	-	0.05 ⁴⁾
AlSi5(A)	4043A	4.5-6.0	0.6	0.3	0.15	0.20	-	.10	-	0.15	-	-	0.05 ⁴⁾
AlSi10(Mg)	4046	9.0-11.0	0.50	0.03	0.40	0.20-0.50	-	.10	-	0.15	-	-	0.05 ⁴⁾
AlSi12(A)	4047A	11.0-13.0	0.6	0.30	0.15	0.10	-	.20	-	0.15	-	-	0.05 ⁴⁾
AlMg2Mn0.8Zr	5249	0.25	0.40	0.05	0.50-1.1	1.6-2.5	0.30	.20	-	0.15	0.10-0.20	-	0.05 ⁴⁾
AlMg3	5754	0.40 ⁵⁾	0.40	0.10	0.50	2.6-3.6	0.30	.20	-	0.15	-	(Mn+Zr)0.10-0.6	0.05 ⁴⁾
AlMg5Cr(A)	5356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	.05-0.20	.10	-	0.06-0.20	-	-	0.05 ⁴⁾
AlMg5Mn	5556 (A)	0.25	0.40	0.10	0.6-1.0	5.0-5.5	.05-0.20	.20	-	0.05-0.20	-	-	0.05 ⁴⁾
AlMg4.5Mn0.7(A)	5183	0.40 ⁵⁾	0.40	0.10	.50-1.0	4.3-5.2	.05-0.25	.25	-	0.15	-	-	0.05 ⁴⁾
AlMg4.5MnZr	5087	0.25	0.40	0.05	0.7-1.1	4.5-5.2	.05-0.25	.25	-	0.15	.10-0.20	-	0.05 ⁴⁾

1) Ürün kimyasal bileşimi, berilyum içeriği %0.0008 olarak sınırlandırılmıştır.
2) Tablodaki tek değerler en çok olanları gösterir.
3) EN 573-3 Madde 7'de verilmiş değerlere benzer şekilde yuvarlatılmıştır.
4) Diğer elementlerin en çok değerleri %0.15'dir.
5) Kaynakta çatlama tehlikesini azaltmak için Si içeriği %0.25 olarak önerilir.
Not: 4018 alaşımı EN 573-3'de bulunmamaktadır.
Açıklama: Eğer alaşım MIG teli ise: EN- G AlSi5(A) veya EN- G 4043A; eğer TIG kaynak teli (çubuğu) ise: Rod EN- W AlSi5(A) veya Rod EN- W 4043A olarak gösterilir.

4.2.5. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı için kullanılan kaynak ağzlarının hazırlanması

Birbirinin aynı veya farklı kalınlıktaki malzemelerin karşılıklı gelerek kaynak edilmesinde, kaynağın tüm kalınlıkta yani derinlemesine işlemesi için kaynak ağzı açmak gereklidir. Ağzın hazırlığı, alüminyum ve alüminyum alaşımları halinde, malzeme kalınlığına ve açılacak ağzın biçimine göre çok çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bunlar giyotin makas ile kesme, talaşlı işleme (planyalama, frezeleme

veya taşlama) veya plazma arkı ile kesme işlemlerinden biri olabilir. Bu aşamada hızlı ve ekonomik kesme yönteminin seçimine de çok önem verilir (Minnick 1996, Tülbentçi 1998, Sacks 1976, Welding Handbook 1991, Kaluç 2004).

Bazı kaynak yöntemlerinde; ince saclar durumunda, çoğu zaman bir ağız hazırlığı gerekemeyebilir; ancak kesit kalınlaştıkça kenarların açılı olarak kesilerek basit V biçimine getirilmesi zorunlu olmaktadır. Bu şekilde kaynak metali, bağlantının köküne kadar nüfuz ettirilebilmekte ve de tüm kesit kaynak edilmektedir. İlk durumdaki ağız, küt alın kaynak ağız hazırlığı ile I-alın birleştirilmesi adını almaktadır. İkinci halde ise V-alın kaynak ağızı açılarak V-alın birleştirilmesi yapılır. Bazen aynı birleştirme türü için farklı ağızlar hazırlamak gerekebilir. Parça kalınlığı daha artarsa kaynak edilecek kenarları daha farklı biçimlerde yontmak dolayısı ile farklı ağız biçimleri hazırlamak gerekmektedir. Ancak bu işlem rastgele yapılamaz, kaynak ağızlarının açılmasında dikkat edilmesi gereken bazı kurallar vardır ve genel biçimleri çeşitli standartlarda belirlenmiştir, bu konuda EN ISO 9692-3: 2001 geçerlidir, bu standardda ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde kullanılması gereken ağız biçimleri verilmiştir (Tablo 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8) (EN ISO 9692-3. 2001) (Minnick 1996, Tülbentçi 1998, Sacks 1976, Welding Handbook 1991, Kaluç 2004).

Kaynak ağzının hazırlanmasında bağlantının mukavemeti önemli bir rol oynar ve esas alınacak konu, gereken mukavemette ve en iyi kalitede kaynak dikişinin gerçekleşmesini en ekonomik biçimde sağlamaktır. Gazaltı kaynak yöntemlerinde (MIG- TIG) oluşan kaynak metalinin kimyasal ve mekanik özellikleri kaynak ark ısı etkisi ile ergiyen elektrod metalinin etkisi altındadır. Yani kaynak sırasında kaynak ağız kenarlarının bir bölümü ergirken, tel elektrodun hemen hemen tümü ergir ve kaynak metalini oluşturur. Bu açıdan, uygulamada tel elektrod seçilirken kaynak edilecek esas metalin akma, çekme ve çentik-darbe mukavemetlerine uygun mukavemet veren tel elektrod seçimi yapılır. Bu olay, tel elektrod üreticilerinin kataloğunda her elektrod için belirtilmiştir ve çoğunlukla operatöre verilen teknik resim üzerinde de gösterilir.

Yüksek mukavemetin gerekli olduğu veya dinamik zorlamaların etkili olduğu durumlarda parça tüm kesiti boyunca kaynak edilmek, yani dikiş tam bir nüfuziyete

sahip olmak zorundadır. Buna karşın statik zorlanmalar halinde, sadece kaynak dikişinden beklenen mukavemetin gerektirdiği kadar bir kesit kaynatılır ve bu durumlarda tam bir nufuziyet gerekmez. Kaynaklı bağlantıda, kaynaklanan kesitin tümünün kaynak edilmesi ağız biçimini, kök aralığını ve kök aln yüksekliğini etkiler. Kesitin ancak bir kısmının kaynak edilmesinin gerekli olduğu durumlarda, kök açıklığına gerek yoktur ve yüksek bir kök aln bırakılır. Diğer bir deyimle, parçalar birbirine öpüştürülür.


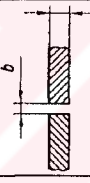


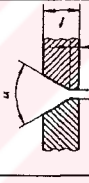


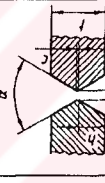

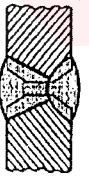
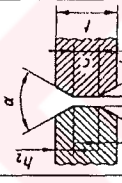


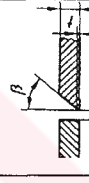


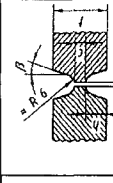
Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağında MIG, TIG yöntemleri gibi açık ark kaynak yöntemlerine göre elektrod çapları büyük olduğundan oluşan ark yoğunluğu azdır ve aynı akım şiddeti için nufuziyet daha az derindir. Bu açıdan bu bağlantılarda daha geniş kök aralığı ve daha az bırakılır (Minnick 1996, Tülbentçi 1998, Sacks 1976, Welding Handbook 2004, Welding Handbook 1991, Kaluç 2004).

Referans Numarası ^a	İş parçası kalınlığı	İfadesi	Sembol ^b	Görünüm	Kaynak Ağızı	Açı α, β	Aralık b	Kök kalınlığı c	Diğer boyutlar	Önerilen Yöntem	Uyarılar
1.1	t 4	Kıvrık alın kaynağı				—	—	—	—	141	
1.2	t 4	Küt alın kaynağı				—	b 2	—	—	141	Kök yuvarlatması
1.2	2 t 4	Altlıklı küt alın kaynağı	 MR MI			—	b 1.5	—	—	131	
1.3	3 t 5	V-alın kaynağı				$\alpha \geq 50^\circ$	b 3	c 2	—	141	
						60° α 90°	b 2			131	
1.3	3 t 5	Altlıklı V-alın kaynağı				60° α 90°	b 4	c 2		131	
1.14	8 t 20	Ayrıntılı V altlıklı alın				3 t 5	3 b 10	—	—	131	
1.5	3 t 15	Kök braklı mış V-alın	Y			3 t 5	b 2	c 2	—	131	

Tablo 4.5.-Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının tek taraflı kaynağında kullanılan kaynak ağzları.

Referans Numarası ^a	İş parçası kalınlığı ^t	İfadesi	Sembol ^b	Görünüm	Kaynak Ağzı	Açı	Aralık ^b	Kök kalınlığı ^c	Diğer boyutlar	Önerilen yöntem	Uyarı
1.5	6 t 25	Kök bırakılmış				$\alpha \geq 50^\circ$	4 b 10	c = 3	—	131	
1.7	Plaka t 12 Boru kalınlığı t 5	U-alın kaynağı				15° β 20°	b 2	2 c 4	4 r 6 3 f 4 0 e 4	141	
	15° β 20°					b 1.5	2 c 4	4 r 6 3 f 4	131	Kök git	
1.4	4 t 10	Yarım V-alın kaynağı				β 50°	b 3	c 2	—	131 141	
	3 t 20	Yarım V-altıtlıklı Alın kaynağı				50° β 70°	b 6	c 2	—	131 141	
1.3 A	2 t 20	Kendinden altıtlıklı V-alın				20° β ≤ 40°	b 3	1 c 3	c ₁ 1	131 141	
1.3 B	6 t 40	Özel profil V-alın				10° β ≤ 20°	0 b 3	2 c 3	c ₁ 1	131 141	

Tablo 4.6.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının çift taraflı alın kaynakları için ağız hazırlaması.

Referans Numarası ^a	İş parçası kalınlığı ^t	İfadesi	Sembol ^b	Görünüm	Kaynak Ağızı	Açı ^{α, β}	Aralık ^b	Kök kalınlığı ^c	Diğer boyutlar	Önerile yöntem	Uyarılar
2.2	6 t 20	Çift taraflı küt alın kaynağı				—	4 b 10	—	—	131 141	
2.5.9	6 t 15	Kök bırakılmış çift taraflı V alın				α 50°	b 3	2 c 4	—	141 131	
2.3.3	6 t 15	X kaynağı				α 60°	b 3	c 2	—	141	
	α 70°										
2.5.5	6 t 15	Kök bırakılmış X kaynağı				α 50°	b 3	2 c	h ₁ = h ₂	141	
	50° α ≤ 70°										
2.4.9	3 t 15	Çift taraflı yarım V alın kaynağı				β 50°	b 3	c 2	—	141	
2.7.7	t 15	Çift taraflı kök bırakılmış U kaynağı				15° β ≤ 20°	b 3	2 c 4	h ₁ = 0.5(t-c)	131	

Referans Numarası ^a	İş parçası kalınlığı	İfadesi	Sembol ^b	Görünüm	Kaynak Ağzı	Açı	Aralık	Kök kalınlığı	Diğer boyutlar	Önerilen yöntem	Uyarılar
3.10 A	—	Tek taraflı köşe kaynağı			$\alpha = 90^\circ$	b	—	—	—	131 141	
3.10.10 B	—	Çift taraflı köşe kaynağı			$\alpha = 90^\circ$	b	—	—	—	141 131	
3.4 A	t_1 20	T birleştimelerde çift taraflı yarım V			$\beta = 50^\circ$	b	—	—	—	141 131	
3.4.4 B	t_1 5	Tek taraflı yarım V köşe kaynağı			$\beta = 50^\circ$	b	2	c	t_2 5	141 131	

a başlık 6'da açıklanmıştır

b Iso 2553'e gör

c Iso 4063 referanslarıyla

4.2.6. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına MIG kaynağının uygulanması

Ergiyen elektrod ile gazaltı kaynağının en yaygın olarak kullanıldığı alanlardan bir tanesi de alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağıdır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının içeriğinde bulunan başlıca alaşım elementleri; bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Daha önceden belirtildiği üzere; alüminyum alaşımları içerdikleri alaşım elementlerinin türüne göre sınıflandırıldıkları gibi, ısı işlem sonucu mukavemet özelliklerinin değiştirilip değiştirilmeyeceğine göre de, sertleştirilebilir ve sertleştirilemeyen alüminyum alaşımları olarak iki gruba ayrılırlar. MIG yöntemi her kalınlıktaki alüminyum alaşımları için uygulanabilir olmasına karşın genellikle 3 mm'den daha kalın parçaların kaynağında tercih edilen bir kaynak yöntemidir; çünkü MIG yönteminde, kaynak hızı ve ergime gücü TIG yönteminden daha büyüktür. Çok ince levhalar (0.8 mm) ancak darbeli akım yöntemi uygulanarak kaynakla birleştirilirler.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağını, çeliklerin kaynağından farklı kılan özellikler şunlardır:

- Alüminyum alaşımları 550-660°C arasındaki sıcaklık aralığında ergimelerine rağmen ısı iletkenliklerinin çok yüksek olması nedeni ile kaynak için gerekli ısı girdisi eş kalınlıktaki çeliğin kaynağından daha fazla olmak zorundadır.
- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısı genleşme katsayılarının büyük olması, kaynak bölgesinde ısınma ve soğuma sonucu oluşan sıcaklık farkları şiddetli iç gerilmeler ve büyük çaplı çarpılmaların oluşmasına neden olur.
- Alüminyum üzerinde hava ile teması sonucunda oluşan refrakter alüminyum oksit tabakası, alüminyum alaşımlarının kaynağını büyük çapta güçleştirir. Doğru akım ters kutuplama (elektrod pozitif kutupta) ile yapılan kaynakta, banyo üzerinde yüzen oksit tabakası parçalanır ve ancak bu biçim kutuplama ile kaynak gerçekleştirilebilir. Kaynaktan önce, kaynak ağızları tel fırça ile iyice temizlenerek oksit tabakası olabildiği kadar uzaklaştırılmalıdır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında, malzemenin kalınlığı gözönüne alınmaksızın genellikle sprej ark ile kaynak yapılması tercih edilir. Sprej arkın yüksek ısı girdisine karşın alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği dolayısı ile kaynak banyosu oldukça çabuk katılaştığından, her pozisyonda kaynak yapmak olanağı vardır.

Burada oksit tabakasının temizlenebilmesi için sürekli olarak sola kaynak yöntemi uygulanmalı ve dik kaynak durumunda da aşağıdan yukarıya doğru çalışılmalıdır. Bu şekilde hem kaynak ağızlarının oksit tabakası temizlenmiş olur ve hem de ağızların iyi bir şekilde ergiyerek kaynağın sağlıklı bir biçimde yapılması sağlanmış olur. Sağa kaynak yöntemi uygulandığı ve dik pozisyonlarda da yukarıdan aşağıya doğru çalışıldığı durumlarda gözenekli, kötü görünümlü ve ağızların gerektiği gibi ergimemiş olması nedeni ile de soğuk bölgeler içeren kaynak dikişleri elde edilir. Kaynak dikişi düz olarak veya dar zigzaglar ile çekilmelidir. Geniş zigzaglar kaynak dikişinin aşırı oksitlenmesine neden olduğu için kullanılmamalıdır.

El ile yapılan yarı otomatik MIG yöntemi ile mekanize durumda da ince parçaların kaynağında genellikle saf argon gazı kullanılır, kalın parçaların otomatik kaynağında ise daha sıcak bir kaynak banyosu ve daha iyi bir nüfuziyet elde etmek için Helyum veya Helyum-Argon karışımları tercih edilir.

Alüminyum alaşımlarının ısıl iletkenliğinin yüksek olması özellikle kalın parçalarda, kaynak bölgesinin şiddetli soğumasına neden olur, bu bakımdan kalın ve özellikle döküm alüminyum parçalara kaynak öncesi ön tav vermek gereklidir, genellikle 15 mm'den daha kalın parçalara uygulanan bu ön tav sıcaklığı 200°C 'yi aşmamalıdır. Dövme alüminyum alaşımlarında genel olarak ön tav yerine daha yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi ile daha yüksek ısı girdisi sağlayarak çalışma tercih edilir.

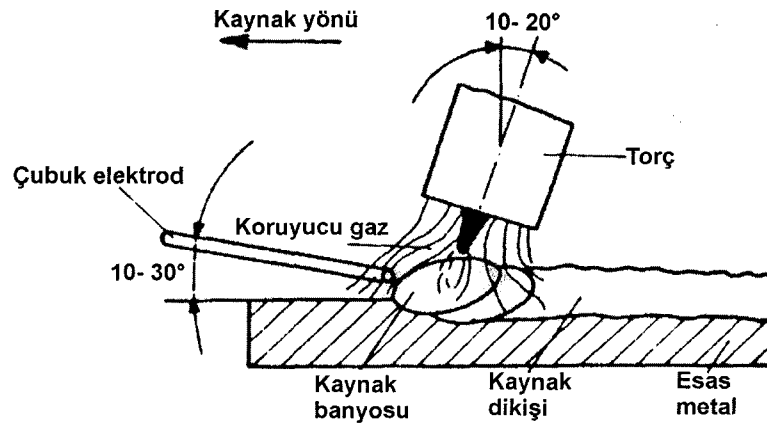
Soğuk biçim değiştirme veya ısıl işlem ile sertleştirilmiş alüminyum parçaların kaynak bölgesinde, sonradan kazanılmış olan bu sertlikte bir azalma görülür, bu bakımdan ısıl işlem ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımlarına kaynak öncesi bir çözeltiye alma tavı uygulanır ve kaynak sonrası tekrar ısıl işlem uygulanarak sertleşme sağlanır (Tülbentçi 1998).

4.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağı

4.3.1. Yöntemin tanıtımı

Tungsten Inert Gas kelimeselerinin ilk harflerinden oluşmuş TIG kelimesi ile anılan yöntem ilk olarak 1930'lu yılların ortalarında denenmiş ve ABD'de II. Dünya Savaşı sırasında özellikle alüminyum alaşımlarının ve paslanmaz çeliklerin kaynağında yoğun bir biçimde uygulanmıştır.

Bu yöntemde kaynak için gerekli olan ısı enerjisi, bir tungsten elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı tarafından sağlanmakta ve kaynak bölgesi de havanın olumsuz etkilerinden elektrod ile merkezlenmiş konumda bulunan bir nozuldan gönderilen bir koruyucu gaz (He, Ar veya He+ Ar) ile korunmaktadır (Bkz. Şekil 4.9). ABD'de doğal gazdan bol miktarda helyum elde edilebildiğinden koruyucu gaz olarak helyum kullanılmış ve bu nedenle yöntem Heliark adı ile anılmıştır. Avrupa'da helyumun bulunmayışı, yöntemin havadan ayrıştırılan argon ile uygulanmasına neden olmuş ve bu bakımdan da yöntem Argonark adı ile tanınmıştır (Kaluç 2004, Tülbentçi 1998, Tülbentçi 1985, Tülbentçi 1987).



Şekil 4.9.- TIG kaynak yönteminde ark bölgesi (Tülbentçi 1998).

TIG kaynak yöntemi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir, kaynakçı tarafından kullanılması kolaydır, prensip olarak gaz ergitme kaynağını andırır, yalnız torç biraz değişiktir, yanıcı ve yakıcı gaz yoktur, ısı enerjisi elektrik arkı tarafından

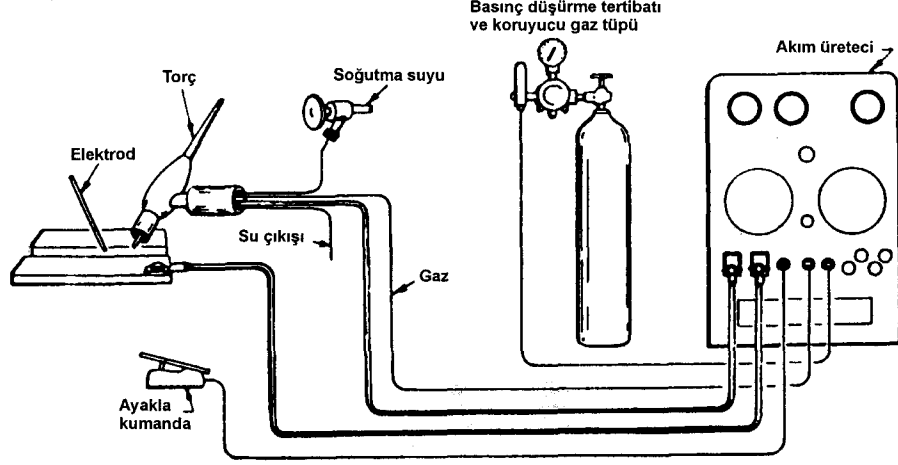
sağlanmaktadır. Bu yöntemde, ergimeyen bir elektrod kullanıldığı için kıvrık alın kaynak ağzı hazırlanmış ince parçalar, ek kaynak metaline gereksinim göstermeden birleştirilebilir; gerektiğinde esas metalin ergitilerek, ek kaynak metaline olan gereksinimi ortadan kaldırması da yöntemin göz önüne alınması gereken üstünlüklerinden bir tanesidir. Kaynak bağlantısı için ek metal gerektiğinde, aynen oksi-asetilen yönteminde olduğu gibi, bir tel çubuk biçimindeki kaynak metali kaynakçı tarafından kaynak bölgesine sokulmaktadır. TIG kaynak yönteminin diğer bilinen ve endüstride yaygın uygulanan ergitme kaynağı yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, ısı girdisinin ve ergiyen ek kaynak metali miktarının birbirlerinden bağımsız oluşudur. Bu önemli özellik, yöntemin çok ince parçalara uygulanabilmesine olanak sağlamakta, kök pasoların çekilmesinde, pozisyon kaynaklarında ve tamir işlerinde de kaynakçıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

TIG yönteminin geliştirilmesi sonucu, hafif alaşımlar için yeni kullanım alanları açılmış, korozif tozların yarattığı olumsuzlukların ortadan kalkması sonucu uçak ve gemi yapım mühendisleri bu alaşımların sunduğu her tür üstünlükten yararlanabilir duruma gelmişlerdir.

TIG kaynak yöntemi, her pozisyonda ve prensip olarak ta her kalınlıktaki parçalara uygulanabilir ise de, çok kalın parçalar için işlem süresinin uzaması yöntemin ekonomikliğini yitirmesine neden olmaktadır, bu bakımdan 7 mm' den kalın parçaların kaynağı için önerilmez; bununla birlikte yüksek kalite ve kaynak güvenliğinin gerekli olduğu uçak ve uzay endüstrisinde çok pasolu kaynak uygulayarak bu olumsuzluğun etkisi azaltılmaya çalışılır. Akım şiddeti azaltılarak diğer ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi olanaksız olan 0.1 mm kalınlığa kadar ince saclar bu yöntem ile çok sağlıklı olarak birleştirilebilmektedir.

TIG kaynak donanımı, uygun bir akım üretici, koruyucu gaz tüpü, gaz basınç ve debi ayar tertibatı, tungsten elektrodu taşıyan torç, akım kabloları ve gaz hortumu ile genelde akım üretici üzerine monte edilmiş bir kontrol panelinden oluşur; ayrıca yüksek akım şiddeti ile çalışma durumunda bir de torcu soğutmak için soğutma suyu devresi vardır. El kaynağında ise, torcun hareketi ve kaynak metali beslemesi kaynakçı tarafından yapılır; yarı otomatik yöntemde torç kaynakçı tarafından hareket

ettirilir, burada tek fark kaynak ek metalini sağlayan telin ark bölgesine otomatik olarak bir tertibat tarafından sokulması ve sürekli olarak sabit bir hızla beslenmesidir.



Şekil 4.10.- TIG kaynak donanımı prensip şeması.

Bu yöntemin ilk uygulamalarında, elektrod pozitif kutba bağlanarak kaynak yapılmış ve aşırı ısınan elektroddan tungsten damlacıklarının kaynak dikişine geçtiği görülmüş ve elektrod negatif kutba bağlanarak bu engel ortadan kaldırılmıştır; bu durumda paslanmaz çeliklerin kaynağında başarı sağlanmasına karşın, alüminyum ve magnezyum gibi refrakter bir oksit tabakası ile kaplı metallerin kaynağı problemi ile karşılaşmıştır. Alternatif akım arkının sürekliliğini sağlayan, yüksek frekans üreten generatör ve devrelerin keşfi sonucu, alternatif akım yardımı ile bu tür metal ve alaşımlarının çok kaliteli bir biçimde kaynağı gerçekleştirilmiştir (Minnick 1996, Kaluç 2004).

4.3.1.1. TIG kaynak donanımı

Bir TIG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

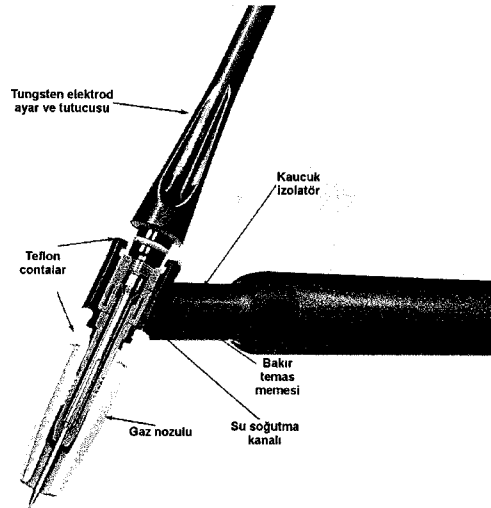
- Kaynak üfleci olarak ta adlandırılan bir kaynak torcu.
- Kaynak akım ve kumanda şalter kablosunu, gaz hortumunu ve gerektiğinde soğutma suyu giriş ve çıkış hortumlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli torç bağlantı paketi.

- Kaynak akımının, gaz akışının ve gerektiğinde soğutma suyunun devreye giriş ve çıkışını, arkın tutuşmasını ve alternatif akım ile çalışma durumunda arkın sürekliliğini sağlayan devreleri de bünyesinde toplayan kumanda dolabı.
- Kaynak akım üretici.
- Üzerinde basınç düşürme vanası ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan koruyucu gaz tüpü.

4.3.1.1.1. Kaynak torçları

TIG kaynak yönteminde torç, iş parçası ile ucundaki tungsten elektrod arasında kaynak için gerekli olan elektrik arkını oluşturabilmek için, akım kablosundan aldığı akımı elektroda iletmek, koruyucu gazı kaynak banyosunun üzerini örtecek biçimde göndermek görevlerini yerine getirmek için geliştirilmiş bir elemandır.

TIG kaynak yönteminde kullanılan torçlar, uygulama koşulları göz önünde bulundurularak çeşitli tür ve büyüklüklerde üretilmektedirler. El ile yapılan TIG kaynağında kullanılan torçlar hafif, küçük ve elektrik akımı kaçaklarına karşı etkin bir biçimde yalıtımlı olarak tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Torç ile akım üretici, gaz tüpü ve soğutma suyu bağlantıları değişik kalınlıklardaki kablolar ve hortumlarla sağlanır ve bunların tümü torç bağlantı paketi adı verilen çelik spiral takviyeli bir kalın hortum içine yerleştirilmişlerdir.



Şekil 4.11.- Bir TIG kaynak torcunun parçalar (Kaluç 2004).

Torçlar uygulamada kullanılacakları en yüksek akım şiddetine göre sınıflandırılırlar. Her büyüklükteki torca belirli sınırlar içinde kalmak koşulu ile çeşitli çap ve türlerde elektrod ve gaz nozulu takılabilir. Torçları sınıflandırmada en önemli kriter yüklenebilecekleri en yüksek akım şiddeti olduğundan ve bu konu da torcun soğutma sistemini belirlediğinden, genelde torçlar hava soğutmalı ve su soğutmalı olarak iki ana gruba ayrılırlar.

TIG kaynak torçlarına takılan gaz nozulları, torcun biçimine, türüne, kapasitesine, hava veya su soğutmalı olmasına, kullanılan gaz debisine ve kaynak yerine göre değişik çap ve türde olabileceği gibi değişik malzemelerden de üretilmiş olabilir. Günümüz endüstrisinde kullanılan gaz nozullarını, malzemeleri açısından başlıca dört gruba ayırabiliriz: (Tülbentçi 1998, Minnick 1996, Welding Handbook 1991).

- Seramik gaz nozulları,
- Metal gaz nozulları,
- Saydam gaz nozulları,
- Çift gaz akışlı gaz nozulları.

4.3.1.1.2. TIG kaynak elektrodları

TIG kaynak yöntemi ile diğer elektrik ark kaynağı yöntemleri arasındaki en önemli fark, ek kaynak metalinin elektrod tarafından sağlanmaması ve ergimeyen elektrodun yalnızca ark oluşturma görevini üstlenmiş olmasıdır; bu bakımdan burada, ergime sıcaklığı 3370°C olan tungsten, elektrod malzemesi olarak seçilmiştir. Yüksek ergime sıcaklığının yanısıra, tungsten çok kuvvetli bir elektron yayıcıdır ve yayınan elektronlar ark sütunu içinde kuvvetli bir elektron akımı oluşturur ve ark sütunundaki atomları iyonize ederek, arkın kararlılığını sağlar. Günümüz endüstrisinde ticari safliktaki tungsten (%99.5W) ile toryum, zirkonyum ve lantanyum ile alaşımlandırılmış elektrodlar kullanılmaktadır. Uygulamada karşılaşılan TIG kaynak elektrodlarını, saf tungsten elektrodlar, alaşımlı elektrodlar ve çizgili elektrodlar olmak üzere üç grup altında toplamak olanağı vardır. TIG kaynak elektrodları, AWS

A5.12 ile EN 26848'de bileşimlerine göre sınıflandırılmış ve bunları birbirlerinden kolaylıkla ayırdedebilmek için de renk kodları kullanılmıştır.

EN 26848'de TIG kaynak elektrodlarının çapları 0.5, 1.0, 1.6, (2.0), 2.4, (3.0), 3.2, 4.0, (5.0), (6.0), 6.4 ve 8.0 mm boyları ise 50, 75, 150, 175 mm olarak belirlenmiştir. AWS A5.12'de ise, elektrodların çapları 0.01, 0.02, 0.04, 1/16, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16, 1/4 inç boyları ise 3, 6, 7, 12, 18 ve 24 inç olarak saptanmıştır, 7 inçten daha uzun olanlar sadece mekanize ve otomatik kaynak yöntemlerinde kullanılırlar. Uygulamada elektrod çapı, elektrodun maksimum akım yüklenebilme kapasitesi göz önüne alınarak seçilmelidir, bu değere yaklaşıldığında arkın ısı yoğunluğu artmakta, daha kararlı bir ark ile nufuziyeti fazla, dikiş yüksekliği az bir dikiş elde edilebilmektedir.

Tablo 4.8.- Tungsten elektrodların kimyasal bileşimleri ve renk kodları.

İşareti	Malzeme No.	Oksit İçeriği %	Katışkılar %	Renk Kodu
W	2.6005	-	≤0.20	Yeşil
WT 10	2.6022	0.90...1.20 ThO ₂	≤0.20	Sarı
WT 20	2.6026	1.80...2.20 ThO ₂	≤0.20	Kırmızı
WT 30	2.6030	2.80...3.20 ThO ₂	≤0.20	Leylak
WT 40	2.6036	3.80...4.20 ThO ₂	≤0.20	Portakal
WZ 4	2.6050	0.30...0.50 ZrO ₂	≤0.20	Kahverengi
WZ 8	2.6062	0.70...0.90 ZrO ₂	≤0.20	Beyaz
WL 10	2.6010	0.90...1.20 LaO ₂	≤0.20	Siyah

Arkın oluşturduğu ısı enerjisinin üçte ikisi pozitif ve üçte biri negatif kutupta olduğundan, elektrodun doğru akımda negatif kutba bağlanması (doğru kutuplama) durumunda, aşırı ısınma oluşmadan, elektrodun pozitif kutupta (ters kutuplama) olması durumuna karşın daha fazla akım yüklemek olanağı vardır, bu duruma göre elektrod doğru akım negatif kutupta iken alternatif akımda kullanıma göre daha yüksek akım ile yüklenebilir. Benzer şekilde, kaynak edilen parçaya ön tav uygulanmış olması da elektrodun en yüksek akım yüklenebilme kapasitesini azaltır.

TIG yönteminde kullanılan elektrodların yüzeyleri taşlanarak veya kimyasal biçimde temizlenmiş olarak pazara sunulur. Taşlama sonucu elde edilen yüzey düzgünlüğü nedeni ile bu elektrodların akım yüklenebilme kapasiteleri daha yüksektir, zira elektrod tutucusu ile çok iyi temas etmeleri sonucu ara yüzey direnci azalarak temas bölgesinde oluşan sıcaklık yükselmesi daha düşük düzeyde kalmaktadır. Herhangi bir tür TIG elektrodu, yüzeyi taşlanarak veya kimyasal yöntem ile temizlenmiş olsun, sürekli olarak açık parlak bir renktedir, kullanma sonucu matlaşması, renk değiştirmesi onun oksitlendiğini gösterir, oksitlenme sonucu elektrod sarfiyatı artar, ark kararlılığını yitirir ve kaynak dikişinin kalitesi bozulur (Weman 2000, Metals Handbook 1983, Mathers 2002, Cary 2002, Kaluç 2004, The Aluminum Association 1991, Anderson 1999).

4.3.1.1.3. Koruyucu gaz donanımı

TIG kaynak yönteminde, koruyucu gaz olarak yalnızca soy gazlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde, koruyucu gaz içinde az miktarda bile aktif bir gazın varlığına izin verilemez, zira kaynak sırasında kızgın durumda bulunan tungsten elektrod bu olaydan etkilenir. Koruyucu gaz basınçlı tüplerden veya silindirik bir büyük basınçlı depodan borular yardımı ile dağıtılarak kullanım alanına gönderilir.

4.3.1.1.4. TIG yönteminde kullanılan koruyucu gazlar

TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz kullanmanın tek amacı; kaynak sırasında, kaynak banyosunu ve ergimeyen tungsten elektrodu havanın olumsuz etkilerinden korumaktır. TIG kaynak yönteminde en yaygın kullanılan koruyucu gazlar, helyum ve argon veya bunların karışımı gibi asal gazlar olup, kimyasal bakımdan nötr karakterde, kokusuz ve renksiz monoatomik gazlardır. Kaynak sırasında koruyucu gazlar kaynak bölgesine bir ısı katkısında bulunmasalar da, ısı girdisini bir dereceye kadar etkilerler. TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak kullanılan asal gazlar veya bunların karışımı kaynak sırasında kızgın durumda bulunan tungsten elektrod ve ergimiş kaynak banyosu ile bir reaksiyon oluşturmazlar, kaynak metalinin

kalitesine olumsuz bir etkide bulunmalarına karşın, kaynak hızına ve kaynaklı bağlantının kalitesine önemli etkide bulunurlar.

Argon ve helyumun kaynak karakteristiklerinin farklılığı bu gazlar ile yapılan uygulamalarda, bazı metal ve alaşımları için biri diğerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Argon satış fiyatının daha ucuz olması ve kolay bulunabilmesinin de etkisi ile TIG yönteminde en çok kullanılan gazdır (Kaluç 2004, Minnick 1996, Tülbentçi 1998, Welding Handbook 2004, Welding Handbook 1991)

Tablo 4.9.- Çeşitli metallerin TIG kaynağı için önerilen koruyucu gaz ve elektrodlar.

Metalin Türü	Kalınlığı	Akım Türü	Elektrod Türü	Koruyucu Gaz
Alüminyum	Tüm Kalınlıklar	AA	W veya WT	Ar veya Ar-He
	Kalın Parçalar	DAEN.	WT	Ar-He veya Ar
	İnce Parçalar	DAEP	WT veya WZ	Ar
Bakır ve Bakır Alaşımları	Tüm Kalınlıklar	DAEN.	WT	Ar veya Ar-He
	İnce Parçalar	AA	W veya WZ	Ar
Magnezyum Alaşımları	Tüm Kalınlıklar	A.A.	W veya WZ	Ar
	İnce Parçalar	DAEP	WZ veya WT	Ar
Nikel ve Alaşımları	Tüm Kalınlıklar	DAEN.	WT	Ar
Yalın karbonlu ve az alaşımlı çelik	Tüm kalınlıklar	DAEN.	WT	Ar veya Ar-He
	İnce parçalar	AA	W veya WZ	Ar
Paslanmaz Çelik	Tüm Kalınlıklar	DAEN.	WT	Ar veya Ar-He
	İnce Parçalar	AA	W veya WZ	Ar
Titanyum	Tüm Kalınlıklar	DAEN	WT	Ar

4.3.1.1.5. TIG kaynak yönteminde kullanılan akım üreteçleri

Tüm ark kaynak yöntemlerinde, kaliteli bir kaynak dikişi eldesi ancak kararlı bir ark ile gerçekleşebildiğinden, akım üreticinin seçimine özen göstermek gereklidir. TIG kaynak yönteminde, arkın kararlılığı, kutuplama ve akım türü diğer ark kaynak yöntemlerinden daha etkin bir biçimde kaynak dikişinin kalitesini etkilediğinden bu konuda daha büyük özen göstermek gereklidir.

TIG kaynak yöntemi için geliştirilmiş çeşitli tür ve büyüklüklerde akım üreteçleri piyasada bulunmaktadır; bunların şantiyelerde kullanılan türleri bir içten yanmalı motor ile tahrik edilirler; fabrika ve atelyelerde kullanılan türleri ise normal elektrik devresinden beslenirler. Bunların giriş gerilimi normal elektriğin geriliminde olabildiği gibi özel durumlar için değişik giriş geriliminde üretilmiş akım üreteçleri de vardır.

TIG yönteminde kullanılan kaynak akım üreteçleri, örtülü elektrod ile ark kaynağında kullanılan türdekiler gibi sabit akım, diğer bir tanım ile düşen karakteristikli akım üreteçleridir. Sabit akımlı kaynak akım üreteçleri düşen volt- amper karakteristiğine sahiptirler ve bu sayede, ark boyu değiştiği zaman akım sabit kalabilmektedir. Eğimi fazla olan bir Volt- Amper eğrisinde kaynak çalışma aralığında ark gerilimindeki değişmelere bağlı olarak akımdaki değişimler oldukça küçüktür.

TIG kaynak yönteminde, kaynak edilen malzemenin türüne göre hem alternatif akım hem de doğru akım kullanıldığından, modern akım üreteçleri her iki tür akımı da gerektiğinde sağlayabilecek türde tasarlanmışlardır. İyi bir kaynak akım üretici hem alternatif hem de doğru akım sağladığında, kaynak akımını sabit tutabilmeli ve ayrıca doğru akımda tutuşmayı, alternatif akımda ise arkın sürekliliğini sağlamak için bir yüksek frekans generatörüne sahip olmalıdır. Son yıllarda birçok uygulamada bu konuda darbeli akım da kullanılmaktadır

Günümüzde TIG kaynak yönteminde akım üretici olarak transformatör ve redresör türleri generatör ve alternatörlere göre çok daha yaygın bir kullanma alanına sahiptir. Redresörler, akımı kaynak gerilimine ayarlayan bir transformatör ve bu akımı doğrultan bir redresörden oluşmuşlardır, bu nedenle hem doğru akım hem de alternatif akım üreten bu tür üreteçler ile her tür metal ve alaşımın kaynağını yapmak olanağı olabilmektedir. Cihaz üzerindeki bir şalter yardımı ile kaynak akımı ister transformatör çıkışından, istenirse redresör çıkışından alınabilir; redresör çıkışından akım çekme halinde, bir başka şalter yardımı ile düz kutuplama (torç negatif kutupta) veya ters kutuplama (torç pozitif kutupta) bağlantılarından bir tanesi seçilebilir; bu seçimi kaynakçı, kaynak edeceği metal ve alaşımın türüne göre belirler.

Günümüzde gelişmiş TIG kaynak redresörleri bir de darbeli akım üretecek biçimde tasarlanmışlardır. Darbeli akım doğru akımın şiddetinin iki sınır değer arasında öngörülen frekansta değişmesidir. Bu şekilde akımın üst sınır değerinin nufuziyeti elde edilebilmekte ve aynı zamanda ortalama akım şiddetinin ısı girdisi parçaya uygulanmaktadır, bu bakımdan daha çok DAEN ile çalışmada tercih edilen darbeli akım, pozisyon kaynaklarında çok iyi sonuçlar vermektedir.

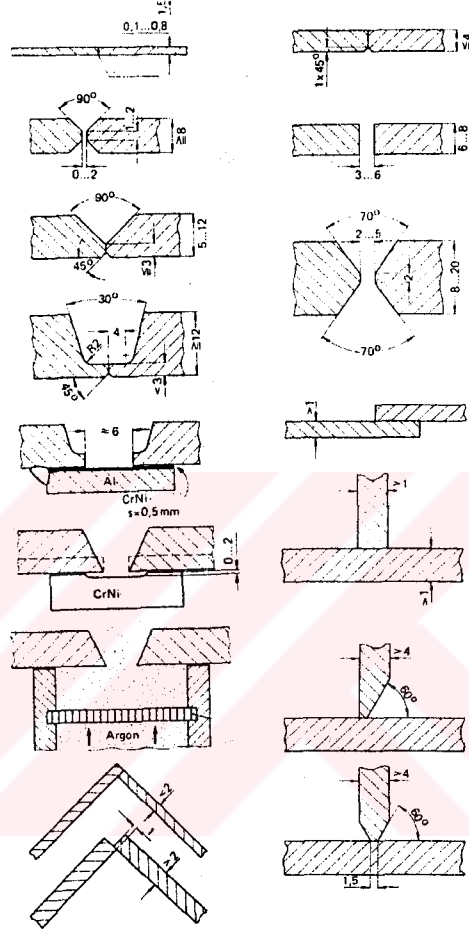
Son yıllarda, daha önceki bölümlerde bahsedilmiş olan inverterler TIG kaynak yönteminde yaygın bir uygulama alanı bulmuştur; bu akım üreteçleri daha hafif oldukları gibi daha kararlı bir ark oluşturduklarından pek çok kullanıcı tarafından tercih edilmektedirler (Welding Handbook 2004, Welding Handbook 1991, Metals Handbook 1983, Kaluç 2004, Tülbentçi 1998).

4.3.1.2. TIG kaynak yönteminde kaynak ağızlarının hazırlanması

TIG kaynak yöntemi, bir ergitme kaynak yöntemi olduğundan, kaynak işlemi öncesi, kesinlikle bir kaynak ağızı hazırlamak gereklidir. TIG kaynak yönteminde uygulanan kaynak ağızları diğer ergitme kaynak yöntemleri için hazırlanan ağızlardan biçim olarak farklılık göstermese de boyut olarak bazı farklılıklar gösterir. TIG kaynağında uygulanan kaynak ağızları EN 9692-3'de verilmiş olup Tablo 4.5, 4.6 ve 4.7'de verilmiş olan ağızlar ile aynıdır.

Bu yöntemde, kaynak metali uygulanan akımın şiddetine bağlı olmayıp dışarıdan ark bölgesine sokulduğu için daha çok kıvrık alın, köşe kıvrık alın, üçlü alın ve küt alın birleştirmeler olanaklı olan her yerde tercih edilerek bağlantı ek kaynak metali kullanmadan gerçekleştirilir. I- alın birleştirmede kaynak tek taraftan, olabildiği ölçüde az kök aralığı bırakılarak çelik malzeme halinde 3- 4 mm, alüminyum halinde 5 mm kalınlıklara kadar uygulanır. İki taraftan uygulanan I- alın birleştirmede kalınlık 8 mm'ye kadar çıkabilir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları gibi ısı iletim katsayıları yüksek malzemelerde, I- alın kaynak ağızı ile birleştirmeler, dik pozisyonda iki taraftan aynı anda kaynak uygulanarak gerçekleştirilir ve bu şekilde ısı yoğunluğu artırıldığı için daha az çarpılma ile karşılaşılır.

8 mm ve daha kalın parçaların tek taraftan birleştirilmesinde V- alın kaynak ağızı tercih edilir, yalnız burada kök alın yüksekliği diğer ergitme kaynak yöntemlerine göre daha yüksek alınır. Alüminyumda kök alın yüksekliği 0- 3 mm, ağız açısı 70° olarak seçilir.



Şekil 4.12.- Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının TIG kaynağı için kullanılan bazı kaynak ağızı biçimleri (Tülbentçi 1987).

Kalın parçalarda U- kaynak ağızı TIG kaynak yönteminde uygulanır; yalnız TIG yöntemi kalın parçaların kaynağı için ekonomik olmadığından bu tür parçalarda kök pası TIG ile dolgu pasoları diğer uygun bir ark kaynağı yöntemi ile yapılır.

Kaynak ağızlarının hazırlanmasında, alüminyum ve alüminyum alaşımları için plazma arkı ile kesme kullanılabilir. Alın birleştirilmesi durumunda, ince parçalar mekanik olarak giyotin ile de kesilebilir. Gerektiğinde kaynak ağızları takım tezgahları veya taşlama yardımıyla hazırlanabilir, yalnız alüminyum ve alüminyum alaşımları durumunda bağlayıcısı polimer esaslı malzeme olan taşlar kullanıldığında

kaynak dikişinde gözenek görülür. TIG kaynak yönteminde kaynak ağızlarının kirlenmemesine ve kaynak öncesi temiz olmasına özel bir dikkat gösterilmelidir (Tülbentçi 1998, Kaluç 2004, Minnick 1996, Cary 2002, Mathers 2002).

4.3.1.3. TIG kaynak yöntemi için kaynak dolgu metali (tel elektrodlar)

TIG kaynak yönteminde gerekli olan kaynak dolgu metali, el ile yapılan kaynakta tel çubuk olarak kaynakçı tarafından otomatik tel besleyici sistemlerde ise tel olarak sistemin tel sürme tertibatı tarafından kaynak bölgesine sokulur. Burada, kaynak metalinin ark tarafından taşınımı söz konusu değildir ve ark soy bir gaz atmosferi altında oluşturulmuştur. Bu bakımdan, özellikle alaşım ve dezoksidasyon elementlerinin büyük çapta yanması gibi bir olay söz konusu değildir, kayıplar gözönüne alınamayacak derecede azdır. Her tür metal ve alaşımın kaynağına uygulanabilen TIG yöntemi için her tür metal ve alaşım için çok geniş bir spektrumu kapsayan kaynak telleri üretilmiştir. Bunlar bileşim olarak, MIG kaynak yönteminin de uygulanabildiği metal ve alaşımlar ile aynı bileşimdedirler ve EN ISO 18273 ve AWS A 5.10' a göre standardlaştırılmışlardır. Tablo 4.3 ve 4.4'de verilmiş olanlarla aynıdır (Tülbentçi 1998, Cary 2002, Welding Handbook 1991, Metals Handbook 1983).

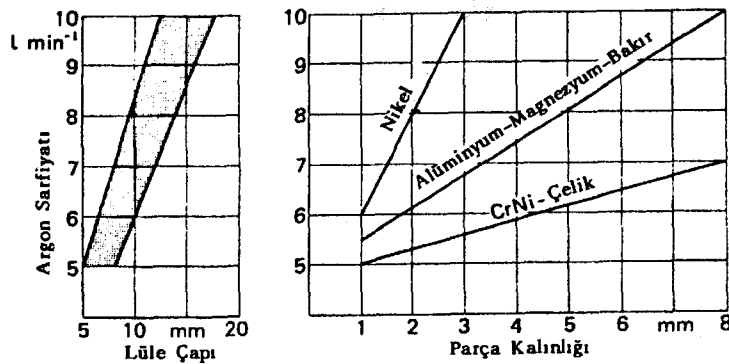
4.3.1.4. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına TIG kaynağının uygulanması

Yüksek kaliteli birleştirmelerin elde edilebilmesi için kaynaktan önce gerek kaynak ağzının gerekse kaynak çubuğunun iyi bir şekilde temizlenmesi gereklidir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları sürekli olarak bir oksit tabakası ile kaplı olduklarından, temizleme bir solvent ile yapıldığı zaman kesinlikle, bir paslanmaz çelik tel fırça ile fırçalanarak oksit tabakası giderilmelidir (Welding Handbook 2004).

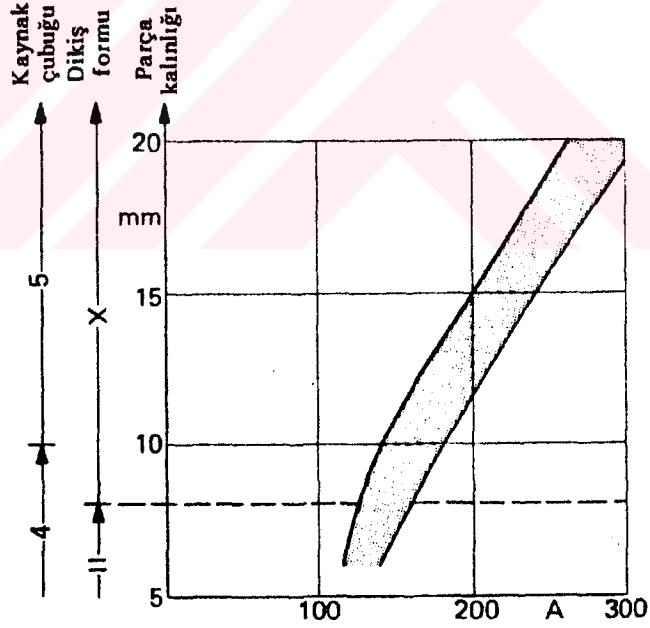
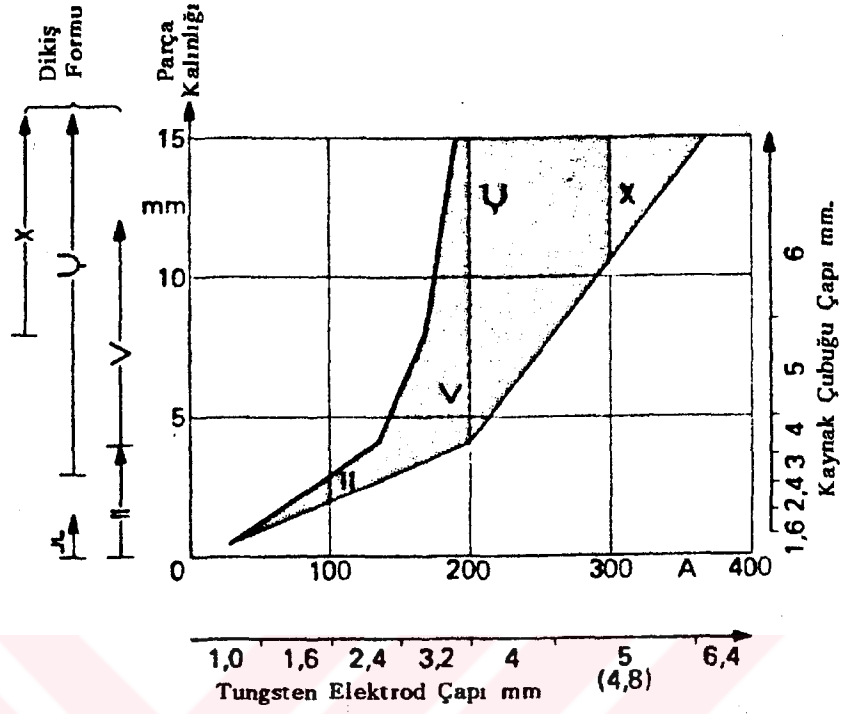
Kaynak akımının, küçük parçalar durumunda kaynak masasından iş parçasına geçişinin iyi bir şekilde olmasına gereken özen gösterilmelidir; büyük parçalar doğrudan topraklandıklarından bu konuda bir sorun çıkartmazlar. Parçalar gerek akımın iyi iletilebilmesi gerekse kaynak sırasında pozisyonlarını değiştirmemeleri için, kaynak işleminden önce özenli bir şekilde puntalanmalı veya uygun bağlama

tertibatlarıyla ile bir arada tutulmalıdır.

Kaynağa başlamadan önce, parça kalınlığına uygun elektrod çubuğu seçilmeli ve parça kalınlığı, kaynak pozisyonu göz önünde bulundurularak, gaz memesi, tungsten elektrod çapı saptanmalı ve akım şiddeti ve gaz debisi ayarları yapılmalıdır. Kaynağa başlarken elektrod parçaya yaklaştırılır ve yüksek frekans cihazının oluşturduğu kıvılcımlar arkın tutuşmasını sağlar. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında, arkın tutuşturulmasında ve kaynak esnasında, elektrodun parça ile temasına izin verilmez, aksi durumda hem kaynak yeri alaşımlanır hem de elektrod kirlenir. TIG kaynak yönteminde, kaynak torcu parçaya yaklaşık olarak 70-75° lik bir açı ile tutulur ve kural olarak sağdan sola doğru kaynak yapılır. Kaynak hızı parçanın kalınlığına, akım şiddetine ve malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişir; uygulanan kaynak hızı iyi bir kök nüfuziyeti sağlayacak kadar yavaş olmalıdır. Kaynak süresince, torç ve telin hareketi, aynen oksitli kaynağında olduğu gibidir. Kaynak teli ark bölgesine girmeden evvel banyo üzerinde hafif hareketler yapar, çalışmaya başlarken ark önce tutuşturulur ve boyu olabildiğince kısa tutulur, kaynak ağzı ergimeye başlayınca kaynak çubuğu ark bölgesine sokulur. TIG kaynak yöntemi ile yatay, dik, tavan pozisyonlarında kaynak yapılabilir. İnce parçaların kaynak edilmesinde kıvrık alın kaynak ağzı kullanıldığında ek kaynak metaline gerek yoktur. 6 mm' den daha kalın parçaların birleştirilmesinde çok pasolu kaynak daha ekonomik olmaktadır; bu gibi durumlarda ilk paso düşük, sonraki pasolar daha yüksek akım şiddeti ile çekilir (Mathers 2002, Cary 2002, Minnick 1996, The Aluminum Association 1991, Kaluç 2004).



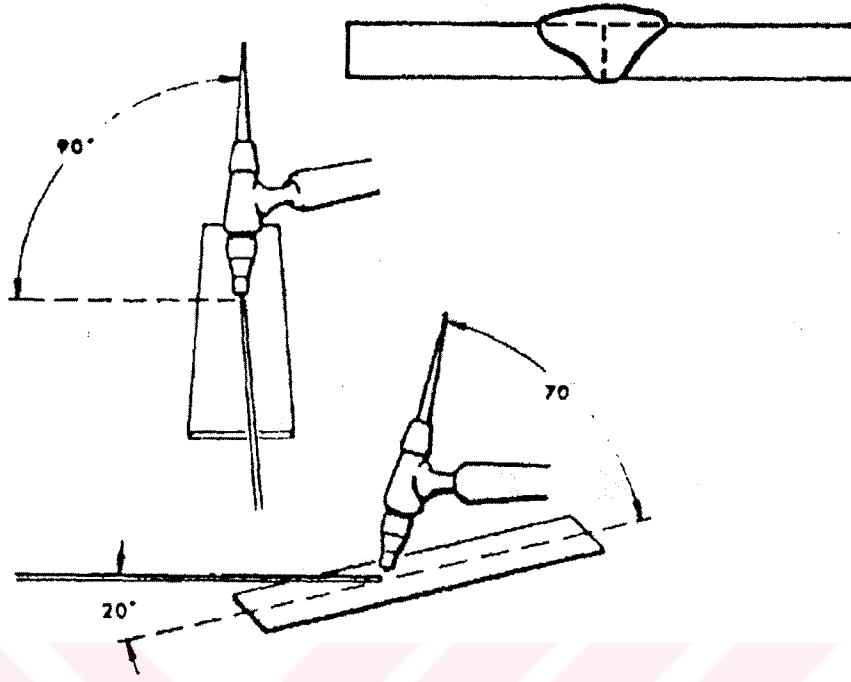
Şekil 4.13.- TIG kaynağında parça kalınlığı ve argon sarfiyatı arasındaki ilişki.



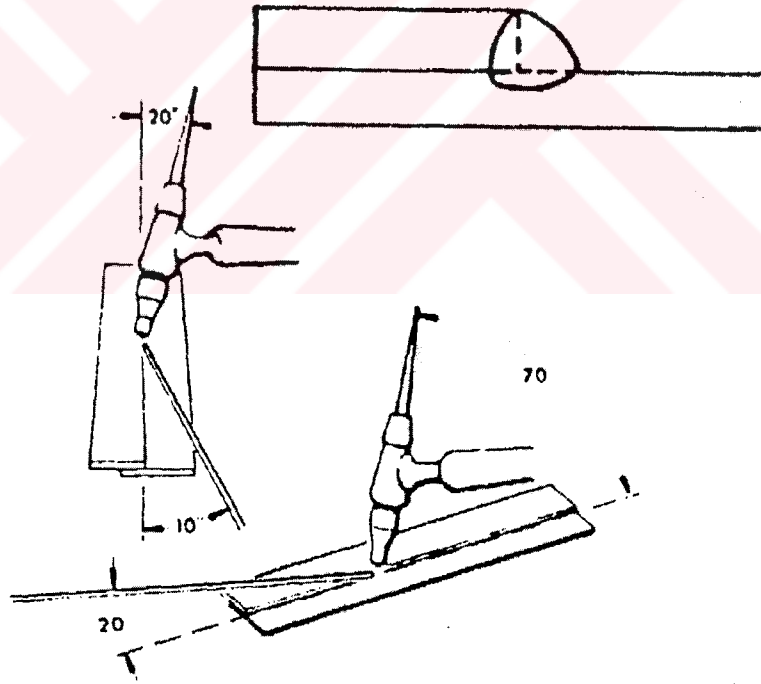
Şekil 4.14.- Al ve alaşımlarının TIG kaynağı için gerekli veriler.

Üstte: Tek taraftan kaynak

Altta: Çift taraftan kaynak



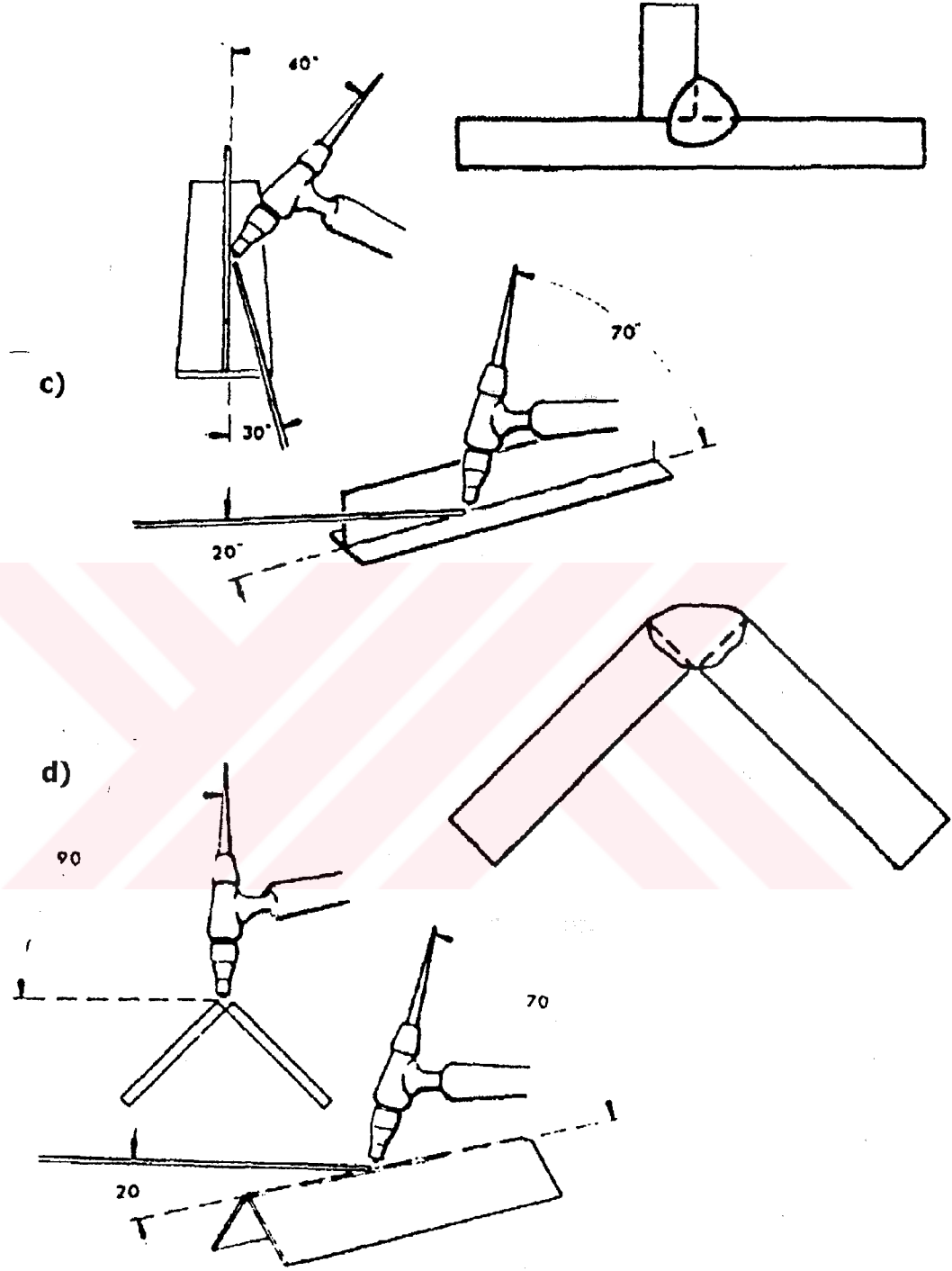
a)



b)

Şekil 4.15.- TIG kaynağında kaynak dikiş biçimine göre torcun pozisyonu.

a) Alın kaynağı b) Bindirme kaynağı.



Şekil 4.16.- TIG kaynağında kaynak dikiş biçimine göre torcun pozisyonu.
c) İç köşe kaynağı d) Dış köşe kaynağı.

4.4. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynağı

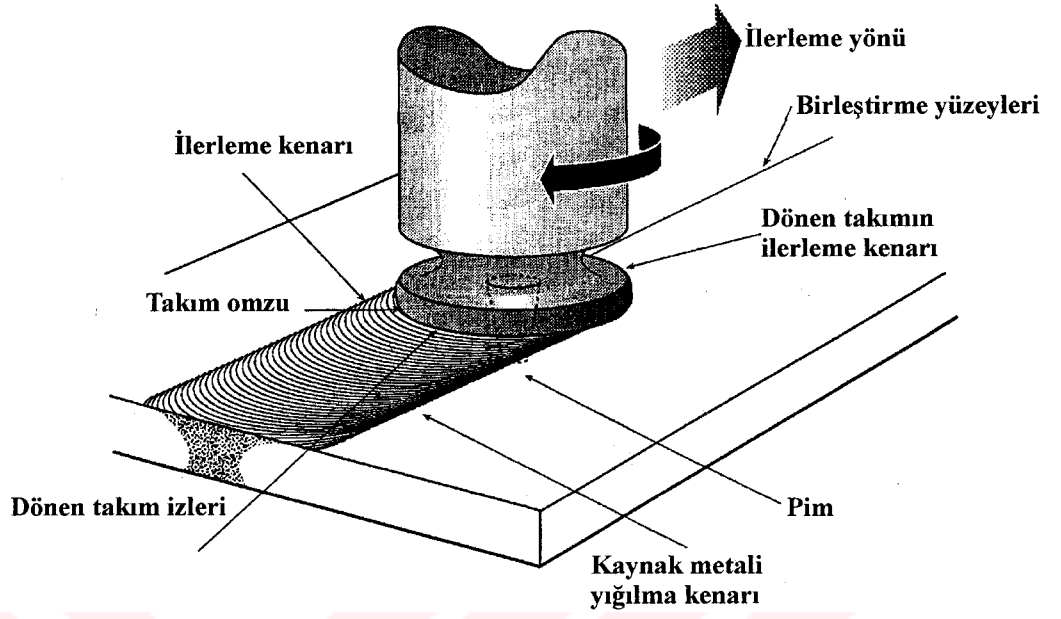
4.4.1. Yöntemin tanıtımı

Bu kaynak yöntemi, Anglo- Sakson literatüründe Friction Stir Welding Process (FSW), Türkçe literatürde ise Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak Yöntemi ya da Sürtünme Karıştırma Kaynağı olarak tanımlanan bir katı faz kaynak yöntemidir.

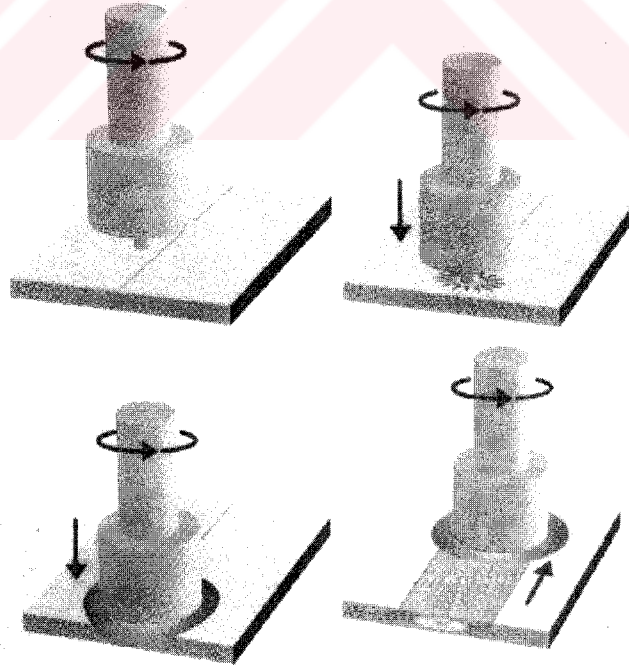
Yöntem, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsünde (TWI) bulunmuş, patenti alınmış ve halen gelişme süreci devam eden bir ileri kaynak yöntemi konumundadır; yöntem öncelikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının dövme ve döküm türlerinin birleştirilmesinde kullanılmış ve elde edilen başarılı sonuçlara bağlı olarak bakır ve bakır alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları, magnezyum ve magnezyum alaşımları gibi metallerin kaynağında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde karbonlu az alaşımlı çeliklerin ve bazı tür paslanmaz çeliklerin hatta karbonlu az alaşımlı çelik ile paslanmaz çelik farklı metal kaynağında da kullanılabilir duruma gelmiştir (Reynolds ve diğ. 2003, Park ve diğ. 2004, Lienert ve diğ. 2003, Eriksson ve Larsson 2002, Thomas ve diğ. 1999, Kaluç ve Bozduman 1998).

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminin diğer ergitme esaslı kaynak yöntemlerinden en büyük farkı; kaynak edilen parçaların ağızlarının kaynak sırasında ergimemeleri, yani katı fazda bulunmalarıdır.

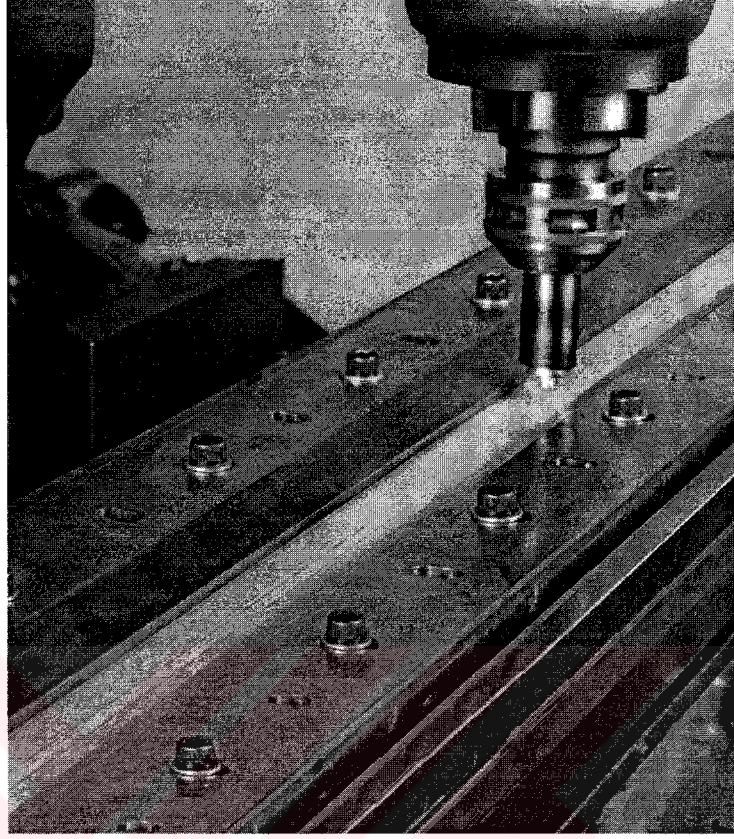
Şekil 4.17' de prensip şeması ve Şekil 4.18'de uygulama sırasında görünüşü verilen yöntemde, ucunda küçük bir pim olan dairesel kesitli dönen bir takım kullanılır ve kaynak işlemine başlamadan önce kaynak edilecek parçaların düz bir tabla üzerine sıkıca bağlanması ön koşuldur. Bu amaçla oldukça kuvvetli bağlama elemanları kullanılmalıdır (Dawes ve Thomas 1995).



Şekil 4.17.- Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminin (FSW) prensibi (Thomas ve Nicholas 1997).



Şekil 4.18.- Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminde işlem sırası (Mahoney 1997).



Şekil 4.19.- Sürtünen eleman ile birleştirme yönteminin gerçekleştirilmesi (ESAB SuperStir 1996).

Dönen takım, yavaş yavaş iki parçanın birbirine ağızlanmış kısmına daldırılır ve kaynak edilmek istenen uzunluk boyunca belirli bir hızla ilerletilir. Burada ilerleme, tabla tarafından da parçaya uygulanabilir. Takım ucundaki pim uzunluğu istenen kaynak nüfuziyetine eşdeğer olup dönen pim kaynak edilecek yüzeye temas ettiğinde, sürtünmeden dolayı temas noktasında ısı hızla yükselir ve böylece, ısınan malzemelerin mekanik şekil değiştirme kabiliyeti artar. Dönen pim çevresinde ve takımın parça yüzeylerine sürtünen tabanında oluşan ısı, bölgenin plastik şekil değişimini sağlar, şekil değiştiren kütle pimin dönme hareketinden etkilenerek pimin önünden arkasına doğru itilir, dolayısı ile iki parça malzemesi birbirine karışarak birleşmiş olur. Takım diğer uçtan çıktığında kaynak işlemi sona erer. Bu olayların tümü, alaşımın ergime noktasından düşük sıcaklıklarda oluşur.

Sürtünen elemanla birleştirme kaynak yöntemi ile birçok türde malzeme ve aynı ve farklı malzeme kombinasyonları oluşturularak kaynak edilebilir. Özellikle 2xxx,

5xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serisi alüminyum dövme alaşımları bu yöntemle birleştirilebilir. Son araştırmalarda döküm alüminyum alaşımlar birbirleri ile ve de döküm alaşımlar ile ekstrüde edilmiş alaşımların kaynağı başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir (Dawes ve Thomas 1996, Knipstrom ve Pekkari 1997).

4.4.1.1. Yöntemin üstünlükleri ve sınırlamaları

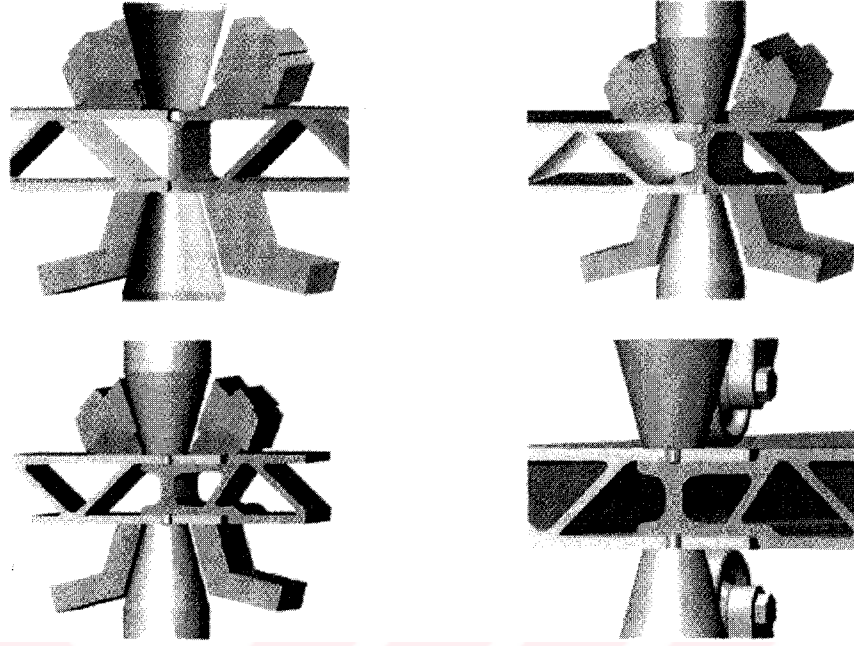
- Koruyucu gaz ve ek metale gerek yoktur.
- Hassas kaynak ağız hazırlığına gerek yoktur.
- Farklı metal kaynağına yatkındır.
- Takım tasarımı kolaydır.
- Kaynak ağızlarında bulunan oksit kaynak kalitesini etkilemeyecek biçimde ortadan kaldırılabilme özeliğine sahiptir.
- Yöntem tamamen mekaniktir ve çok az bakım gerektiren basit bir takım tezgahı ile gerçekleştirilebilir.
- Kaynak parametreleri takım tezgahının ayarları olan; ana mil devri (takım devri), takım veya tabla ilerleme hızı ve takım basma kuvveti gibi ayarlardır; bunlar rahatlıkla kontrol edilebilir, bilgisayar kontrollü duruma getirilebilir ve otomatize edilebilir.
- Yüksek kaynak dikiş kalitesine sahiptir ve sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir. Kaynak sonrasında dikiş taşkınlıklarını temizleme gibi işçilik giderleri olan işlemlere gerek duyulmaz.
- 1.6 mm'den 15 mm'ye kadar malzeme kalınlıklarında tek pasolu kaynak yapılabilir.
- 15- 50 mm kalınlıkları arasındaki parçalar her iki taraftan kaynak edilebilir.
- Yöntem için geliştirilen özelliklerden biri; bağlantının her iki taraftan eş zamanlı olarak kaynak yapılabilmesi olmuştur; bu sayede altlık gereksinimi ortadan kalkmakta ve içi boş kalın profillerin kaynağı da kolaylaşmaktadır.
- Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme tehlikesi yoktur.
- Işıksız, dumansız ve ozon oluşumu olmadan, çevreye zararsız bir yöntemdir.
- Alüminyumun ergime sıcaklığına hiçbir zaman ulaşamadığı için gözenek ve çatlak riski azdır.

- Ergime noktası aşılmadığından alaşım elemanı yanması yoluyla eleman kaybı oluşmaz.
- İş görenin çok fazla ustalığına gerek yoktur.
- Kaynak işlemi, tüm pozisyonlarda tek veya çift taraftan yapılabilir. Verim yüksektir.
- Ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmede çatlama hassasiyeti yüksek olan alüminyum ve diğer metal alaşımlarına rahatlıkla uygulanabilir.
- Yüksek bağlantı mukavemetleri ısıtılma işlemi gerek duyulmadan elde edilebildiği gibi kaynak sonrası ısıtılma işlemi yapılarak malzeme mukavemeti yükseltilebilir.
- Yöntem, katı faz kaynak yöntemi olduğundan kaynak bölgesinde bağlantı mukavemetini büyük ölçüde değiştirecek metalurjik dönüşümler oluşmaz.
- Ekstrüzyon ürünü veya döküm olan çoğu parçalar bu yöntemle kaynaklanabilir.

Ancak yöntemin bazı sınırlamaları vardır; bazı alaşımların tek pasolu kaynağında kaynak hızı, diğer mekanize ark kaynağı yöntemlerinden daha yavaştır. Parçaların rijit olarak çok iyi bir biçimde bağlanmaları gereklidir.

Başlama ve bitiş plakaları kullanılmayan kaynak işlemlerinde başlangıçta oluşan dikiş kalitesi ile kaynak işleminin bitiminde pimin yukarı çıkması ile oluşan anahtar deliği mutlaka yeniden tamir gerektirir. İş parçaları tablaya bağlandığı için ekipmanların taşınması zordur. Yalnızca doğrusal ve uzun dikişler halinde ekonomik olup, dairesel hareketler yapmak olanağı yoktur. %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılmalıdır (Messler 2004, Mathers 2002, Reitz 2002, Eriksson ve Larsson 2002, Eriksson ve Larsson 2001, Dawes ve Thomas 1996).

Yukarıdaki bu sınırlamalardan; kaynak dikişi sonunda takımın çıkışında oluşan anahtar deliği, günümüzde geliştirilen hidrolik olarak geri çekilebilen takımlar ile ortadan kaldırılmıştır (www.msfc.nasa.gov).

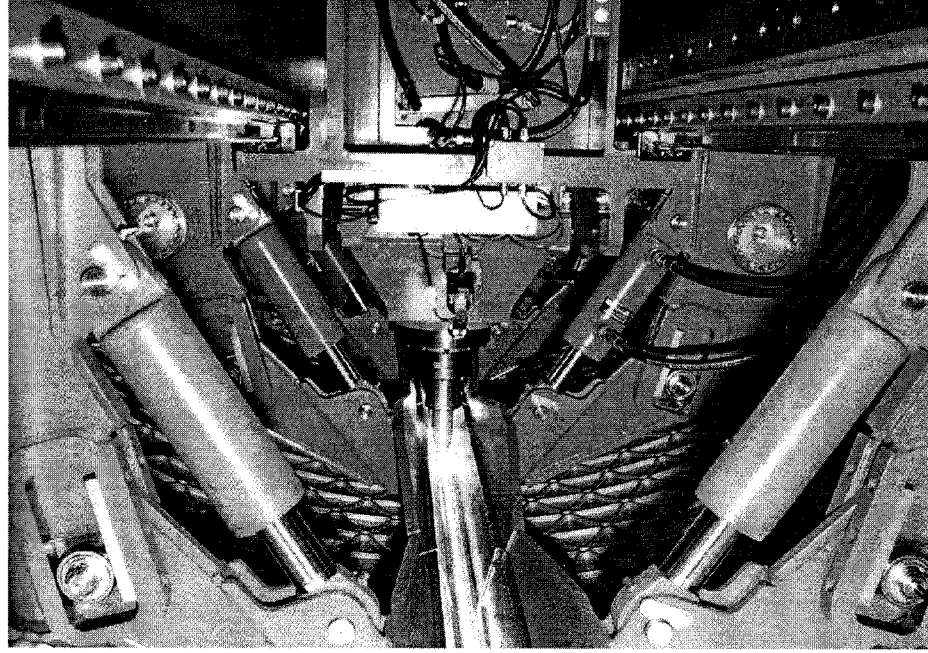


Şekil 4.20.-FSW yöntemi kullanılarak kaynak edilebilecek tasarım örnekleri
(Lahti 2003).

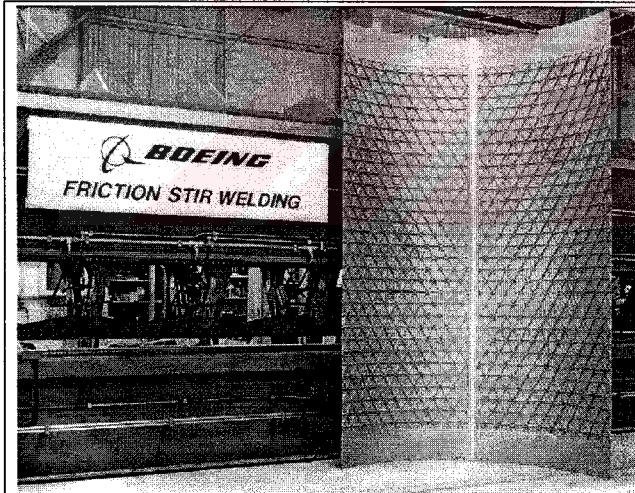
4.4.1.2. Yöntemin uygulama alanları

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi, bulunmasını takiben, ilk olarak endüstriyel anlamda İsveç ve Norveç gemi yapım endüstrilerinde kullanılan 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, daha sonra da Avustralya, İsveç ve Norveç otomotiv endüstrisilerinde kullanılmıştır, burada da kullanılan alaşımlar 6xxx serisi alüminyum alaşımları olmuştur.

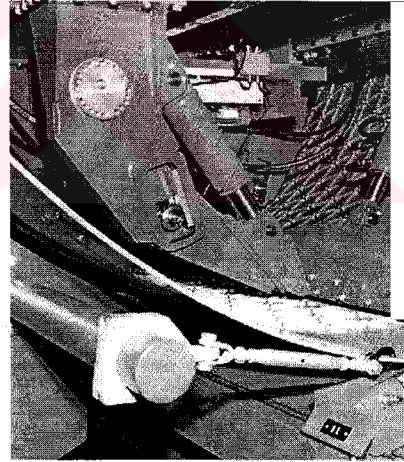
Yöntem daha sonra, havacılık ve uzay teknolojilerinde Amerika'da Boeing tarafından üretilen Delta II ve Delta III roketlerinin kaynağında kullanılmıştır. (Şekil 4.21 ve 4.22) 2500 mm çapındaki yakıt tanklarının çevresel kaynak dikişleri FSW yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.21.- Boeing yapımında FSW yönteminin kullanımı (Johnsen 1999).



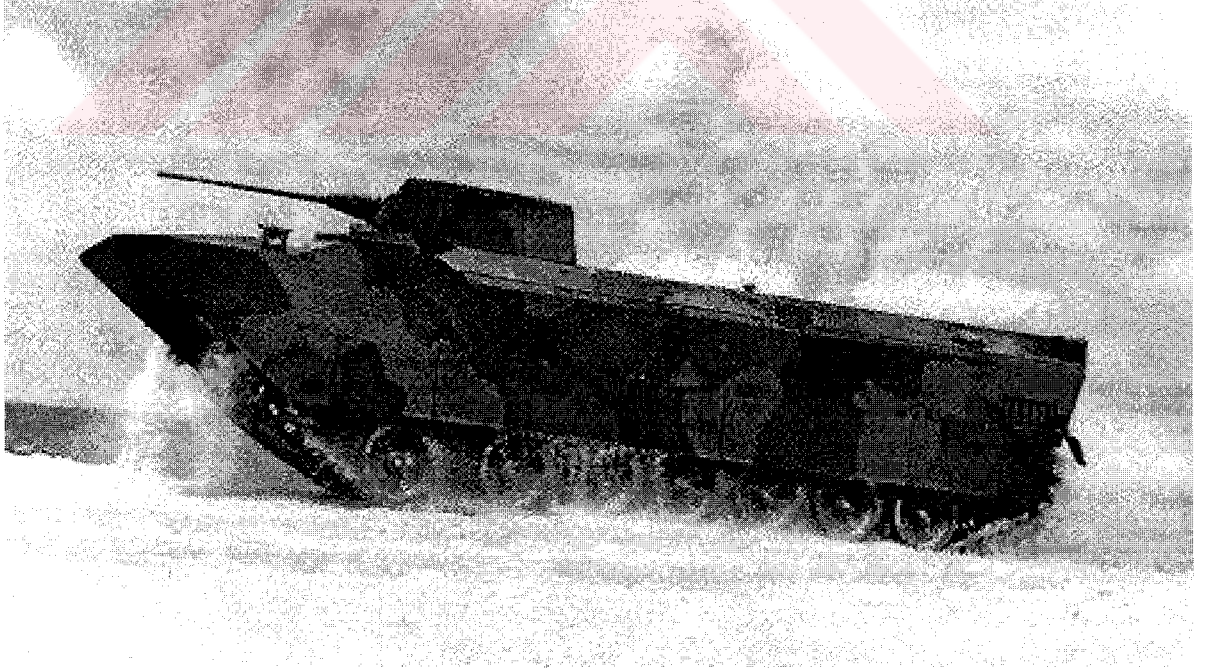
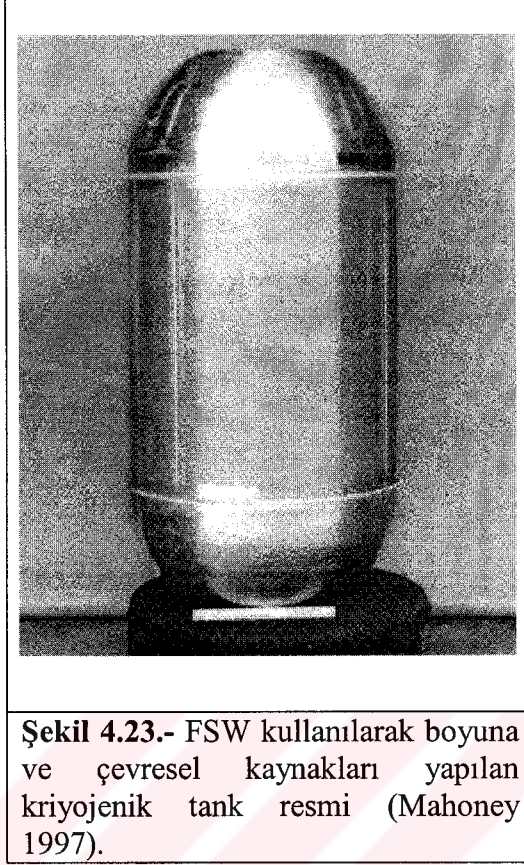
a) Boeing'de tasarlanan ilk tam boyut tankın bir kısmı (Johnsen 1999).



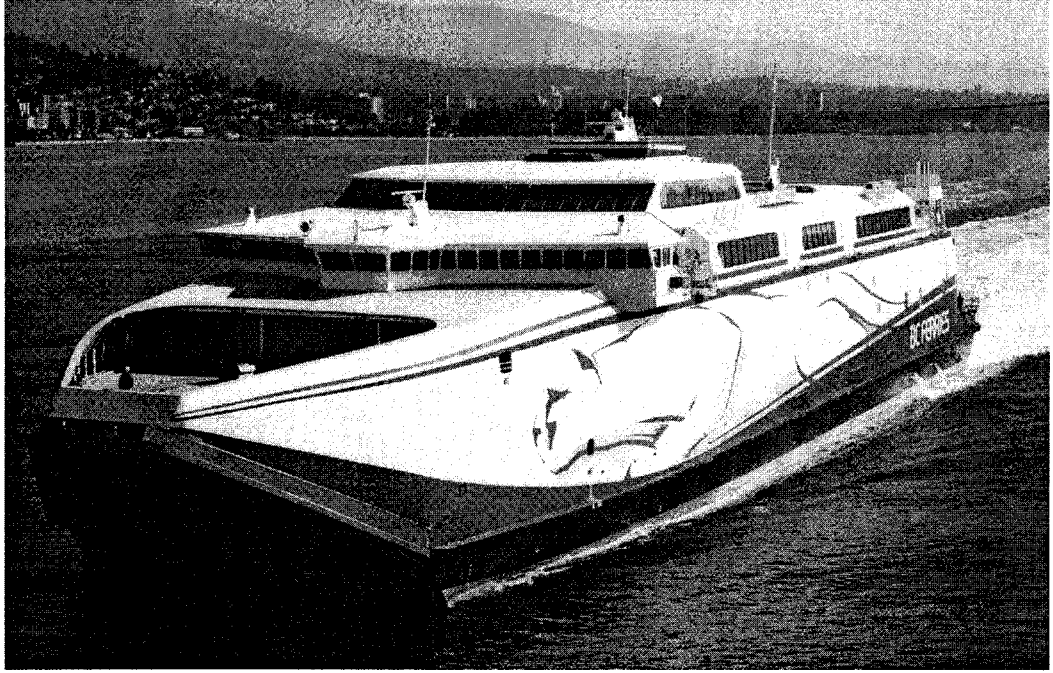
b) Delta II, III'ün FSW kaynaklarının iç kısımdan yatay pozisyonda yapılması (Johnsen 1999).

Şekil 4.22.- Boeing'de FSW yönteminin kullanılması.

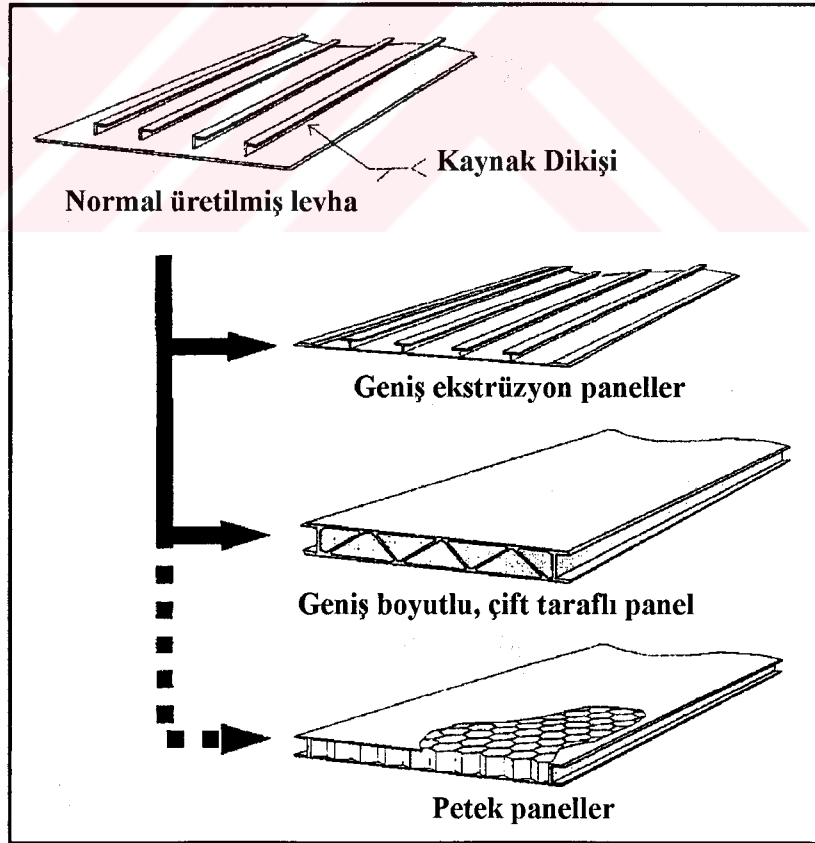
Ticari ve askeri uçak endüstrilerinde konstrüksiyonu oluşturan birçok kısımda ve hızlı feribotların hemen hemen tüm yapı elemanlarının üretiminde kullanılmaktadır. (Şekil 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25) (Reitz 2002).




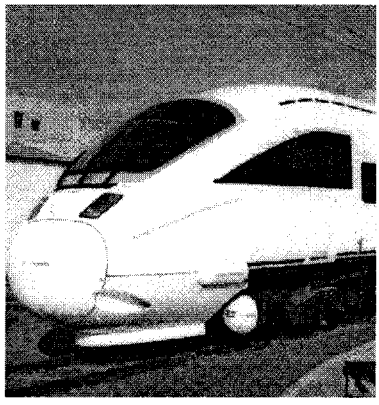
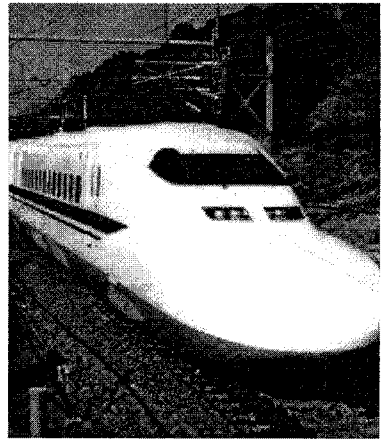
Şekil 4.24.- Bir zırhlı taşıt resmi (www.gdls.com).



Şekil 4.25.- FSW yöntemi kullanılan yüksek hızlı katamaran türü deniz taşıtı.

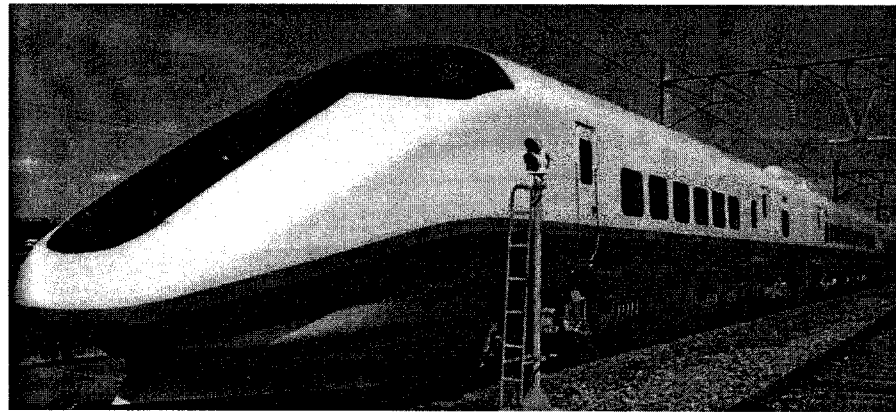


Şekil 4.26.- Yüksek hızlı tren gövdelerinde kullanılan alüminyum alaşımı geniş ekstrüzyon paneller (Yamada ve Masubuchi 2000).

		
<p>Şekil 4.27.- Hitachi tarafından yapılan, tek taraftan tüm uzunluk boyunca FSW kaynağı yapılmış olan bir tren (Kallee ve diğ. 2002).</p>	<p>Şekil 4.28.- Hitachi tarafından yapılan, çift taraftan tüm uzunluk boyunca FSW kaynağı yapılmış olan bir hızlı tren (Kallee ve diğ. 2002, Yamada ve Masubuchi 2000).</p>	<p>Şekil 4.29.-Japonya’da taban panellerinin kaynağının FSW yöntemi ile Sumitomo hafif metal firmasında yapılan Shinkansen tipi 700 standard yüksek hızlı bir tren (Kallee ve diğ. 2002, Yamada ve Masubuchi 2000).</p>

Raylı taşıt yapımında, özellikle Japonya’da yüksek hızlı trenlerin sandviç panellerinin kaynağında (Şekil 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30), otomotiv endüstrisinde alüminyumdan yapılmış parçaların ve özellikle tekerlek jantlarının yapımında, gemi endüstrisinde yüksek hızlı katamaran yapımında kullanılmaktadır (Swint 2000).

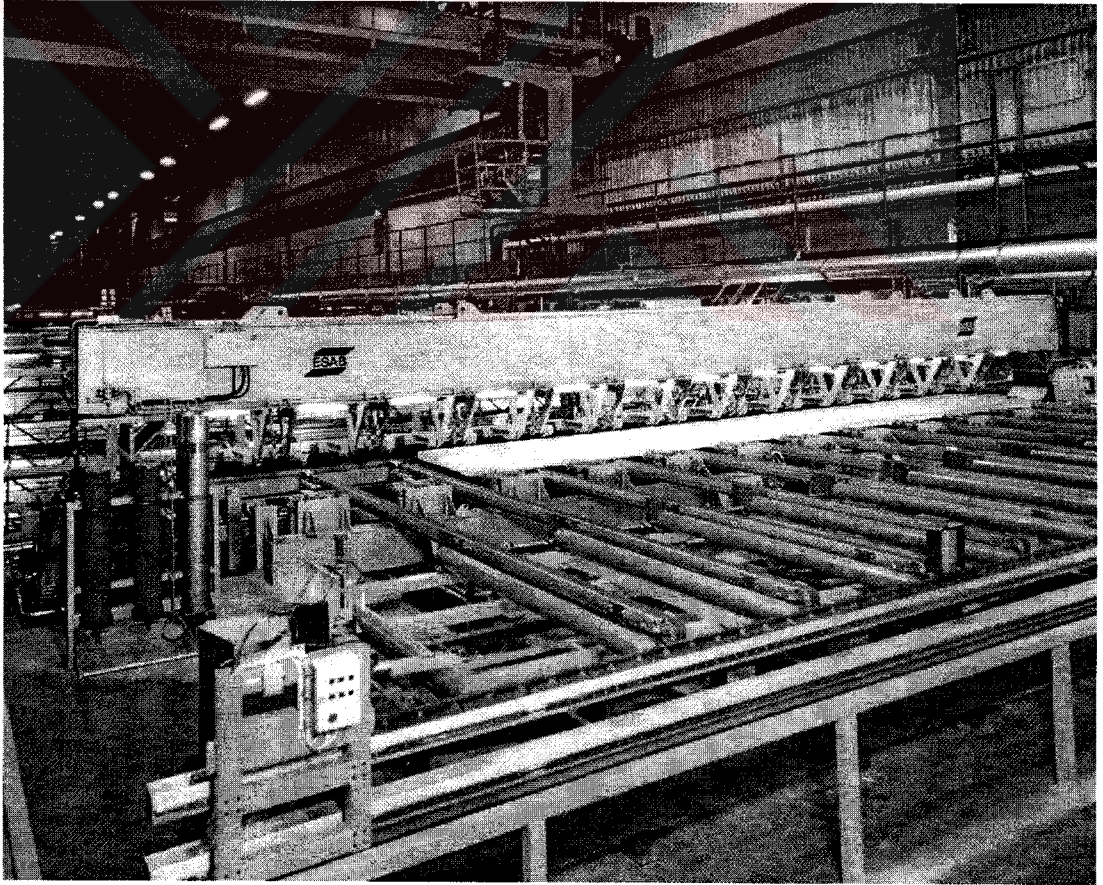
Petrol platformlarının alüminyum konstrüksiyondan yapılan bölümlerinde, helikopter iniş ve kalkış pistlerinde, ağır H kirişlerinin üretiminde de yine bu yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 4.30.- Saatte 170 mil hız yapabilen E3 türü yüksek hızlı tren (Yamada ve Masubuchi 2000).

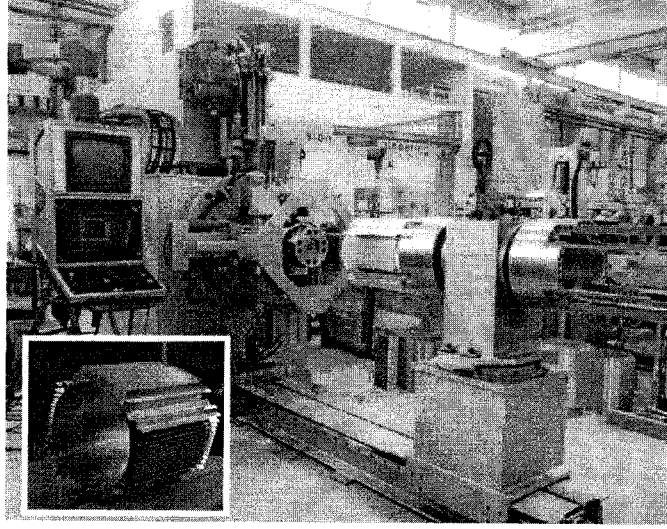


Şekil 4.31.- Norveç'te Hydro Marine Aluminium'da 6 yıldır kullanımda olan ilk FSW üretim platformu (Eriksson ve Larsson 2001).

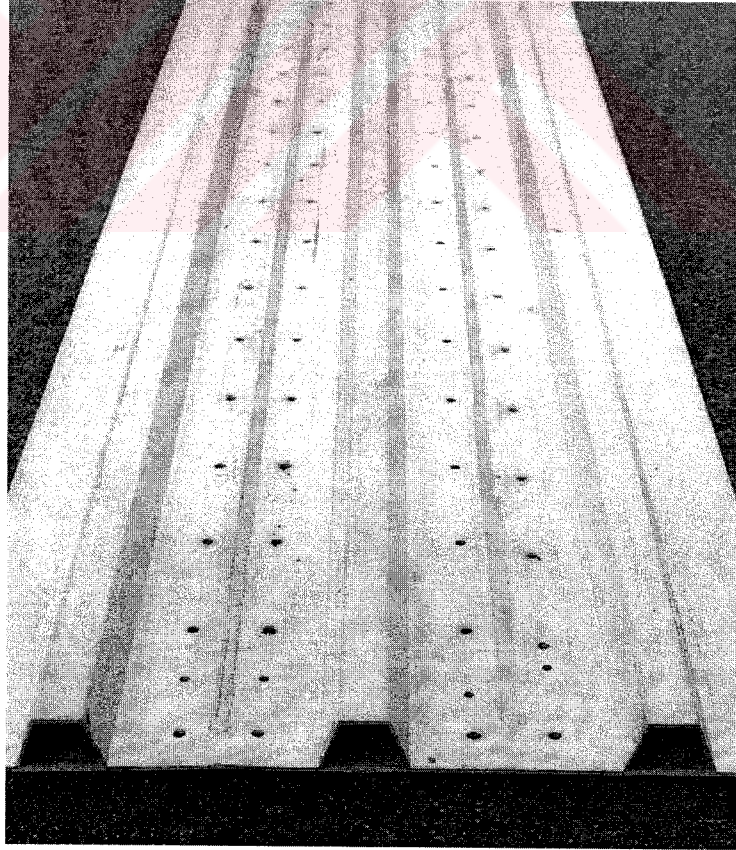


Şekil 4.32.- İsveç, Sapa'da bulunan FSW kaynak hattı (Eriksson ve Larsson 2001).

Yöntem, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanıldığı elektrik motoru gövdelerinde de kullanılmaktadır (Şekil 4.33).



Şekil 4.33.- Norveç'te Hydro Aluminium Profiles firmasında motor gövdelerinin yapımında kullanılan bir FSW hattı (Eriksson ve Larsson 2001).



Şekil 4.34.- FSW yöntemi kullanılarak kaynak edilmiş alüminyum panel görüntüsü (ESAB Superstir 1996).

FSW yöntemi ayrıca; kamyon gövdeleri, zırhlı taşıt yapımı (ülkemizde FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.'de üretilmekte olan zırhlı personel taşıma araçlarının alt ve yan panellerinin birbirine kaynağı için bu konuda çalışmalar sürdürülmektedir), karavan parçaları, asansör parçaları, otomobil, otobüs, motosiklet ve bisiklet parçaları, alüminyum köprüler, alüminyum , kurşun veya titanyumdan yapılmış bina ön cephe panelleri, alüminyum cam çerçeveleri, alüminyum boru üretimi, buzdolabı panelleri, gaz depolama tankları ve gıda endüstrisinde kullanılan alüminyum tank ve taşıma ekipmanlarının birleştirilmesinde yaygın uygulama alanı bulmaktadır (Anderson 2004, Lahti 2003, Mathers 2002, Kallee ve diğ. 2002, Eriksson ve Larsson 2001, Brunnhuber ve diğ. 2001, Campbell ve Stotler 1999, Thomas ve Nicholas 1997, Knipstrom ve Pekkari 1997, Mahoney 1997, ESAB Superstir 1996). Ayrıca yöntemin nükleer reaktörlerde kullanılan alüminyum alaşımı parçaların birleştirilmesinde alternatif bir yöntem olarak ele alındığı da görülmektedir (Sanderson ve diğ. 2000).

Tablo 4.10.- Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminin uygulama alanlarının başlıcaları (Dawes ve Thomas 1996).

Endüstri Kolu	Uygulama Alanları
Uzay Ve Havacılık	Yakıt tankları, uzay aracı omurga parçaları, kanatlar, gövdeler ve kuyruk takımları, uçak yakıtı tankları, askeri veya özel roketler, helikopter iniş platformları, özel alaşımli gövde yüzey destekleri, hatalı MIG kaynağı yapılan yerlerin onarımı.
Zırhlı Taşıt Yapımı	Zırhlı taşıt alüminyum yan panellerin kaynağı.
Alüminyum Parça Üretimi	Büyük boyutlu ekstrüzyon elemanları, dikişli alüminyum boru üretimi
Otomotiv	Otobüs ve kamyon şaseleri, jantlar, tanker depoları
Konstrüksiyon	Köprüler, denüzüstü petrol platformlarının elemanları, pencere çerçeveleri, fabrika bacaları,
Gıda	Alüminyum bira varilleri,
Raylı Taşıt Yapımı	Lokomotif ve vagon şaseleri, yüksek hızlı trenlerin yüzey sacları ve diğer biçimlendirilmiş parçaları
Soğutma	Sıfırlı sıcaklıklarda çalışan borular ve ısı eşanjörü parçaları
Gemi Yapımı	Gemi yan panelleri, güverte elemanları, ağırlıktan tasarruf için üretilmiş hafif yapı elemanlarının kaynağı
Basınçlı Kap ve Kazan Üretimi	Sıvılaştırılmış gaz taşıma tankları, alüminyum reaktör parçaları

4.4.1.3. Yöntemin uygulanması

4.4.1.3.1. Yöntemin uygulama ortamı

Sürtünen elemanla birleştirme kaynak yöntemi kullanılan işletmelerde tezgahların düzenlenmesi ve temiz tutulması oldukça büyük önem taşır. Kaynak sırasında çeşitli metal ve alaşımlarının kaynağında, ısınmadan dolayı ortaya çıkabilecek duman oluşumu; operatörlere zarar vermeden, yerinde emilmelidir. Takım olarak kullanılan malzemenin temizlenmesi, iş parçalarının temizliği ve kaynak ağızlarının fırçalanması; yöntemin oksitleri ortadan kaldırma özeliği dolayısıyla fazla önemli değildir (Dawes ve Thomas 1995, Threadgill 1997).

4.4.1.3.2. Kaynak parametreleri

Sürtünen elemanla birleştirme kaynağında kullanılan kaynak parametreleri; kaynak dikişi kalitesine, metal alaşımının türüne, parça boyutlarına, takım dönme hızına ve ilerleme hızına bağlıdır. Takım tasarımı da kaynak sonuçlarını etkileyen en önemli etmenlerdendir.

4.4.1.3.2.1. Takım malzemeleri

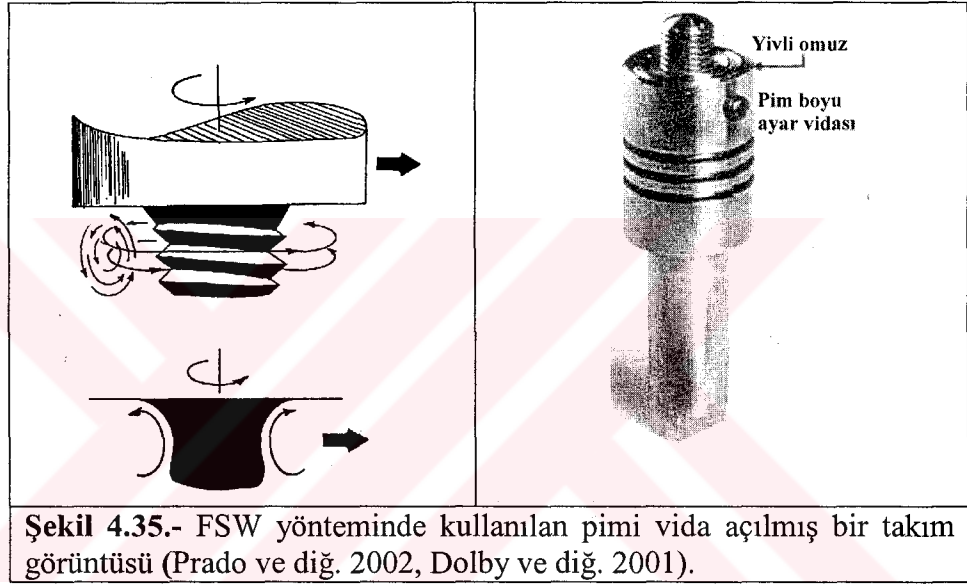
Sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynak yönteminde kullanılan takım malzemeleri, yüksek sıcaklıklarda aşınma direnci gösteren malzemelerdir. Özellikle, takım malzemesi spektrumu; az alaşımlı çeliklerden yüksek hız çeliğine kadar değişebilmektedir; örneğin bazı uygulamalarda HSS (EN HS 6-5-3) yüksek hız çeliği takım kullanılırken bazı uygulamalarda da AISI H13 (X40CrMoV51) sıcak iş takım çeliği kullanılmış olup ince alüminyum levhaların kaynağında da C45, C50, C60 gibi az alaşımlı takım çelikleri kullanılmaktadır (Colligan ve diğ. 2003, Kallee ve diğ. 2001, Nicholas ve Kallee 2000).

Günümüzde, alüminyum 6061+ %20 Al₂O₃ metal matrisli kompozit alaşımlarının kaynağında takım aşınmasının önemli olduğu çalışmalar yapılmış olup, özellikle

yağda sertleştirilmiş takım çeliklerinin takıma iyi biçim verildiğinde, iyi sonuçlar verdiği de belirtilmiştir (Prado ve diğ. 2002).

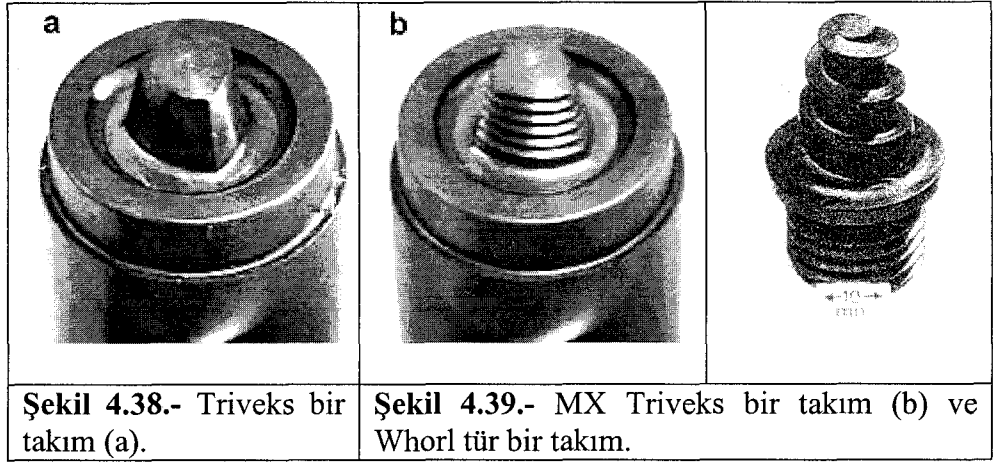
4.4.1.3.2.2. Takım tasarımı

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminde (FSW) kullanılan klasik takım biçimi; ucunda vida açılmış pim bulunan takımdır. Bu takım biçimi günümüzde de kullanımı sürmektedir (Şekil 4.35).

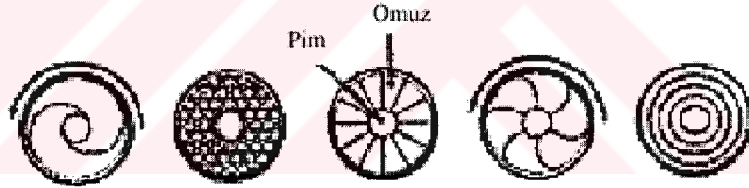


Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminde kullanılan takım biçimleri alaşım türüne ve malzeme kalınlığına bağlı olarak gelişmeler göstermiş ve günümüzde çeşitli profillerde üretilen takımlar ortaya çıkmıştır (Şekil 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40).





Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi üzerine yapılan çalışmalar, malzemeye basınç uygulayan omuzlu takımın omuz profillerinin kaynak kalitesi üzerinde etkisi olduğunu göstermiş, bu amaçla çeşitli omuz profillerine sahip takımlar geliştirilerek endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır. Özellikle omuz profili, kaynak edilen malzemede kaynak sırasında plastik şekil değiştiren metali aşağıya doğru bastırarak kaynak dikişinin oluşumunu etkilemektedir.



Şekil 4.40.- Farklı omuz biçimlerine örnekler.

4.4.1.3.2.3. Kaynak hızı

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminde kullanılan kaynak hızı, kaynak edilecek alaşımın türüne ve parça boyutuna bağlıdır.

4.4.1.3.2.4. Yöntemin uygulandığı malzemeler ve kalınlıklar

Sürtünen elemanla birleştirme kaynak yöntemi kullanılarak birçok malzeme türü ve bunların kombinasyonları kaynak edilebilir. Özellikle, 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serisi alüminyum dövme alaşımları kolaylıkla birleştirilebilir. Son

araştırmalarda döküm alüminyum alaşımlar birbirleri ile ve de döküm alaşımlar ile ekstrüzyon yolu ile biçimlendirilmiş alaşımların kaynağı başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntem uygulanarak alüminyum dövme alaşımı levhaların tek taraftan bir pasoda kaynak ağız hazırlığına gerek olmaksızın 1,2 mm'den 50 mm'ye kadar kalınlıklarında kaynakla birleştirilebilme olanağı vardır ancak 100 mm'yi aşan kalınlıklarda çift taraftan kaynak gerçekleştirilebilir(Şekil 4.41).

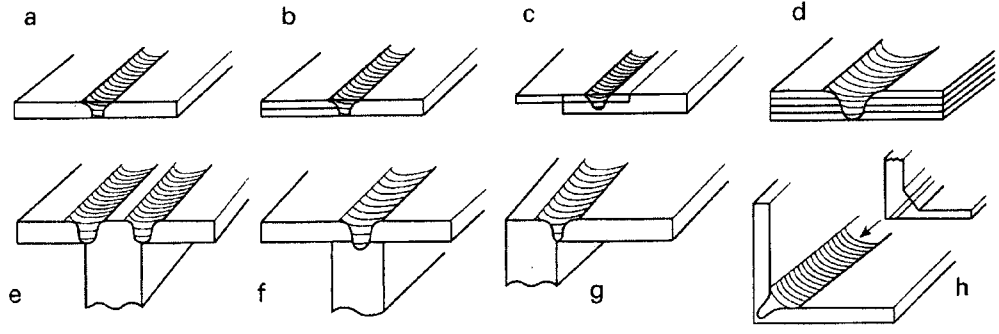


Şekil 4.41.- 50 mm kalınlığında alüminyum parçaların sürtünen elemanla birleştirme kaynak yöntemi uygulanarak çift taraftan kaynak edilmiş hali.

4.4.1.3.3. Birleştirme türleri

Bu yöntem kullanılarak küt alın kaynağı, bindirme kaynağı, T-köşe kaynağı, dış ve iç köşe kaynağı (Şekil 4.42) yapılabilmekte ve hepsi için de özel takım tasarımları bulunmaktadır.

Yerçekimi katı-faz kaynağında etkisiz olduğundan yöntem, tüm pozisyonlarda (yatay, dikey, korniş, tavan) rahatlıkla uygulanabilmektedir.



Şekil 4.42.-Sürtünen elemanla birleştirme kaynağı uygulanarak gerçekleştirilen birleştirmeler.

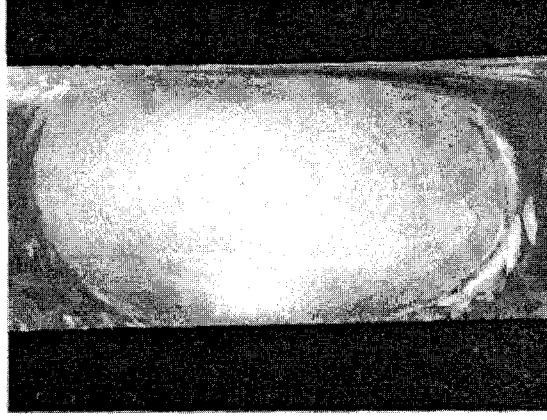
a)Küt alın birleştirme, b) Birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme, c) Bindirme, d)Çoklu Bindirme, e)İki pasolu T- köşe birleştirme, f)Tek pasolu T-köşe birleştirme, g)Dış köşe birleştirilmesi, h)İç köşe birleştirilmesi

4.4.2. Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanması üzerine yapılan çalışmalar

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi; ilk bulunduğu yılları takiben endüstriyel uygulamaları fazla olan alüminyum ve alüminyum alaşımları üzerinde denenmiş ve ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında üç önemli metalurjik üstünlüğü olduğu görülmüştür.

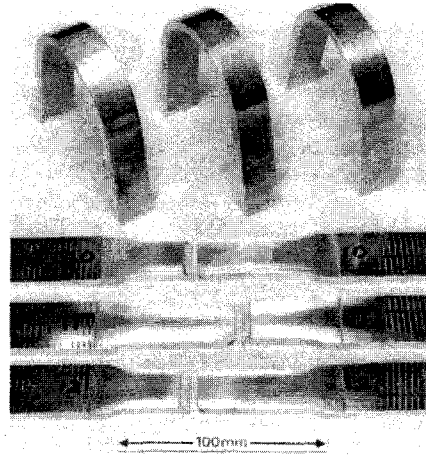
1. Kaynak bölgesinde, çatlak oluşmama olasılığı yüksektir.
2. Alaşım elementi yanması olmadığından, kaynak metalinde alaşım elementi kaybı yoktur ve dolayısı ile esas metalin kimyasal bileşimi korunmuş olur.
3. Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağında takımın ezme, karıştırma ve dövme hareketleri sayesinde ince taneli bir kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bölge elde etme olanağı vardır.

Bu metalurjik üstünlükleri, 6.4 mm kalınlığında 6082 alüminyum alaşımı bağlantının kaynak metali kesitinin makro fotoğrafında verilmiştir (Dawes ve Thomas 1995, Dawes ve Thomas 1996).

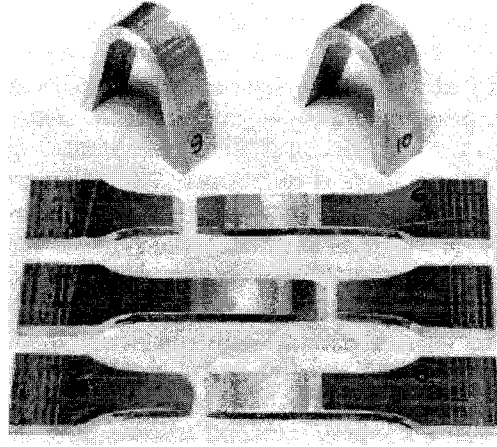


Şekil 4.43.- FSW yöntemi uygulanmış 6.4 mm kalınlığındaki 6082 alüminyum alaşımında kaynağın makro yapısı (Dawes ve Thomas 1995, Dawes ve Thomas 1996).

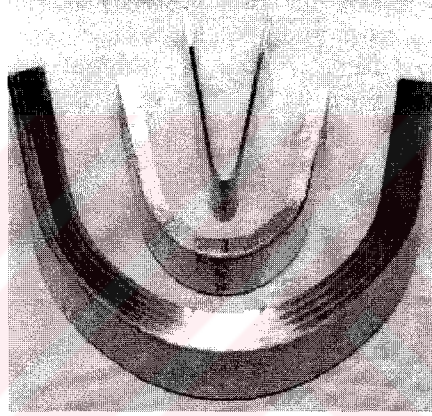
Şekil 4.43’de görülen tipik kaynak metali kesitinde içiçe girmiş eliptik daireler bulunmakta ve bu elipsler takım profiline, kaynak bölgesindeki ısı dağılımına, takımın dönme ve ilerleme hareketi arasındaki ilişkiye bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Uygun kaynak koşullarında gerçekleştirilen kaynak metali tümüyle boşluk ve çatlaklardan arınmış durumdadır. Aynı araştırmacılar, çalışmalarda çeşitli kalınlıklarda 5083- O, 2014- T6 ve 6082- T6 alüminyum alaşımları üzerinde de FSW yöntemini uygulayarak oluşturdukları bağlantıları, mekanik deneylere tabi tutmuşlar ve bağlantıların iyi mekanik özellikler gösterdiklerini saptamışlardır. Şekil 4.44’de 2014- T6 alüminyum alaşımından yapılmış kaynaklı eğme ve çekme deney parçaları Şekil 4.45’de 5083- O alüminyum alaşımından yapılmış kaynaklı bağlantıların eğme ve çekme deney parçaları; Şekil 4.46’da da 6082- T6 alüminyum alaşımından yapılmış kaynaklı bağlantıların eğme ve çekme deney parçaları gösterilmiştir.



Şekil 4.44.- 2014- T6 alüminyum alaşımına yapılan FSW kaynağı sonrasındaki eğme ve çekme deney parçaları.

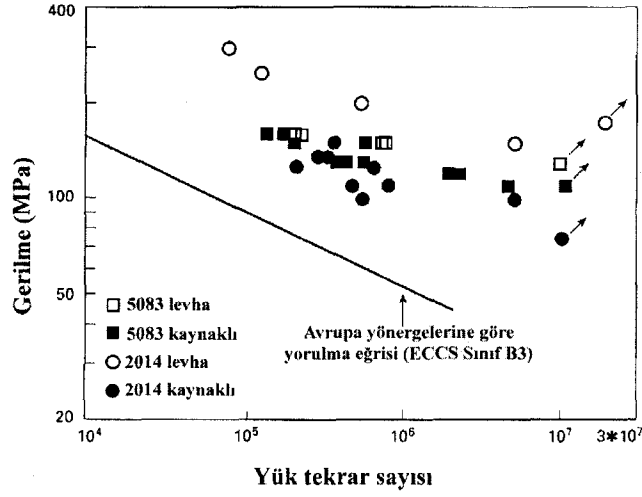


Şekil 4.45.- 5083- O alüminyum alaşımına yapılan FSW kaynağı sonrasındaki eğme ve çekme deney parçaları.



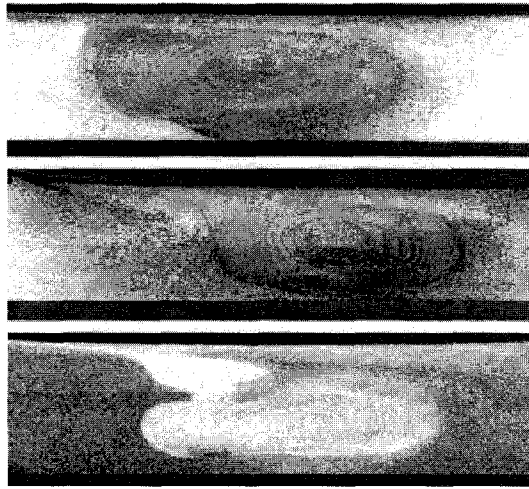
Şekil 4.46.- 6082- T6 alüminyum alaşımına yapılan FSW kaynağı sonrasındaki eğme ve çekme deney parçaları (1.6, 6.4 ve 12.7 mm kalınlıklar).

2014- T6 alaşımı bağlantılarda, çekme deneyi sonucundaki kopmanın kaynak metali dışından, IEB'den olduğu; 5083- O durumunda (tavlanmış), FSW yöntemi ile kaynak edilmiş numunelerin çekme deneyi sonucunda ise kopmanın kaynak metali ve IEB dışında, esas metal tarafında olduğu görülmüştür. Bağlantıların akma ve çekme mukavemet değerleri esas metal ile aynı değerlerde olduğu saptanmış ve rapor edilmiştir. Tüm bağlantılar, 180°'lik eğme deneyine tabi tutulmuş ve yüz ve kök kısımlarında çatlığa rastlanmamıştır. FSW yöntemi ile kaynak edilmiş 5083 ve 2014 alüminyum alaşımı bağlantıların yorulma mukavemetlerinin incelenmesinde de kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemetlerinin iyi olduğu; (Şekil 4.47) hatta aynı alaşımların TIG ve MIG kaynaklı bağlantılarına göre daha yüksek oldukları görülmüştür (Dawes ve Thomas 1995).



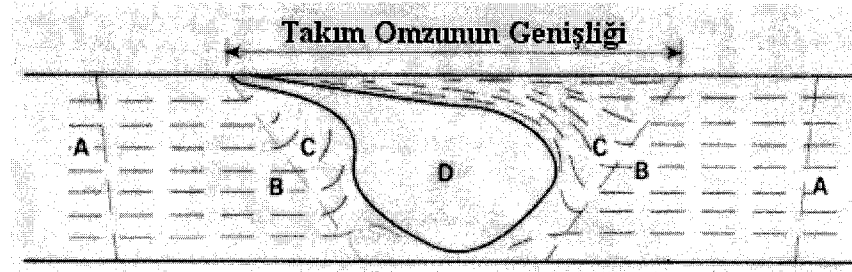
Şekil 4.47.- Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi uygulanmış ve uygulanmamış alüminyum alaşımlarının yorulma deneyi sonuçları (Dawes ve Thomas 1995).

Threadgill (1997) tarafından gerçekleştirilmiş bir çalışmada, 7075- T7351, 2014A- T6 ve 5083- H321 alüminyum alaşımı 6.4 mm kalınlığındaki levhalara FSW yöntemi ile kaynak uygulanmış ve elde edilen kaynak bölgelerinin makroyapı görüntüleri Şekil 4.48'de verilmiştir. Burada da kaynak metalinin içiçe geçmiş eliptik halkalardan oluştuğu ve bunların soğan halkası biçiminde görüldükleri, boyutlarının pim boyutundan daha büyük olduğu, takım omzu çapından oldukça küçük oldukları belirtilmiştir.



Şekil 4.48.- 6.4 mm kalınlığında FSW kaynaklı bağlantıların tipik makro kesitleri. a) 7075- T7351 b) 2014A- T6 c) 5083- H321.

Aynı araştırmacı, kaynak metali biçiminin önceden tahmin edilmesine olanak olmadığını zira bunun takım tasarımına ve kaynak parametrelerinin yanısıra aynı zamanda da kaynak edilen metalin ergime sıcaklığına bağlı olduğunu belirtmiştir. Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi kullanılarak kaynak edilmiş alüminyum alaşımlarının çoğunda kaynak bölgesinde dört önemli yapısal değişimin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.49).



Şekil 4.49.-FSW yöntemi ile kaynak sonrasında kaynak bölgesinde oluşan yapısal bölgeler (Threadgill 1997).

A Bölgesi: En dış bölgedir. Burası ne ısıdan ne de mekanik deformasyondan etkilenmiştir. Esas metalin kendisidir.

B bölgesi: Bu bölgede mekanik deformasyon yoktur. Ancak kaynak sırasında ortaya çıkan ısı, malzeme özelliklerini etkilemektedir. Isıdan etkilenmiş bölge olarak tanımlanır.

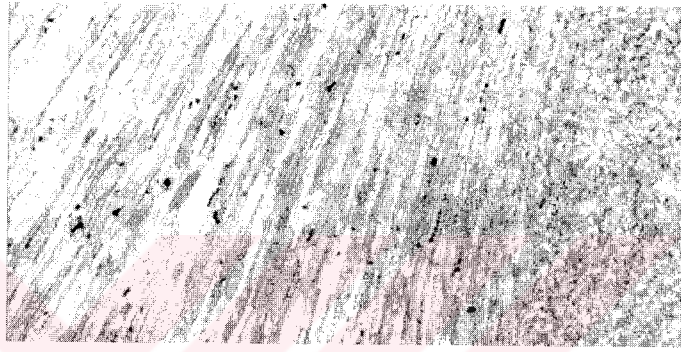
C Bölgesi: Plastik deformasyonun etkisi altındadır ve kaynağın ısısından etkilenir. Termomekanik olarak etkilenmiş bölge olarak adlandırılır.

D Bölgesi: En önemli bölge olup kaynak metalinin kendisidir.

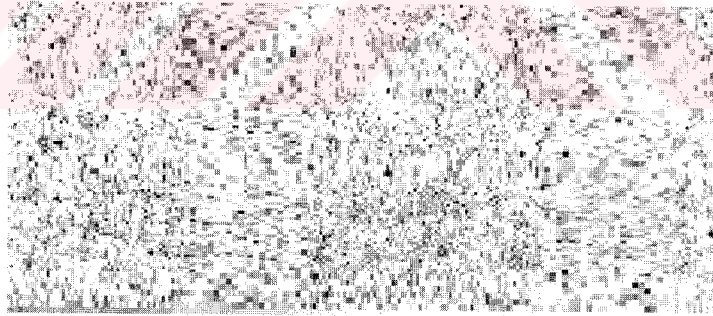
Dövme alaşımlarında A bölgesi, tipik hadde yapısıdır ve taneler uzundur. IEB, optik mikroskopta incelendiğinde, esas metalden farklı görülmemektedir. Yaşlandırılmış ya da mekanik olarak sertleştirilmiş alaşımlarda bu bölge çok sert değildir. Kaynak işleminin bazen termomekanik etkilenmiş bölgede, yerel yeniden kristalleşme ve uzun tane kıvrılmasına neden olmaktadır. Aşırı yaşlandırma ve tavlama, IEB'nin iç yapısına yakın etkiler yapar. Termomekanik olarak etkilenmiş bölgenin mikroyapısı,

7075- T7351 alaşımı için Şekil 4.50'de görülmektedir. Aynı alaşım için esas meal yapısı Şekil 4.51'de, kaynak metali yapısı da Şekil 4.52'de görülmektedir.

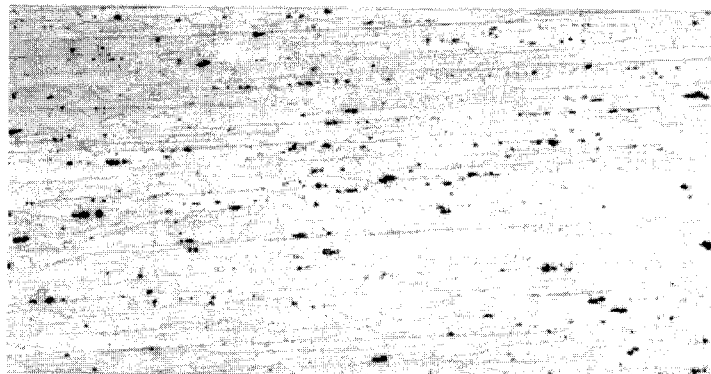
Araştırmada çıkan ilginç bir sonuç, kaynak metali mikroyapısının eş eksenli ve çok ince olduğu, tane boyutlarının, alaşım türü ve kaynak prosedürüne göre değiştiği ve 10 mikrondan daha küçük olduklarının belirtilmesidir. Ayrıca, çalışmada; aynı alaşımların kaynak bölgelerindeki sertlik dağılımları da ölçülmüş ve sonuçları Şekil 4.53'de grafikler halinde gösterilmiştir (Threadgill 1997).



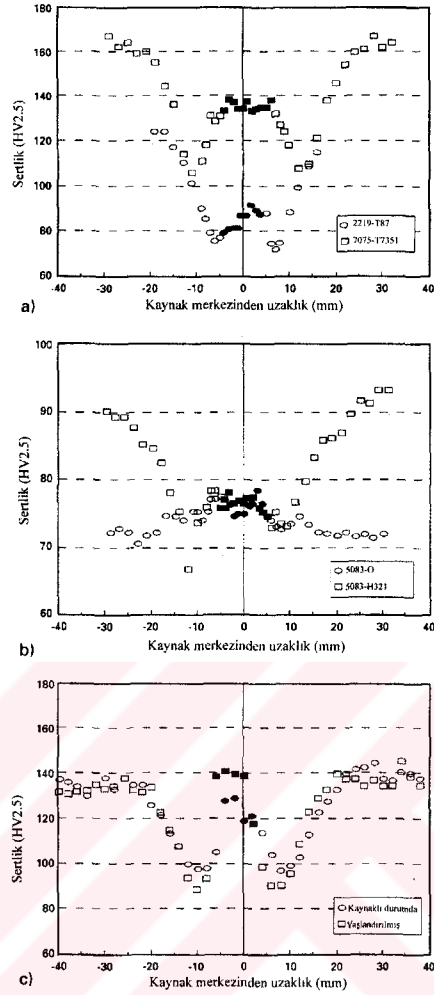
Şekil 4.50.- 7075- T7351 alaşımı iin termomekanik olarak etkilenmiş bölgenin mikroyapısı.



Şekil 4.51.- 7075- T7351 alaşımı iin kaynak metali mikroyapısı.

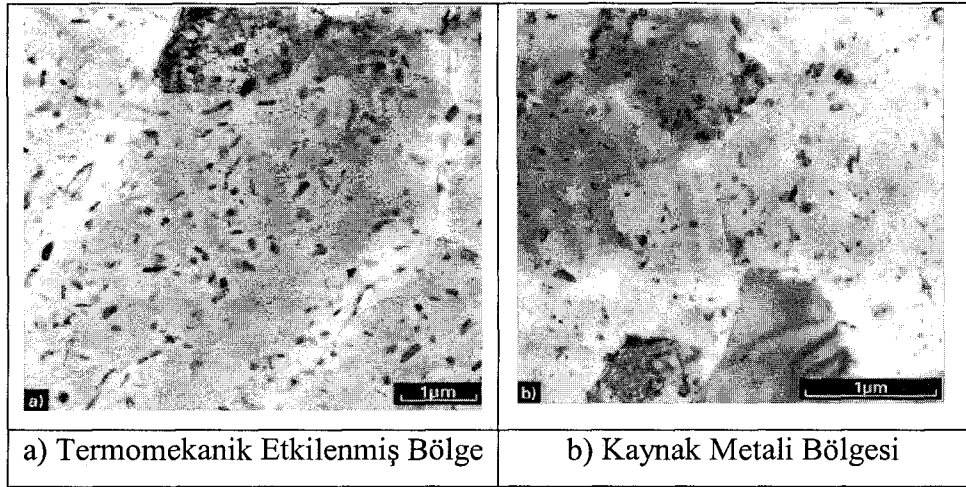


Şekil 4.52.- 7075- T7351 alaşımı iin esas metal mikroyapısı.



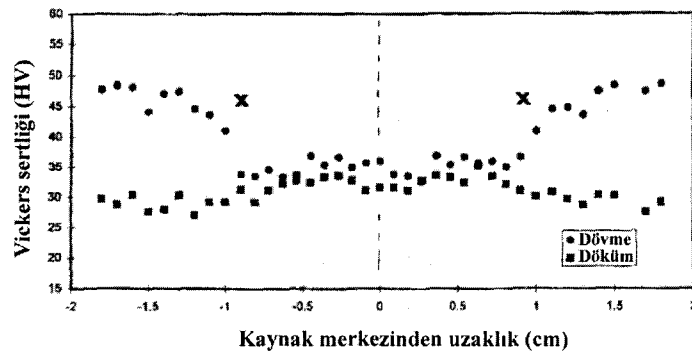
Şekil 4.53.- FSW kaynağı yapılmış çeşitli alaşımların sertlik dağılımları.

Kaynak metalindeki sertlik seviyeleri, yaşlandırılarak ve mekanik olarak sertleştirilmiş esas metal sertliğinden daha aşağı seviyelerde bulunmuştur; ancak 5083-O gibi alaşımlarda değer, esas metalden biraz yüksektir. Buna karşın ilginçtir ki O durumundaki ve H321 durumundaki 5083 alaşımında, kaynak metalinin sertlikleri esas metal sertliği ile aynıdır (Şekil 4.53) (Threadgill 1997). Başka bir araştırmacının (Rhodes ve diğ. 1997) yaptığı çalışmada, kaynak bölgesinden geçirilmiş elektron mikroskopu ile alınmış mikroyapılar verilmiş ve kaynak bölgesinde çökeltiler olduğu ve bunların da $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ veya $Mg(Zn_2, AlCu)$ taneleriçi çökeltiler olduğu ve boyutlarının 60 ile 80 nm olduğu, bunların 7075-T6 esas metalinde 50-75 nm'lik boyutlarda bulunduğu da belirtilmiştir (Şekil 4.54).



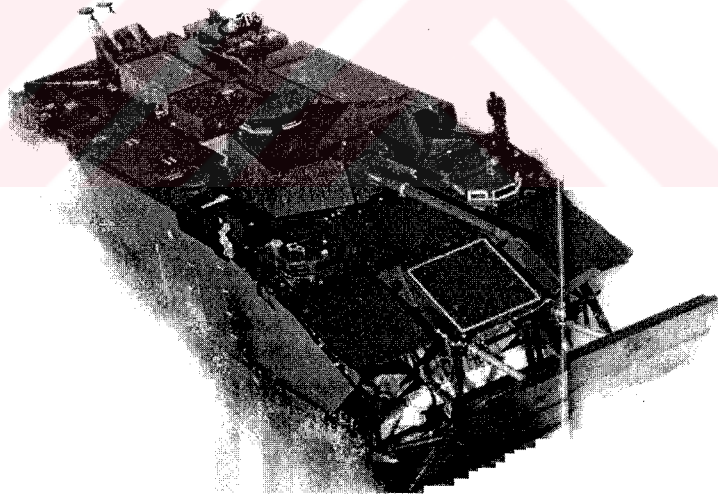
Şekil 4.54.- FSW yöntemi ile kaynağı yapılmış 7075-T6 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin TEM görüntüleri (Rhodes ve diğ. 1997).

Bileşimi modifiye edilmiş 1100 alüminyum alaşımının (%99.2 Al, %0.5 Fe, %0.15 Cu, %0.12 Si, %0.05 Mn, %0.04 Ti, kalan miktarda ağırlıkça Be ve Mg) alüminyum alaşımını döküm ve aynı alaşımın %50 redüksiyon oranında soğuk biçim değiştirmiş 6.3 mm kalınlığındaki levhalarının FSW yöntemi ile birleştirilmesi üzerine yapılan bir çalışmada (Flores ve diğ. 1998) karbonlu çelikten yapılan omuzlu takım (pim çapı 6.3 mm, pim boyu 5.8 mm) 400 d/d devirde ve 6 cm/dak ilerleme hızı ile kaynak edilmişlerdir. Çalışmada döküm durumunda ve % 50 redüksiyon oranında soğuk biçim değiştirmiş levhaların FSW kaynağı sonrasında kaynak bölgesinin, karşılaştırmalı olarak incelenmesi esas alınmıştır. Kaynak bölgesinden alınan sertlik ölçümleri (Şekil 4.55) ve TEM incelemeleri sonucunda % 50 oranında soğuk haddelenmiş iş parçasının esas metal ve kaynak bölgesinde sertliğin arttığı ve bunun da dislokasyon yoğunluğuyla ilişkili olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.55.- Modifiye edilmiş 1100 alaşımı döküm ve % 50 oranında soğuk haddelenmiş durumda FSW yöntemi ile kaynaktan sonra kaynak bölgesinin sertlik dağılımı (Flores ve diğ. 1998).

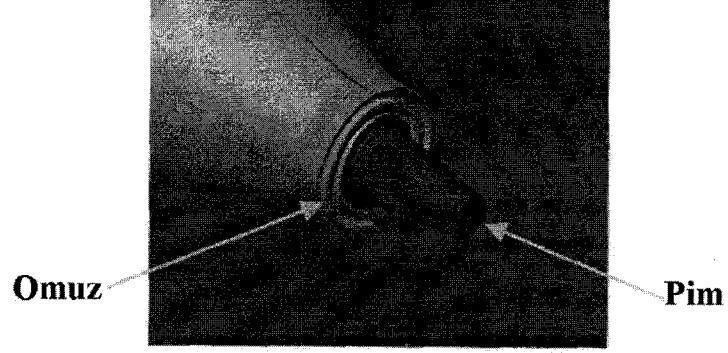
General Dynamics Land Systems Inc.(GDLS) ve Edison Kaynak Enstitüsü (EWI) tarafından yürütülen bir araştırma programında, zırhlı araçlarda kullanılan alüminyum alaşımı 2519- T87 levhalar, MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile FSW yöntemi kullanılarak kaynak edilmişlerdir (Campbell ve Stotler 1999) ve kaynak sonrası balistik deneye tabi tutulmuşlardır. FSW yöntemi uygulanarak kaynak edilmiş bağlantıların mekanik özellikleri, alışımlı ark kaynak yöntemleri ile kaynak edilmişler ile karşılaştırıldığında artan toklukla eşdeğer mukavemet özellikleri göstermiştir. Aynı zamanda artan tokluğa bağlı olarak balistik performansın da arttığı görülmüştür. Mekanik özellikleri tespit etmek için yapılan deneylerde 6.4x 305x 305 mm boyutlarında levhalar kullanılmıştır. Balistik deneyler için 6.3x 1219x 1219 mm levhalar FSW ile kaynak edilmişlerdir. Takım dönme devri ve ilerleme hızları düşük ve yüksek seçilerek kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Ortalama akma mukavemeti 178 MPa, çekme mukavemetleri de 299 MPa ve uzama da % 10.7 bulunmuştur. Bu özellikler FSW yönteminin balistik kaynak gereksinimleri için oldukça büyük bir potansiyel olduğunu göstermiş olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.56.- FSW yöntemi kullanılarak Amerikan Deniz Kuvvetleri için üretimi tasarlanan İleri Ampifik Personel Taşıyıcı (Colligan ve diğ. 2003).

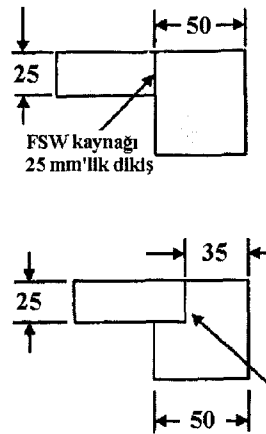
AA 2519- T87 alüminyum alaşımının zırhlı personel taşıyıcılarda kullanımı (Şekil 4.56) ve FSW yöntemiyle kaynak edilmelerini planlayarak başarılı sonuçlar alınan ve yukarıda belirtilen araştırmanın ikinci aşamasında daha kalın levhalar köşe kaynağı yapılmışlardır (Colligan ve diğ. 2003).

Bu araştırmada, birinci aşamada kullanılan tek parçalı H13 eliği tek parça takım yerine omuz kısmı H13 eliği pim kısmı kesik koni olan ve MP159 alaşımından yapılmış iki parçalı takım kullanılmıştır (şekil 4.57).

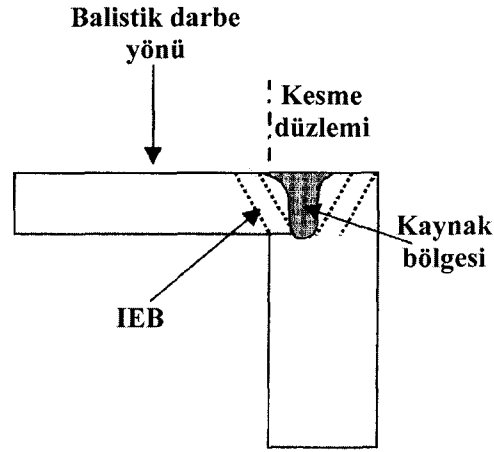


şekil 4.57.- AA 2519- T87 alüminyum alaşımının sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı için geliştirilen kesik koni pimli çift parçalı takımın tasarımı (Colligan ve diğ. 2003).

Araştırmada, iki tür köşe kaynak birleştirmesi tasarlanmıştır (şekil 4.58, 4.59) ve bağlantılar farklı takım dönme devirlerinde ve farklı hızlarda sürtünen elemanla birleştirme kaynağına tabi tutulmuşlardır, kaynaklı levhalardan çıkarılan numunelere çekme deneyi uygulanması yanında balistik deney de uygulanmış ve tüm bağlantılarda çok iyi mekanik özellikler elde edilmesinin yanısıra MIG kaynaklı bağlantılar balistik deneyi geçemezken FSW kaynaklı bağlantılardan çok iyi sonuçlar elde edilmiştir (Colligan ve diğ. 2003).

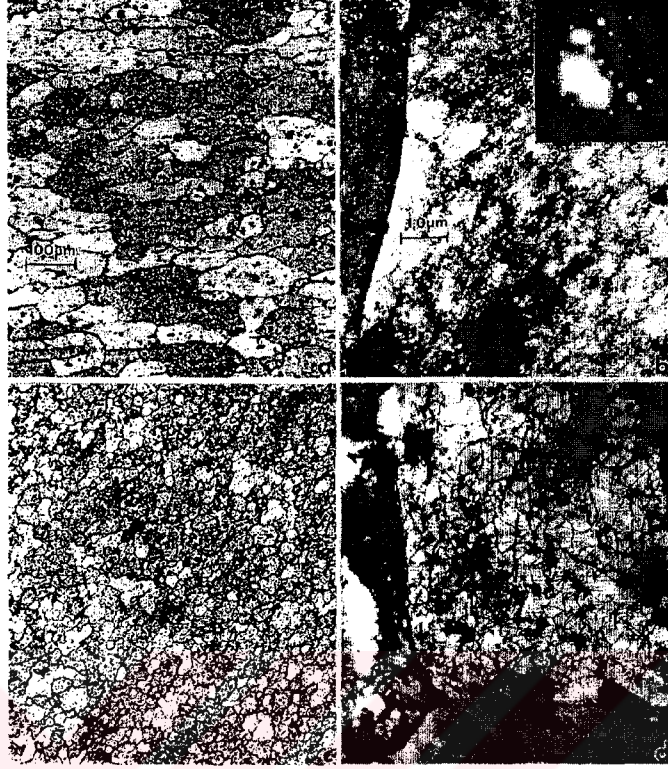


şekil 4.58.- AA 2519- T87 alaşımı 25 mm ve 50 mm kalınlıklardaki levhalarda köşe kaynak birleştirmesi tasarımı (Colligan ve diğ. 2003).



Şekil 4.59.- AA 2519- T87 alaşımı 25 mm ve 50 mm kalınlıklardaki levhalarda FSW yöntemi uygulanmış köşe birleştirmesi (Colligan ve diğ. 2003).

6.3 mm kalınlığında 6061-T6 alüminyum alaşımının sürtünen elemanla birleştirme kaynağı üzerine yapılmış bir çalışmada (Liu ve diğ. 1997), sertleştirilmiş karbonlu çelikten yapılmış 6.3 mm çaplı 5.8 mm uzunluğunda pim bulunan ve omuz çapı 12,5 mm takım kullanılmıştır. Takım devri 300 ile 1000 d/d aralığında seçilerek 0.15 ile 0.25 cm/s'lik farklı ilerleme hızlarında (kaynak hızı) FSW bağlantıları oluşturulmuştur. Araştırmada, kaynak bölgesinin metalografik incelemeleri ışık ve taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak çökelti X-ray spektrometresi ile incelenmiştir. Ayrıca, kaynak bölgesinde mikro sertlik taraması yapılmış sertlik değişimleri ile mikro yapıdaki oluşumlar arasında ilişki araştırılmıştır. FSW uygulanmış bağlantılarda esas metal sertliğinin (ortalama 100HV) kaynak metalinde ortalama 55HV'ye indiği gözlenmiştir. TEM incelemelerinde esas metalde dislokasyon yoğunluğunun çok yüksek olduğu görülmüş aynı zamanda esas metalde Al_xMgSi çökelti boyutlarının 8 ile 10 µm arasında olduğu bunun kaynak bölgesinden daha düşük boyutlarda olduğu saptanmıştır. Kaynak bölgesindeki sertlik azalmasının takımın karıştırıcı ve plastikleştirici etkisiyle sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak değişik boyutlara ve hatta AlSi ve Al_xMgSiCu çökelti oluştuğu ve lameli tipte çökelti görüldüğü bunun da kaynak bölgesindeki sertliğin azalmasında etkili olduğu belirtilmiştir (Şekil 4.60).



Şekil 4.60.- FSW yöntemiyle kaynak edilmiş 6061-T6 alaşımının kaynak bölgesinden alınmış ışık mikroskobu ve TEM görüntüleri (Liu ve diğ. 1997).

(a ve b): Esas metal

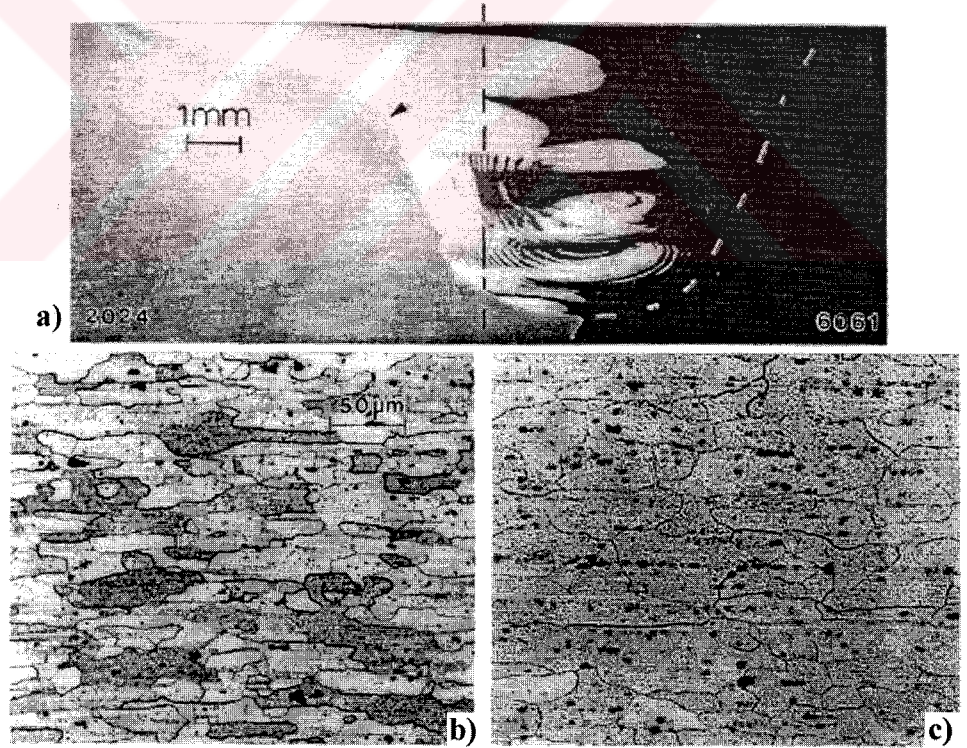
(c ve d): Kaynak metali.

AW-2024 ile AW-6061 alüminyum alaşımlarının FSW kaynağında kaynak metalinin kesit boyunca akış biçimini ve metalurjik karakteristiklerinin incelediği iki çalışmada ise (Li ve diğ. 1999, Li ve diğ. 1999b), iki farklı alüminyum alaşımı 6.5 mm kalınlığındaki levhalar birbirlerine farklı metal kaynak bağlantısı oluşturmak üzere FSW yöntemiyle birleştirilmişlerdir. Karbonlu çelik takım kullanılan çalışmada, takım devri 400 ile 1200 d/d olarak değiştirilmiş ve kaynak ilerleme hızı 1 mm/s olarak seçilmiştir. Bağlantının kesit makro yapısı ve esas metal mikro yapı görüntüleri Şekil 4.61’de, kaynak bölgelerinin mikro yapıları da Şekil 4.62’de verilmiştir.

AW- 2024 alüminyum alaşımının FSW yöntemiyle kaynak edilmesine ait ilginç bir çalışmada da (Benavides ve diğ. 1999), 6.5 mm kalınlığında malzeme -30°C ön sıcaklıkta ve oda sıcaklığında ($\sim 30^{\circ}\text{C}$), karbon çeliği vida pimli takım kullanılarak 650 d/d ve 1 mm/s kaynak hızıyla kaynak edilmiş ve kaynak bölgesinin sertlik ve

metalurjik özellikleri incelenmiştir. Soğutularak kaynak uygulanmış parçanın sertliği hem esas metalde oda sıcaklığında kaynak uygulanmış olan parçaya göre daha yüksek olarak bulunurken kaynak metalinde sertliğin azaldığı saptanmıştır. Kaynak bölgesi üzerine yapılan TEM çalışmalarında düşük sıcaklıkta kaynak edilen parçanın tane boyutlarının kaynak metalinde azaldığı görülmüştür. Bunun nedeninin dislokasyon yoğunluğu ve çökeltilere bağlı olduğu ve ileri araştırmalar yapılması gerektiği bildirilmiştir.

5083-O, 6062-T6, 2024-T3, 2219-T87, 7050-T73 ve 7075-T73 alüminyum alaşımlarının FSW yöntemi ile kaynak edildikleri bir araştırmada da (Reynolds ve diğ. 2000), 8 mm kalınlığında 102 mm genişliğinde 610 mm uzunluğunda levhalar toplam kaynak boyu 560 mm olmak üzere kaynaklar tek taraftan tek pasoda farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı levhalardan çıkartılan çekme deney sonuçları aşağıda Tablo 4.11’de özetlenmiştir.

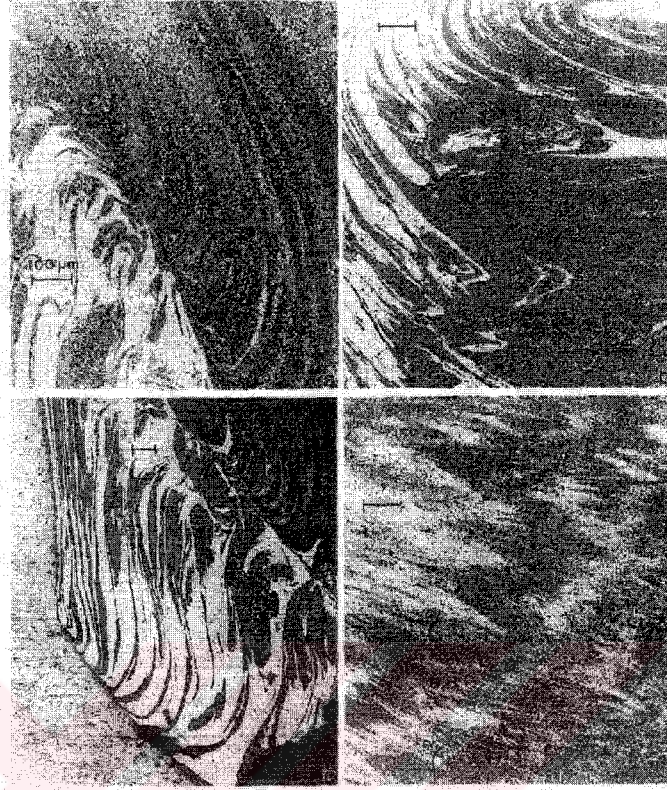


Şekil 4.61.- FSW yöntemiyle kaynak edilmiş 2024- 6061 alüminyum alaşım çiftinde kaynak bölgesi makro yapısı ve mikro yapıları.

- (a) Bağlantının makro kesiti.
- (b) 2024 alaşımının mikro yapısı.
- (c) 6061 alaşımının mikro yapısı.

Tablo 4.11.- FSW yöntemi ile kaynak edilmiş çeşitli alüminyum alaşımı bağlantıların çekme deneyi sonuçları (Reynolds ve diğ. 2000).

Alaşım Türü	Kaynak Türü	Maksimum Çekme Mukavemeti (MPa)	Verim (%)	Kırılma Yeri
2024	Esas metal	488	-	-
2024	Normal	426	87	KM
2024	Normal	404	83	KM
2024	Sıcak	402	82	IEB/ Yığılma tarafı
2024	Sıcak	409	84	IEB/ Yığılma tarafı
2024	Soğuk	425	87	KM
2024	Soğuk	358	73	KM
2219	Esas metal	491	-	-
2219	Normal	324	66	KM
2219	Normal	322	66	KM
2219	Sıcak	335	68	IEB/ Yığılma tarafı
2219	Sıcak	337	69	IEB/ Yığılma tarafı
2219	Soğuk	319	65	KM
2219	Soğuk	310	63	KM
5083	Esas metal	327	-	-
5083	Normal	313	96	KM
5083	Normal	312	95	IEB/ İlerleme tarafı
5083	Sıcak	307	94	KM
5083	Sıcak	285	87	KM
5083	Soğuk	317	97	EM/ Yığılma tarafı
5083	Soğuk	317	97	EM/ İlerleme tarafı
6061	Esas metal	353	-	-
6061	Normal	213	60	IEB/ Yığılma tarafı
6061	Normal	218	62	IEB/ Yığılma tarafı
6061	Sıcak	208	59	IEB/ Yığılma tarafı
6061	Sıcak	210	60	IEB/ Yığılma tarafı
6061	Soğuk	213	60	IEB/ Yığılma tarafı
6061	Soğuk	216	61	IEB/ Yığılma tarafı
7050	Esas metal	546	-	-
7050	Normal	429	79	IEB/ İlerleme tarafı
7050	Normal	458	84	IEB/Yığılma tarafı
7050	Sıcak	406	74	IEB/ İlerleme tarafı
7050	Sıcak	417	76	IEB/Yığılma tarafı
7050	Soğuk	435	80	IEB/Yığılma tarafı
7050	Soğuk	469	86	IEB/Yığılma tarafı
7075	Esas metal	515	-	-
7075	Normal	420	82	IEB/ Yığılma tarafı
7075	Normal	437	85	IEB/ İlerleme tarafı
7075	Sıcak	389	76	IEB/ Yığılma tarafı
7075	Sıcak	406	79	IEB/ İlerleme tarafı
7075	Soğuk	386	75	KM
7075	Soğuk	458	89	IEB/ İlerleme tarafı



Şekil 4.62.- FSW yöntemiyle kaynak edilmiş 2024- 6061 alüminyum alaşım çiftinde kaynak bölgesi mikro yapıları. (a) Girdap ve dönel halkalar gibi yapı. Siyah bölgeler 2024 alaşımınca zengin bölgeler. (b) 2024-6061 arasındaki homojen karışım. (c) 2024 tarafından kaynak metaline keskin geçiş bölgesi yapısı. (d) Kaynak merkezine yakın bölgedeki homojen karışım yapısı.

Gemi yapımında oldukça yaygın kullanılan dövme alüminyum alaşımları AA 5083 (AlMg4.5Mn0.7) ve AA 6082 (AlSi1Mg) korozyon direnci ve yüksek mukavemet özellikleri olan alüminyum alaşımlarının sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı (FSW) üzerine yapılmış olan bir araştırmada (Larsson, Karlsson ve Svenson 2000) 5 mm'den 15 mm'ye kadar kalınlıklardaki levhalar, farklı kaynak hızlarında kaynak edilmişler ve kaynak bağlantılarının makroyapıları, mikroyapıları incelenmesinin yanısıra kaynak kesitinde mikrosertlik dağılımları elde edilmiş, kaynaklı bağlantılara çekme ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Bağlantının mekanik değerlerinin iyi olduğu saptanmıştır.

Uzay endüstrisinde kullanılan başlıca alüminyum alaşımları olan Alclad 2024- T3 ve Al 7075- T6 alaşımları farklı kaynak hızlarında, takım boyutları değişen ve farklı

devirlerde dönen takımlar ile bindirme türü bağlantıların oluşturulduğu bir çalışma sonucunda da (Cederqvist ve Reynolds 2001) bu tür bağlantılarda da iyi mekanik özellik değerleri alındığı belirtilmiştir.

Askeri ve ticari uçakların ana yapılarında kullanılan yüksek mukavemetli çökelme sertleştirilmiş 7xxx serisi alaşımlardan olan 7050- T7451 alaşımı 6.35 mm kalınlığındaki levhalar, alın altına FSW yöntemi ile birleştirildiği bir çalışmada da (Pao ve diğ. 2001) 400 d/d takım devri ve 100 mm/d kaynak ilerleme hızı kullanılmış, ve kaynaktan sonra bağlantılara yaşlandırma uygulanmıştır. Çalışmada, kaynaklı durumda ve kaynaklı durumda ve yaşlandırılmış 7050 alaşımı levhaların mikroyapı ve mekanik özellik değişimlerinin yanısıra korozyonlu yorulma çatlama üzerine mekanik deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçların iyi olduğu özetlenmiştir.

6.25 mm kalınlığında 2024- T351 alüminyum alaşımı levhanın FSW kaynağı üzerine yapılmış bir çalışmada da, kaynak bölgesi üzerine yapılan metalurjik, sertlik ve EDX ölçmeleri sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi uygulanmış alaşımın kaynak bölgesinde sert partikül- zengin ve sert partikül- fakir bölgeler içeren segregasyon olmuş bantlı bir mikroyapı yarattığını göstermiştir ve bu bölgelerin kaynak parametrelerine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir (Sutton ve diğ. 2002). Çalışmanın ikinci bölümünde (Sutton ve diğ. 2003), 2024- T351 ve 2524- T351 alüminyum alaşımlarının FSW kaynaklarında bantlı yapının mekanik karakterizasyonu incelenmiştir.

Kaynak ağzının laser ışını ile ön ısıtıldığı laser destekli sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı üzerine yapılan bir çalışmada (Kohn ve diğ. 2002) 4 mm kalınlığında MgAZ91 alaşımı levhalar kullanılmış ve çalışmanın ileriye dönük olarak seramik malzemelere uygulanabileceği yönünde, çarpımsız, hatasız kaynak özeliğinde, ince taneli bir yapı gösteren kaynak bağlantısı yapısı elde edildiği belirtilmiştir.

Literatür araştırmalarında, sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmış birçok araştırma saptanmıştır. Üzerinde çalışılan bu tür alaşımlar, 6013 (Heinz ve Skrotzki, 2002), 6056 (Denquin ve diğ. 2002) süperplastik

2095 (Salem ve diğ. 2002) ve 6061 ve 7075 (Krishnan 2002) alüminyum alaşımı levhalardır. Özellikle Krishnan tarafından yapılan çalışma, kaynak bölgesinde kaynak metalinin soğan halkaları oluşumu, kaynak metali üst yüzeyindeki takımın bıraktığı yarı dairesel izler ile ilişkisinin incelendiği ilginç bir araştırmadır. Bu çalışmada, soğan halkaları arasındaki aralıkların takımın belirli bir dönme hızında ileriye doğru hareketine bağlı olduğu ve hatta parça yüzeyindeki takım izlerinin de soğan halkaları arasındaki mesafeyi etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, yöntemin üç boyutta modellenmesi üzerine de çalışmalar bulunmaktadır (Ulysse 2002).

Döküm alüminyum alaşımı A356 ve dövme alüminyum alaşımı 6061, 4x 7x 140 mm boyutlarındaki levhalara 1600 d/d takım devri ve 3° takım açısı sabit tutularak ve takım saat yönünde döndürülerek, 87 ile 267 mm/d ilerleme hızlarında FSW yöntemi uygulanmış olan bir araştırmada, kaynak bölgesinde Vickers sertlik taraması yapılmış, bağlantılardan çıkarılan çekme numunelerine çekme deneyi uygulanmış, kaynak bölgesindeki metalurjik dönüşümler ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelenmiştir (Lee ve diğ. 2003). Kaynak bağlantılarında, gözenek ve hataya rastlanmamış ve çekme deneyi sonuçlarının esas metallere göre iyi olduğu, bunun kaynak metalinde karmaşık bir mikroyapının sonucu olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Aynı araştırmacılar yalnızca döküm alüminyum alaşımı A356 üzerine de uyguladıkları FSW kaynak yönteminde kaynak parametrelerinin mekanik özelliklerinin düzeldiği yönünde bir çalışma da yapmışlardır.

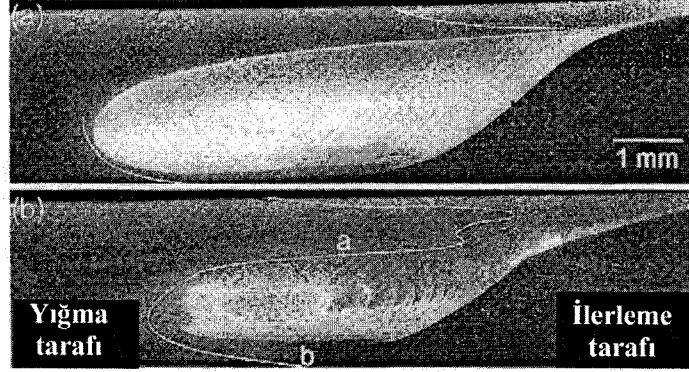
2xxx serisi alüminyum alaşımlarından; 2017 T-351 FSW kaynaklı bağlantıların çekme ve kırılma özellikleri (Liu ve diğ. 2003), FSW kaynaklı 2024- T351 bağlantılarda yorulma çatlak gelişmesinde IEB'nin özellikleri ve artık gerilmelerin rolü üzerine (Bussu ve Irving 2003), ticari 2024 alaşımında yüksek gerilme oranlı süperplastisitenin incelendiği (Charit ve Mishra 2003), dinamik olarak yeniden kristalleşmiş AA 2095 kaynaklı bağlantılarının FSW kaynak değerlendirmesi (Salem 2003), 2024 ve 7010 alaşımlarının korozyonunun incelendiği (Davenport ve diğ. 2003), 2014 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin incelendiği (Külekcı 2003) araştırmalar bulunmaktadır.

Gemi ve zırhlı personel taşıyıcı yapımında kullanılan AA 5083 alüminyum alaşımının sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı üzerine de birkaç çalışma yapılmıştır (Peel ve diğ. 2003, Naka ve diğ. 2003, James ve diğ. 2003, Dickerson ve Przydatek 2003). Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu, bağlantıların mikroyapı, mekanik özellikleri ve yorulma mukavemetleri sonuçlarını içermektedir. Peel ve diğ.'nin yaptığı çalışma, bunların içinde ilginç olanlardan biridir. Kullanılan esas metal, 3 mm kalınlığında, ağırlıkça % 4- 4.9 Mg, % 0.4- 1 Mn, % 0.05- 0.25 Cr, kalanı alüminyum olan AA 5083 alaşımıdır. Katı çözelti mukavemetini artırmak ve soğuk şekil değiştirme sertleşmesi oranını da artırmak için; bu alaşım, yüksek Mg içeriğine sahiptir. Alaşımında bulunan Mn, yeniden kristalleşme sıcaklığını ve Mg' un mukavemet artırıcı etkisini sağlamaktadır. Bu alaşımında, Al₆Mn gibi partiküllerin varlığı; boyutları ve aralıkları; mukavemete önemli bir katkıda bulunmadıkları anlamına gelir. Bu alaşımın içeriğinin tasarımı; süperplastik şekillendirme için yapılmış ve alaşım tavlansak çok ince yeniden kristalleştirilmiş tane büyüklüğü sağlamak amacıyla yüksek oranda haddelenerek levha haline getirilmiştir. Bu durum; H19 temper ısıtma işlemine yakın bir uygulamadır ve esas metalde ortalama, 130 HV sertlik değerleri ile sonuçlanmaktadır. Esas metalin akma mukavemeti 392 MPa, çekme mukavemeti 457 MPa' dır. Kaynak edilmiş levhalar, 100 mm genişliğinde, 150 mm uzunluğundadır. Takım olarak 18 mm omuz çapında, standard M5 vida dışı açılmış pimli bir takım kullanılmıştır. Ayrıca, M6 vidalı takım da kullanılmış, takım uygulamada 2° eğilmiştir. Takım dönme hızı sabit tutulurken, ilerleme hızları 100, 150, 200 mm/d olarak değiştirilmiştir. Bağlantılara uygulanan çekme deneyi sonuçları, Tablo 4.12' de verilmektedir.

Tablo 4.12.- AA 5083 alüminyum alaşımının FSW yöntemi uygulanmış bağlantıların mekanik özellikleri (Peel ve diğ. 2003).

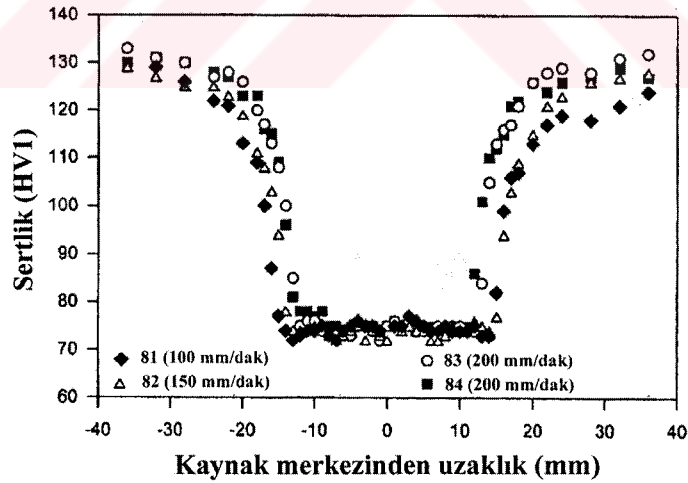
Numune Kodu	Takım	İlerleme Hızı (mm/dak)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak Verimi (%)	Kırılma Yeri
Esas Metal	-	-	392±4.3	457±2.3	-	-
81	M5	100	154±7.5	304±13	67	Takım yığıma tarafı
82	M5	150	149±9.9	216±15	47	KM
83	M5	200	147±8.0	186±20	41	KM
84	M6	200	145±6.5	259±17	57	Takım yığıma tarafı

Çalışmada, ayrıca mikroyapı incelemeleri ve sertlik taramaları yapılmış olup, kaynak kesitinden alınmış makroyapılar, Şekil 4.63’ de gösterilmiştir (Peel ve diğ. 2003) Sertlik dağılımları da Şekil 4.64’ de verilmektedir.



Şekil 4.63.- AA 5083 alüminyum alaşımına dair yapılan bir çalışmadan alınan makroyapı görüntüleri (Peel ve diğ. 2003).

Sertliğe bağlı olarak mikroyapıdaki değişiklik ilişkilendirildiğinde kaynak metali çevresinde yumuşamış çevre etkilenmemiş esas metal ve ikisi arasındaki bir geçiş bölgesi ortaya çıkmaktadır. Çalışmanın sonucunda, çekme deneyi sırasındaki biçim değişiminin yeniden kristalleşmiş kaynak bölgesinden olduğu, bu bölgenin kaynak dikişi çevresinde kaynak sırasında oluştuğu belirtilmiştir (Peel ve diğ. 2003).



Şekil 4.64.- AA 5083 alüminyum alaşıma ait bir çalışmadan alınan sertlik dağılımları (Peel ve diğ. 2003).

Ayrıca, 1050 (Kwon ve diğ. 2003) 7010 (Hassan ve diğ. 2003), A6056- T4 ve A6056- T6 alüminyum alaşımları (Cabibbo ve diğ. 2003), 7050- T651 (Su ve diğ. 2003), 7050-T7451 (John ve diğ. 2003), AA 6082 (Ericsson ve Sandström 2003),

6061 (Chen ve diğ. 2003) alaşımlarının sürtünen eleman ile birleştirme kaynağında kaynak bölgesinin çeşitli özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan en ilginç; alışımlı ergitme kaynak yöntemleri olan MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile 6082 alüminyum alaşımlarının T6 ve T4 temper durumlarında kaynak edilerek FSW yöntemi kullanılmış bağlantıların yorulma mukavemetlerine kaynak hızının etkisinin incelendiği çalışmadır (Ericsson ve Sandström 2003). Bu çalışmada sonucunda FSW kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemetlerinin MIG ve TIG kaynaklı bağlantılardan daha yüksek olduğu ve TIG kaynaklı bağlantıların MIG kaynaklı bağlantılardan daha iyi yorulma performansı gösterdikleri, FSW bağlantılarının mekanik ve yorulma özelliklerinin düşük ve yüksek ticari kaynak hızları kullanıldığı zaman kaynak hızından izafi olarak bağımsız olduğu; ancak çok düşük kaynak hızlarının mekanik özellikleri düzelttiği açıklanmıştır.

AlCuMgAg alaşımlarının FSW kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, mikroyapının TEM (geçirimli elektron mikroskobu) incelemeleri üzerine yapılmış bir çalışmada da, yöntemin uygulanmasının başarılı sonuçları alınmıştır (Litynska ve diğ. 2003).

Ayrıca, ülkemizde çeşitli alüminyum alaşımlarının (2014, 5754 ve saf alüminyum) FSW yöntemi ile birleştirme kaynağı üzerine yapılmış çalışmalar da mevcuttur (Atakoğlu ve diğ. 2003, Kurt ve diğ. 2003 Külekçi ve Şık 2003).

5. ÇALIŞMANIN AMACI ve PLANLANMASI

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, içerdikleri alaşım elementi miktarlarına ve gördükleri mekanik işlem veya ısıl işleme göre mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri bazı tür çeliklere yaklaşan endüstriyel bir malzeme grubu olarak son yıllarda artan kullanım alanına sahip ve ekonomik metalsel malzemeler konumuna gelmişlerdir. Bu tür malzemelerin kullanım alanları; ev eşyalarından uzay teknolojisine kadar geniş bir alana yayılmıştır. Özellikle taşıt endüstrisinde; otomobillerde ve demiryolu taşıtlarında kaporta malzemesi olarak, yüksek hızlı trenlerde dış kaplama ve çatı panellerinde; savunma sanayiinde; zırhlı taşıt yapımında, gemi yapım endüstrisinde; yüksek hızlı katamaran türü feribotların yapımında, havacılık endüstrisinde; askeri ve sivil amaçlı uçakların yapımında, roket yapımında, uzay aracı parçaların yakıt depolarında kullanılmakta ve çeşitli kaynak yöntemleriyle birleştirilmektedirler. Yukarıda sıralanmış olan ve bunların dışındaki birçok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılan alüminyum ve alüminyum alaşımları, yapının oluşturulmasında yegane birleştirme yöntemi olan kaynak tekniklerinin geliştirilmesini ve kullanımını teşvik etmişlerdir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında ergitme esaslı ve basınç esaslı (katı faz) kaynak yöntemleri çok sık kullanılmaktadır. Özellikle yapının oluşturulmasında MIG, TIG ve plazma arkı gibi ergitme esaslı kaynak yöntemleri en çok tercih edilen yöntemlerdir. Ancak, alaşımın metalurjik özellikleri, oluşturulan kaynak bağlantısının kaynak bölgesinde ve ısıdan etkilenmiş bölgesinde (IEB) bazı metalurjik çökeltilerin oluşmasına yol açtığından bağlantıdan istenen mekanik özelliklerde düşmeler ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı için ergitme oluşturmaksızın gerçekleştirilebilecek bir yöntem arayışı, araştırmacıları yeni bir katı faz yöntemi olan Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının bulunması ve geliştirilmesine yönlendirmiş ve 1990'lı yılların başında bu tür malzemelerden yapılmış levhaların alın alına birleştirilmesi için yeni bir yöntem ortaya çıkmıştır. Günümüzde, ergitme esaslı kaynak yöntemleriyle elde edilen

bağlantı özelliklerine yakın özellikler sağlayan bu yöntem, birçok alanda kullanıma girmiş ve çeşitli alüminyum ve alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesinde yoğun bir biçimde kullanılır duruma gelmiştir; çünkü FSW kaynak yöntemi, konstrüksiyonların oluşturulmasında üreticiye sayısız yararlar sağlamaktadır. Özellikle son yıllarda, uzun ömürlü taşıt yapımına dönük projeler, farklı alüminyum alaşımlarının FSW yöntemi ile birleştirilmesinin önemini bir kez daha gündeme getirmiştir. Yöntemin kullanımı ile kaliteli kaynak bağlantılarının oluşturulabilmesi için uygun kaynak parametrelerinin saptanması ve bağlantının çekme mukavemeti üzerine etkisi güncelliğini hala korumaktadır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının biraraya getirildiği yapıların MIG, TIG ve FSW kaynağı üzerine bilimsel çalışmaların yapılmasında, Avrupa ve ABD’de bu alaşımların savunma amaçlı kullanılması etken olmuştur.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde yüksek mukavemetleri ve korozyona dirençleri nedeni ile zırhlı taşıt ve gemi yapımı endüstrilerinde en çok kullanılan alaşımlar, EN AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7) ve EN AW-5086 (AlMg4) alaşımlarıdır. Yapılan literatür taramasında bu tür alaşımların MIG, TIG ve FSW kaynağı üzerine sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmüş, ayrıca AW-5083 ile AW-5086 çiftinin farklı alaşım birleştirmesi üzerine bir çalışmanın varlığı saptanamamıştır. Aslında, kimyasal bileşim olarak birbirlerine yakın miktarlarda alaşım elementi bulunduran bu iki alüminyum alaşımının mukavemet artırıcı mekanik yöntemler ile mukavemetlendirilmeleri ve bu özelliklerin kaynak ısı girdisi tarafından etkilenmesi, bu çalışmanın bu iki tür alaşımın bilinen MIG ve TIG gazaltı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi ve bir katı faz kaynak yöntemi olan FSW yöntemi ile birleştirilmelerinde ortaya çıkacak sonuçların incelenmesi açısından ilginç olacağı düşünülmüştür. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla, MIG ve TIG kaynak yöntemleri kullanılarak çift taraflı kaynak edilerek hazırlanan deney parçaları, seçilen kaynak parametreleri ile endüstriyel koşullarda kaynak edilmişlerdir. 5083-H321 – 5083- H321, 5083- H321 – 5086- H32, 5086- H32 – 5086- H32 eş ve farklı metal çiftlerinin sırasıyla FSW yöntemiyle kaynak edilmelerinde bir dizi ön deney yapılmış ve literatürde verilmiş parametreler ile ön deneylerde saptanan parametrelerin karşılaştırılması amaçlanarak kaliteli FSW kaynaklı bağlantıların

oluşturulması için optimum kaynak parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. 6.4 mm kalınlığında olan deney levhalarının genellikle tek taraflı kaynağı yapılmasına karşın diğer yöntemlerin çift taraflı uygulanması ve bu biçimde FSW kaynağı uygulanmış bir araştırmanın varlığının saptanamamış olması, FSW kaynağının da çift taraflı olarak uygulanmasının getireceği sonuçları görmek açısından çalışma, çift taraflı FSW kaynaklı bağlantılar oluşturulması ve bunların incelenmesi üzerine planlanmıştır. Bağlantıların mekanik değerleri ve kaynak bölgelerinde, kaynak ısı girdisi nedeni ile oluşan metalurjik özellikleri detaylı bir biçimde incelenmiştir; çünkü kaynak bölgelerindeki metalurjik dönüşümlerin bağlantının mekanik özellikleri üzerine etkisinin önemi büyüktür. Dolayısı ile çalışmada, yukarıda sıralanan alüminyum alaşım çiftlerinin ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile kaynağında ve basınç esaslı FSW kaynağında nasıl mekanik ve metalurjik değişimler göstereceklerinin bulunması ve endüstriyel kullanıcılara aktarılması amaçlanmıştır.

Endüstriyel koşullarda MIG ve TIG kaynak yöntemleri ve laboratuvar koşullarında FSW yöntemi kullanılarak elde edilen bağlantıların, mekanik özelliklerinin incelenmesi için çekme ve eğme deneylerine tabi tutulması, kırılma yüzeylerinin ışık mikroskobu ile makroskobik olarak incelenmesi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi, kaynak bölgelerinin metalurjik dönüşümlerinin görülmesi için metalografik olarak incelenmesi; bu amaçla ergitme esaslı kaynak yöntemleri uygulanmış numuneler üzerinde sırasıyla EM-IEB-KM-IEB-EM'nin; FSW yöntemi uygulanmış numuneler üzerinde sırasıyla EM-TMEB-KM-TMEB-EM'nin ışık mikroskobu ile ve Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak incelenmesi; kaynak bölge kesitinde Vickers sertlik taraması yapılması planlanmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Genel

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak EN AW-5083-H321 (EN AW-AIMg4.5Mn0.7) ve EN AW-5086-H32 (EN AW-AIMg4) dövme alüminyum alaşımı levhalar kullanılmıştır. AW-5083—AW-5083; AW-5083—AW-5086; AW-5086—AW-5086 alüminyum alaşımları, birbirlerine eş ve farklı alaşım çiftleri olarak MIG, TIG ve FSW (Sürtünen Eleman ile Birleştirme) kaynak yöntemleriyle uygun parametreler kullanılarak kaynak edilmişlerdir. Kaynaktan sonra tüm bağlantılar, görsel incelemeye tabi tutulmuş ve bağlantıların mukavemet değerlerini saptamak amacıyla standarda uygun çıkarılan numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynak bağlantılarının kaynak bölgesinin mikroyapısal ve sertlik özellikleri detaylı biçimde incelenmiştir.

6.2. Deney Malzemesi

Bu çalışmada, 6.45 mm kalınlığında, kimyasal bileşimi Tablo 6.1’de, mekanik özellikleri Tablo 6.2’de verilen alüminyum alaşımları deney malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tablo 6.1.- Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi.

Alaşım		Kimyasal Bileşim (%)											
Numerik	Kimyasal Sembol	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	Alüminyum (min)
EN AW-5083 ⁽¹⁾	EN AW-AIMg4.5Mn0.7	0.117	0.245	0.071	0.488	4.7	0.108	0.001	0.083	-	0.016	0.041	Kalan
EN AW-5086 ⁽¹⁾	EN AW-AIMg4	0.161	0.278	0.094	0.376	4.3	0.070	0.011	0.082	-	0.017	0.024	Kalan
EN 573-3 (1994)'e göre kimyasal bileşim (%)													
EN AW-5083	EN AW-AIMg4.5Mn0.7	0.40	0.40	0.15	0.2-0.5	4-4.9	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.15	Kalan
EN AW-5086	EN AW-AIMg4	0.40	0.50	0.10	0.4-0.1	3.5-4.5	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.15	Kalan
ASTM B 209' a göre kimyasal bileşim (%)													
5083	4.4Mg-0.7Mn-0.15Cr	0.4-0.7	0.40	0.10	0.4-0.1	4-4.9	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.15	Kalan
5086 Alclad 5086	4.0Mg-0.4Mn-0.15Cr	0.40	0.50	0.10	0.20-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.15	Kalan

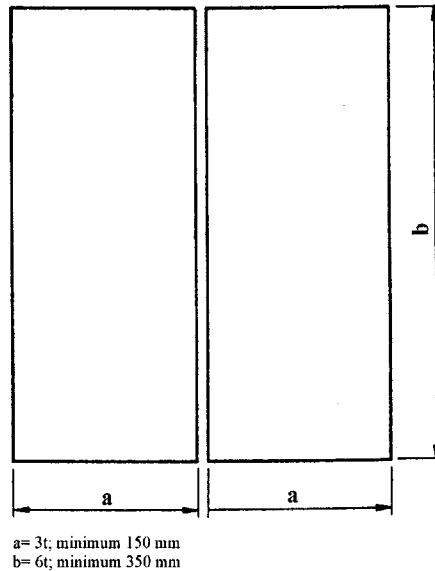
⁽¹⁾ Kimyasal analizler ARL- X-Ray spektrometresi ile yapılmıştır (Federal Mogul- İzmit Fabrikası)

Tablo 6.2.- Deney malzemelerinin mekanik özellikleri.

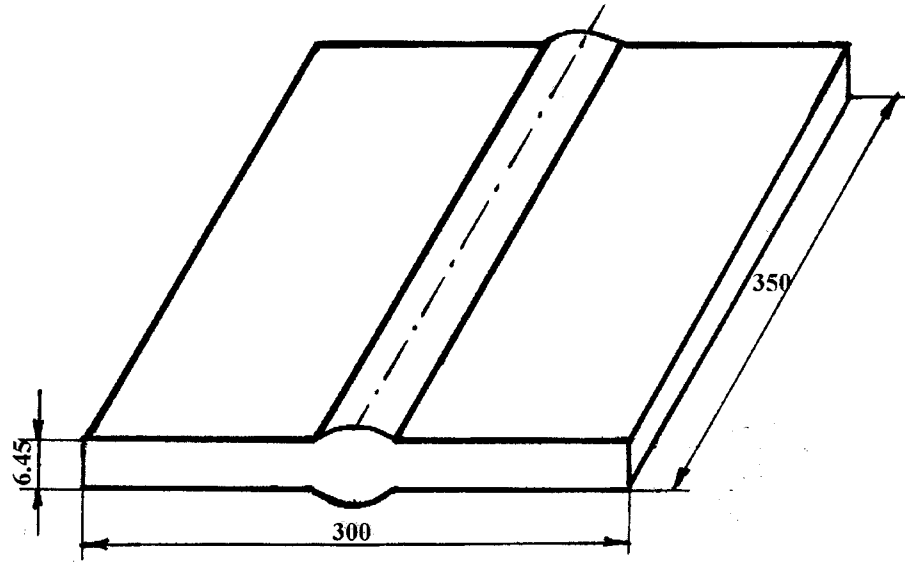
Alaşım		Akma Mukavemeti ($R_{p0.2}$) MPa	Çekme Mukavemeti (R_m) MPa	Uzama (minimum) (%)
Numerik	Kimyasal Sembol			
EN AW- 5083 H321 ⁽¹⁾	EN AW-AlMg4.5Mn0.7	259	355	13.2
EN AW- 5086 H32 ⁽¹⁾	EN AW- AlMg4	240	331	15.2
EN 573-3 (1994) ve preEN 14286' ya göre mekanik özellikler				
EN AW- 5083 H321	EN AW- AlMg4.5Mn0.7	220	305- 370	12
EN AW- 5086 H32	EN AW- AlMg4	100	240- 310	17
ASTM B 209' a göre mekanik özellikler				
5083 H321 ⁽²⁾	4.4Mg-0.7Mn-0.15Cr	215- 295	305- 385	12 (minumum)
5086 H32 ⁽²⁾	4.0Mg-0.4Mn-0.15Cr	195 (minumum)	275- 325	6-12 (minumum)
⁽¹⁾ Deneysel olarak saptanan değerlerdir (60 ton kapasiteli DARTEC çekme cihazı- KOÜ- Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Teknolojisi Laboratuvarı.)				
⁽²⁾ Isıl işlem ve kalınlığa bağlı olarak mekanik özellikler aralığı.				

6.3. Deney Parçalarının Boyutları

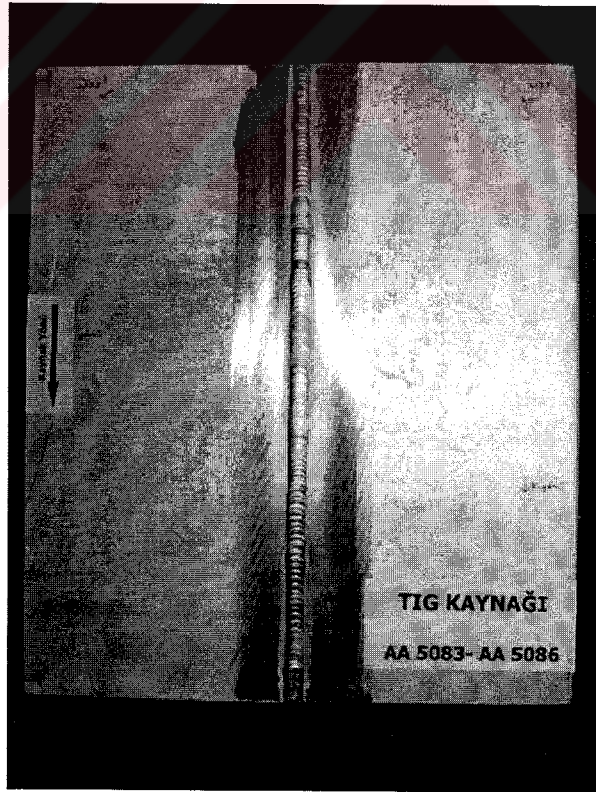
Kaynak edilecek parçaların boyutları EN 288-4 standardına göre saptanmıştır. 6.45 mm kalınlığında 150x 350 mm'lik levhalar, giyotin makas ile kesilerek yatay oluk pozisyonunda I- Alın (Küt Alın) kaynak ağızı biçiminde kaynak edilecek şekilde hazırlanmışlardır. Şekil 6.1'de kaynak edilecek parçaların boyutları Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1.- Kaynak edilecek levhaların boyutları (EN 288-4).



Şekil 6.2.- Yatay oluk pozisyonunda I-alın kaynaklı deney parçası boyutları.



Şekil 6.3.- Boyutları Şekil 6.2'de verilmiş levhaların kaynak edilmiş durumu (TIG kaynak yöntemi uygulanmış).

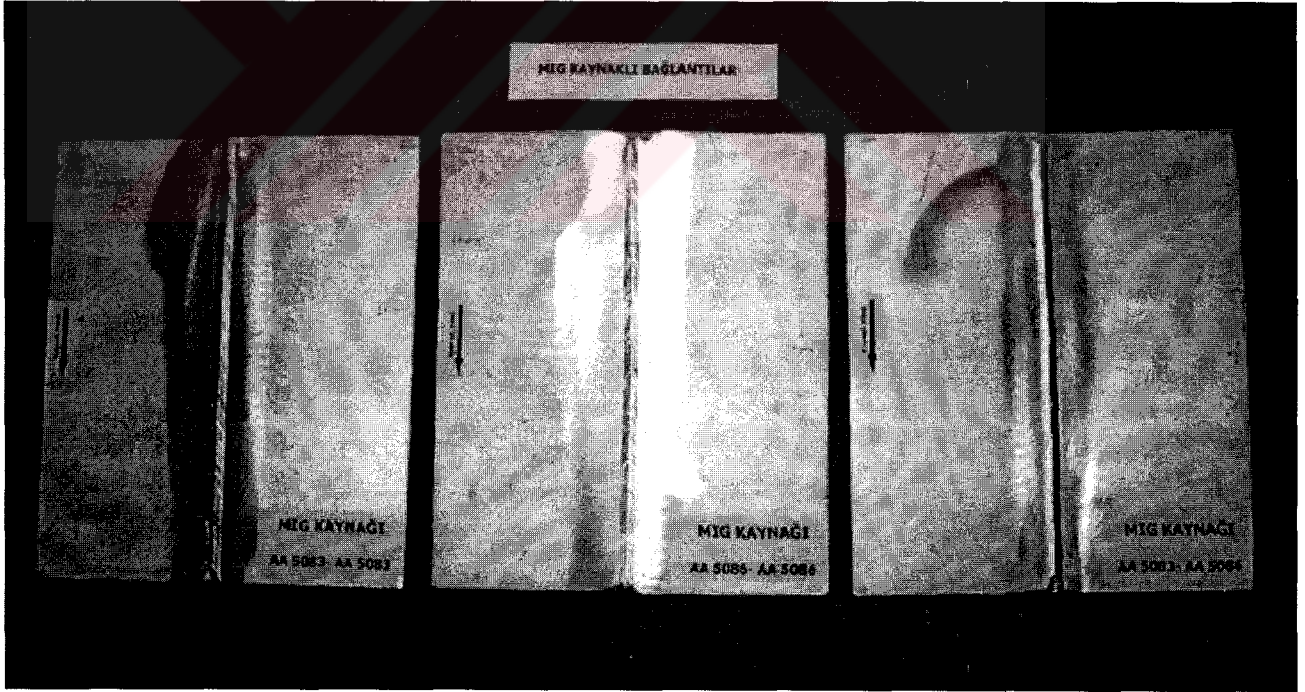
6.4. Kaynak Öncesi Yapılan İşlemler

Kaynak öncesinde, alüminyum alaşımlarının yüzeyinde bulunan ve kaynakta birleşme zorluğuna yol açan oksit tabakası ve kirlilikler; yağ alma, oksit alma gibi kimyasal işlemlerin yanısıra, kaynak işlemine başlamadan önce paslanmaz çelik tel ile fırçalama gibi mekanik temizleme yöntemi kullanılarak temizlenmiştir.

6.5. Kaynak İşlemlerinin Yapılışı

6.5.1. MIG kaynak yönteminin uygulanması (*)

Standartta belirtilen esaslara göre hazırlanan levhalara, öncelikle MIG kaynak yöntemi uygulanmıştır. Bu aşamada, AW 5083- AW 5083; AW 5083- AW 5086; AW 5086- AW 5086 şeklinde üç ayrı MIG kaynaklı bağlantı eş ve farklı metal çiftleri biçiminde çift taraflı kaynak edilerek oluşturulmuştur (Şekil 6.4).



Şekil 6.4.- MIG kaynağı uygulanmış deney parçaları.

(*) FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.- ANKARA

6.5.1.1. MIG Kaynağında Kullanılan Tel Elektrod

Deney parçalarının MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde Tablo 6.3'te kimyasal bileşimi, Tablo 6.4'te mekanik özellikleri verilen 1.6 mm çapında ER 5356 (EN AW- AlMg5Cr(A) alüminyum alaşımı tel elektrod kullanılmıştır.

Tablo 6.3.- MIG kaynak yönteminde kullanılan telin kimyasal bileşimi.

Tel	Kimyasal Bileşim								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
ER 5356 ⁽¹⁾	0.25	0.40	0.10	0.05-0.2	4.5- 5.5	0.05-0.2	0.10	0.06- 0.2	Kalan
EN AW- 5356 ⁽²⁾ (EN AW-AlMg5Cr(A))	0.25	0.40	0.10	0.05-0.2	4.5- 5.5	0.05-0.2	0.10	0.06- 0.2	Kalan
SG AlMg5 ⁽³⁾	0.25	0.40	-	0.1-0.2	4.5-5.5	0.05-0.2	0.1-0.2	0.1-0.25	Kalan

⁽¹⁾AWS A 5.10' a göre telin kimyasal bileşimi.
⁽²⁾EN 573- 3 ve prEN ISO 182273: 1999' a göre telin kimyasal bileşimi.
⁽³⁾ASKAYNAK Kobatek ürün kataloğu Mayıs 1997' de verilen telin kimyasal bileşimidir.

Tablo 6.4.- MIG kaynak yönteminde kullanılan telin mekanik özellikleri (ASKAYNAK- Kobatek, Mayıs 1997).

Tel Alaşımı	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	(%)Uzama (l ₀ = 5d ₀)	Koruyucu Gaz
AWS A 5.10 ER 5356	105- 125	240- 260	20- 24	Ar
EN- AW 5356 EN AW- AlMg5Cr(A)				Ar+ He

6.5.1.2. MIG kaynağında kullanılan koruyucu gaz

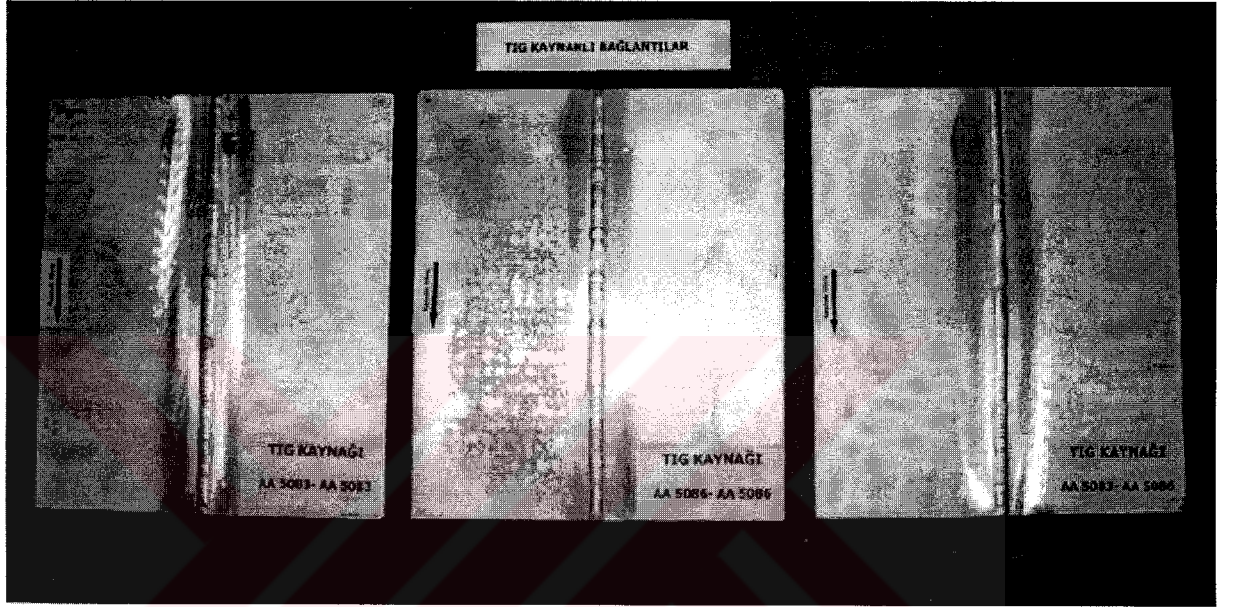
Deneysel çalışmalarda % 99.999 Ar gazı, koruyucu gaz olarak kullanılmıştır. Gaz debisi 12 lt/dak olarak alınmıştır.

6.5.1.3. MIG kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak akım şiddeti 180- 200 A, kaynak gerilimi 24- 26 V olarak alınmış olup, deney parçaları endüstriyel koşullarda yarı otomatik olarak kaynak edilmiştir.

6.5.2. TIG kaynak yönteminin uygulanması (*)

MIG kaynak yönteminde olduğu gibi, AW 5083-AW 5083; AW 5083-AW 5086; AW 5086-AW 5086 biçiminde standartlara uygun olarak hazırlanmış olan üç ayrı levha, TIG kaynak yöntemi kullanılarak eş ve farklı metal çiftleri biçiminde çift taraflı olarak kaynak edilerek birleştirilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5.- TIG kaynağı yapılmış deney parçaları.

6.5.2.1. TIG kaynağında kullanılan tel elektrod

Deney parçalarının TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde 1.6 mm çapında, 1 m boyunda ER 5356 (EN AW-AlMg5Cr(A) çubuk biçiminde TIG teli çubuğu kullanılmıştır. Telin kimyasal bileşimi Tablo 6.3'te, mekanik özellikleri de Tablo 6.4'te verilen ile aynıdır.

6.5.2.2. TIG Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gaz

TIG kaynak yöntemi kullanılarak parçaların kaynak edilmesinde %99.999 Ar gazı, 10 lt/dak'lık debide kullanılmış, ergimeyen TIG kaynak elektrodu çapı 2.4 mm olarak alınmıştır.

(*) FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.- ANKARA

6.5.2.3. TIG kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

Deney parçalarının TIG kaynağında, 210- 230 A kaynak akım şiddeti ve 16- 18 V kaynak gerilimi kullanılmış olup yöntem el ile gerçekleştirilmiştir.

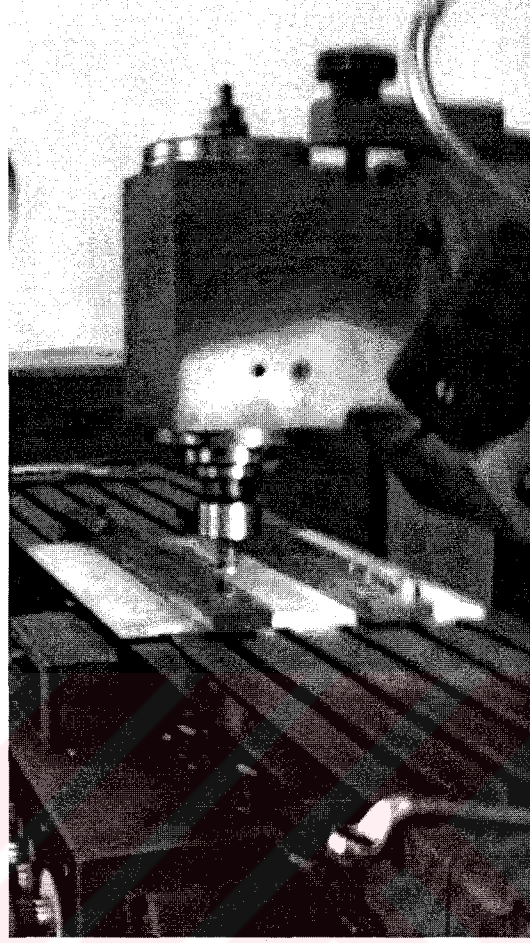
6.5.3. FSW (Sürtünen eleman ile birleştirme) kaynak yönteminin uygulanması(*)

Standard boyutlarda hazırlanan alüminyum alaşımı levhalara, universal freze tezgahında daha önceden yapılan ön deneyler sonucunda ve literatürden saptanan kaynak parametreleri kullanılarak, sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi (FSW) uygulanmıştır. Bu aşamada da, AW 5083- AW 5083; AW 5083- AW 5086; AW 5086- AW 5086 olmak üzere eş ve farklı metal çiftleri olarak çift taraflı kaynak uygulanarak üç ayrı FSW kaynaklı bağlantı oluşturulmuştur (Şekil 6.6, 6.7 ve 6.8).

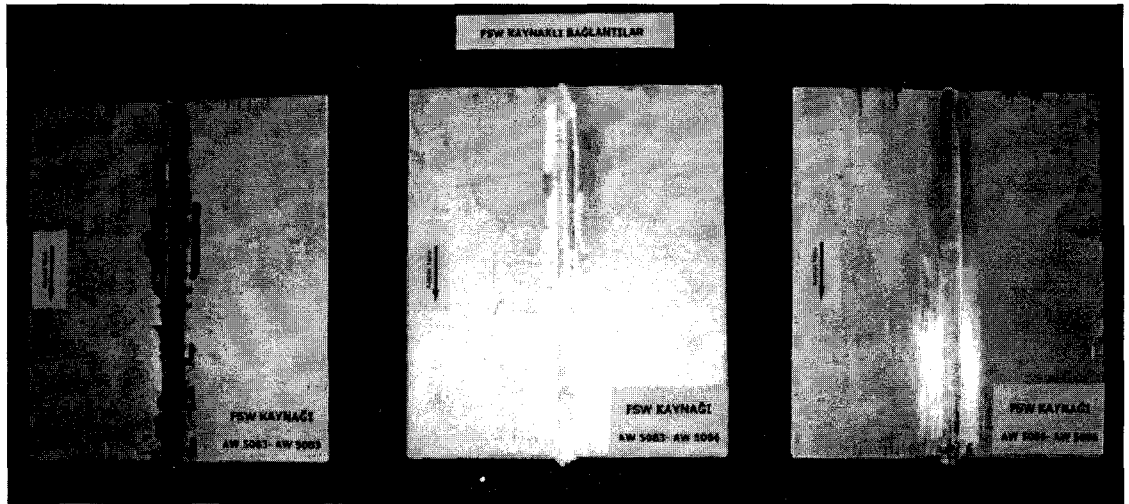


Şekil 6.6.- Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağında parçaların rijit olarak bağlanması ve kaynak işleminin yapılışı.

* KOÜ. Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgahları Laboratuvarı.



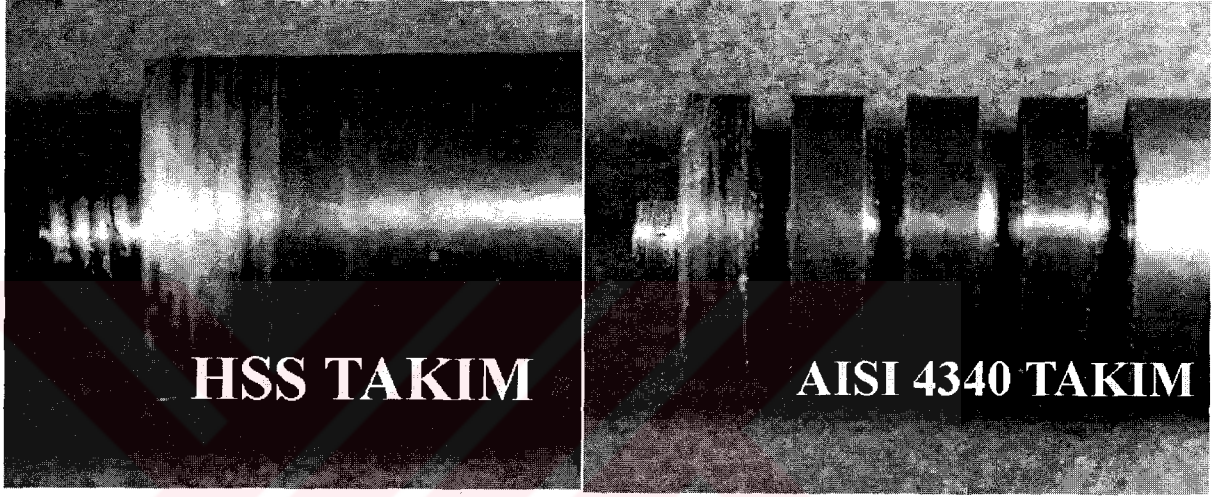
Şekil 6.7.- Universal freze tazgahında sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının (FSW) gerçekleştirilmesi.



Şekil 6.8.- FSW kaynağı yapılmış deney parçaları.

6.5.3.1. FSW yönteminde kullanılan takım

FSW yöntemi ile parçaların birleştirilmesinde, literatür taraması ve yapılmış olan ön deneylere göre; yüksek hız çeliği (EN HS6-5-3) (%6 W, %4 Cr, %5 Mo, %3 V, %1.2 C) ve AISI 4340 (%0.40 C, %0.70 Mn, %0.30 Si, % 0.80 Cr, %1.80 Ni, %0.25 Mo) çeliğinden yapılmış 20 mm çapında, ucunda M5 sol vida açılmış, 3.6 mm boyunda pim bulunan ve Şekil 6.9'da fotoğrafı görülen omuzlu takım kullanılmıştır.



Şekil 6.9.- FSW yöntemi uygulanarak yapılan deneylerde kullanılan takımların görünümü.

FSW yöntemi uygulanması sırasında takım, ilerleme yönüne doğru, dik eksenle 2° açı yapacak biçimde ayarlanmıştır.

6.5.3.2. FSW yönteminde kullanılan kaynak parametreleri

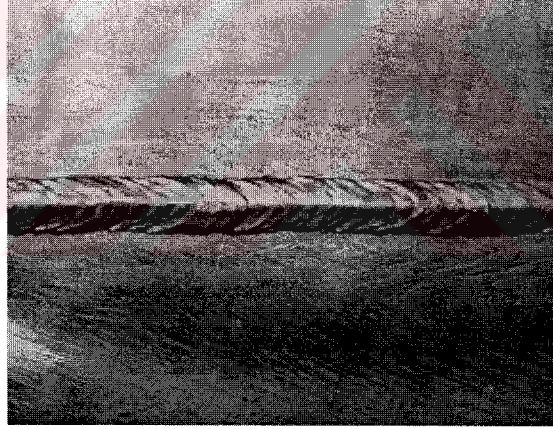
Yöntem, literatür taramaları ve ön denemeler sonucunda saptanan ilerleme hızı ve takım dönme devri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlerleme hızı, 12.5 cm/dak ve devir 1600 d/dak olarak uygulanmıştır.

Kaynak işlemi sırasında parçalar alın altına getirilerek arada boşluk kalmayacak şekilde ağızlanmış ve çelik lama pabuçlar ile rijit bir şekilde sabitlenmiştir (Şekil 6.7).

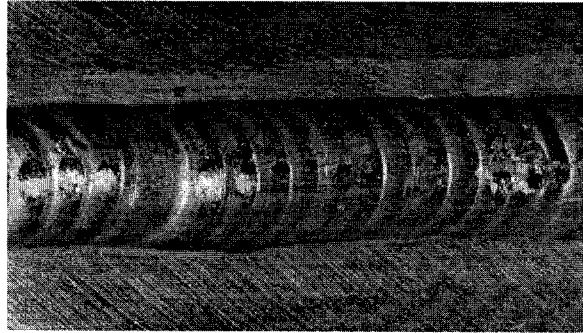
6.6. Kaynaklı levhaların görsel incelenmesi

Deney numunelerinin çıkarılacağı alın birleştirme bağlantılarında uygulanan kaynak işlemi sonrası görülebilecek yüzeysel hataları saptamak amacı ile görsel inceleme yapılmıştır. Bu incelemede, ANSI/AWS B1.11-88 (Guide for the Visual Inspection of Welds) esas alınmış ve incelemeler tüm kaynaklı parçalara uygulanmıştır.

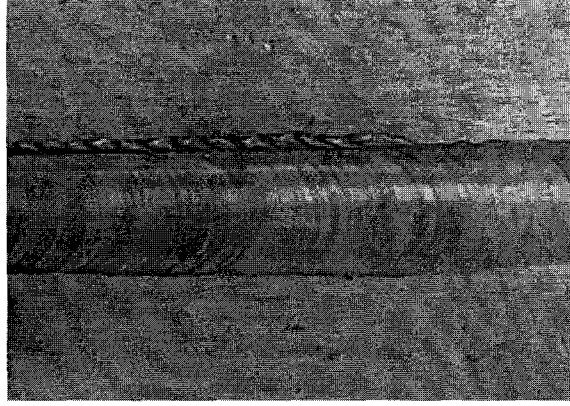
Kaynak sonrası oluşan dikiş yüksekliği, dikiş genişliği, dikişlerin tırtıl durumu, yanma olukları ve sıçramalar görsel olarak detaylı olarak incelenmiş olup özellikle sıçramaların ve diğer süreksizliklerin kabul sınırları içinde olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra, hataların kriterleri aştığı kısımlar olan kaynak başlangıç ve bitiş kısımları ıskartaya ayrılacak biçimde, deney numuneleri EN 288-4'te belirtilen plana göre çıkarılmıştır. Ayrıca, kaynaklı levhalarda ısı girdisi nedeniyle oluşabilen çarpılma miktarları da hassas olarak ölçülmüş ve görüntülenmiştir.



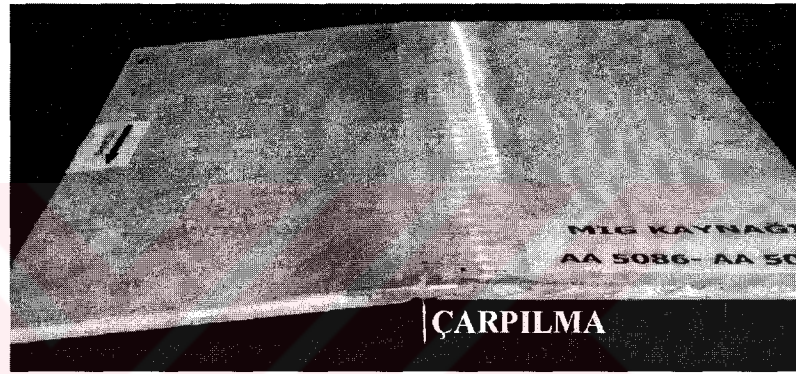
Şekil 6.10.- MIG kaynağı yapılmış bir deney parçasının dikiş görünümü.



Şekil 6.11.- TIG kaynağı yapılmış bir deney parçasında dikiş görünümü.



Şekil 6.12.- FSW kaynağı yapılmış bir deney parçasının dikiş görünümü.



Şekil 6.13-.Kaynaklı bir levhada gözlenen çarpılmaya ait bir örnek.

6.7. Deney Numunelerinin Hazırlanma Esasları

6.7.1. Deney numunelerinin kodlanması

MIG, TIG ve FSW yöntemleri kullanılarak kaynak edilmiş levhalardan çıkarılacak olan çekme, eğme ve metalografik inceleme, sertlik taraması numuneleri, belirli bir sistematik oluşturularak kodlanmışlardır. Bu kodlama sistemi aşağıda belirtildiği gibidir.

6.7.1.1. Kaynak yöntemi kodu

- M: MIG kaynağı
- T: TIG kaynağı
- F: FSW (Sürtünen eleman ile birleştirme) Kaynağı

6.7.1.2. Alüminyum alaşım türü

- 1: AW 5086
- 2: AW 5083

Daha önceden de belirtildiği üzere;

AW 5083- AW 5083 eş metal birleştirmesi

AW 5083- AW 5086 farklı metal birleştirmesi

AW 5086- AW 5086 eş metal birleştirmesi

yapılması esas alındığından, kaynak yöntemi kodunu takiben alaşım türleri eşleşme durumuna göre belirtilmiştir. Bu durumda;

M11: MIG kaynaklı, 1 kodlu eş alaşımları

M12: MIG kaynaklı, 1 ve 2 kodlu farklı alaşımları

M22: MIG kaynaklı, 2 kodlu eş alaşımları göstermektedir.

6.7.1.3. Deney türü

- C: Çekme Deneyi
- E: Eğme Deneyi
- EK: Kök Eğme
- EY: Yüz Eğme
- Met: Metalografik İnceleme

6.7.1.4. Numune sayısı

Deneylerin sağlıklı yürütülebilmesi ve deney sonuçlarının güvenilirliği ve irdelenmesi açısından, 1 adet kaynaklı levha için;

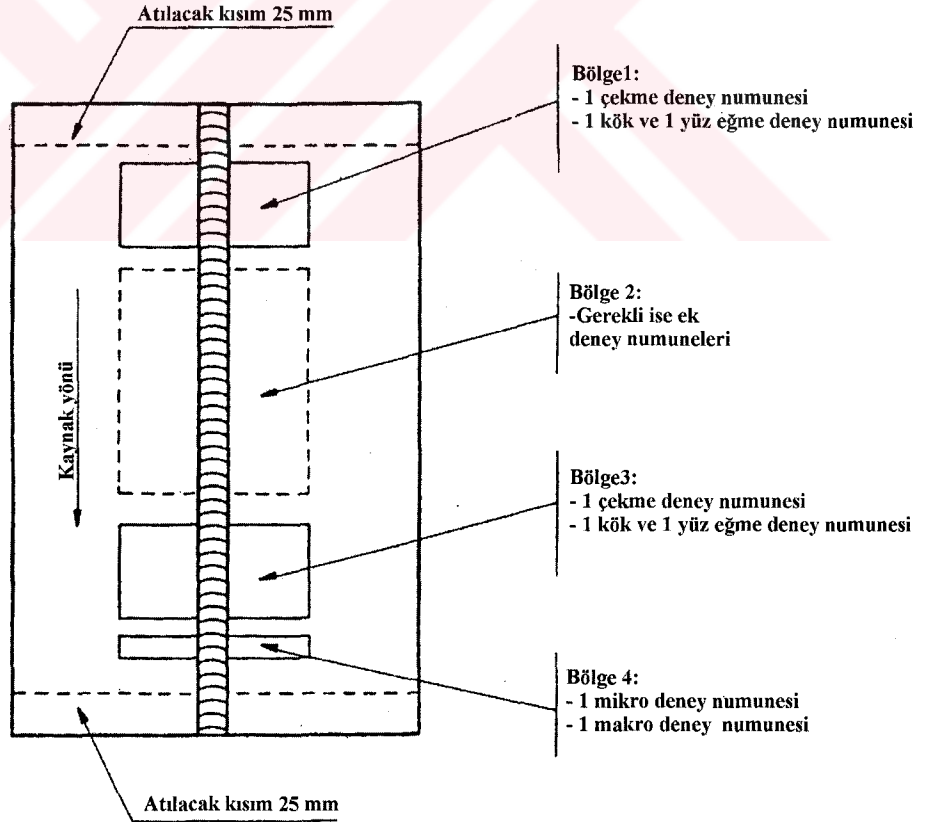
- 3 adet çekme numunesi
- 4 adet eğme numunesi

- 2 adet kök eğme numunesi
- 2 adet yüz eğme numunesi
- 2 adet metalografik inceleme numunesi çıkarılmıştır.

MIG, TIG ve FSW kaynaklı toplam 9 adet kaynaklı levhadan toplam 81 adet deney numunesi çıkarılarak, planlanan deneyler yapılmıştır.

6.7.2. Kaynaklı levhalardan deney numunelerinin çıkarılması

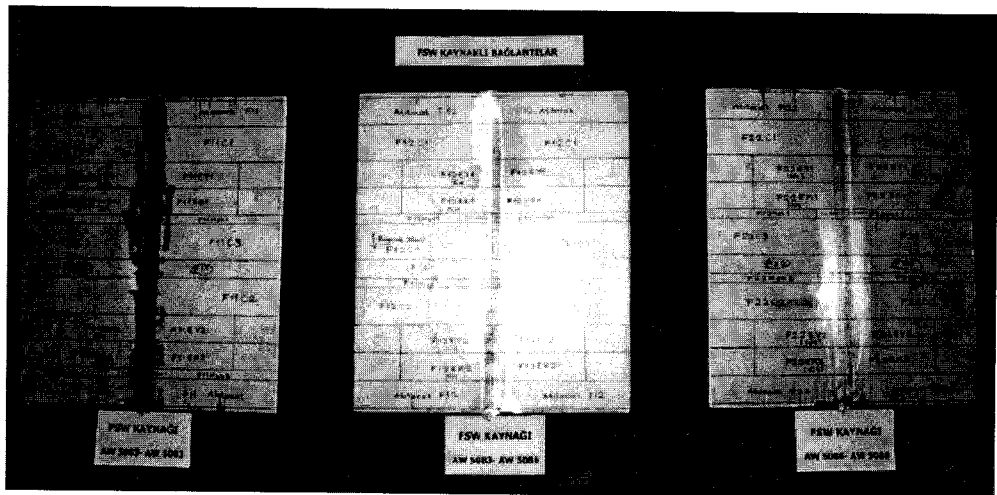
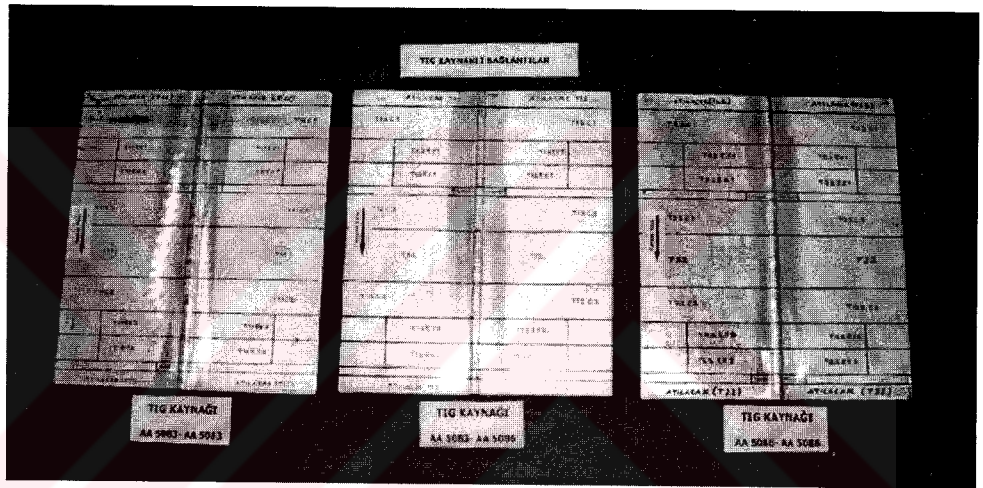
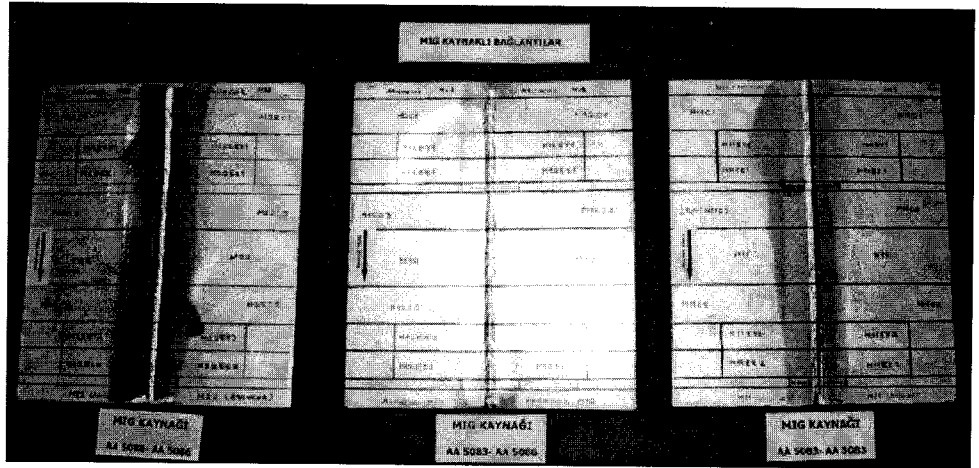
Deney numuneleri, kaynaklı levhalardan EN 288-4 standardı esas alınarak çıkarılmıştır. Numunelerin çıkarılmasında görsel incelemeler ile saptanan dikiş özellikleri de göz önüne alınmıştır. Kaynaklı levhaların başlangıç ve bitişinden 25 mm'lik kısımları kesilerek atılmış, böylece başlangıç ve bitişteki kaynak hataları ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır (Şekil 6.14, 6.15 ve 6.16).



Şekil 6.14.- EN 288-4'e göre kaynaklı levhalardaki numune dağılım planı.

Atılan kısım 25 mm	Atılan kısım 25 mm	350
Çekme deney numunesi 1	Çekme deney numunesi 1	
Eğme deney numunesi (yüz) 1	Eğme deney numunesi (yüz) 1	
Eğme deney numunesi (kök) 1	Eğme deney numunesi (kök) 1	
Metalografi numunesi 1	Metalografi numunesi 1	
Çekme deney numunesi 2	Çekme deney numunesi 2	
Gerektiğinde numune alınacak kısım	Gerektiğinde numune alınacak kısım	
Çekme deney numunesi 3	Çekme deney numunesi 3	
Eğme deney numunesi (yüz) 2	Eğme deney numunesi (yüz) 2	
Eğme deney numunesi (kök) 2	Eğme deney numunesi (kök) 2	
Metalografi numunesi 2	Metalografi numunesi 2	
Atılacak kısım 25 mm	Atılacak kısım 25 mm	
300		

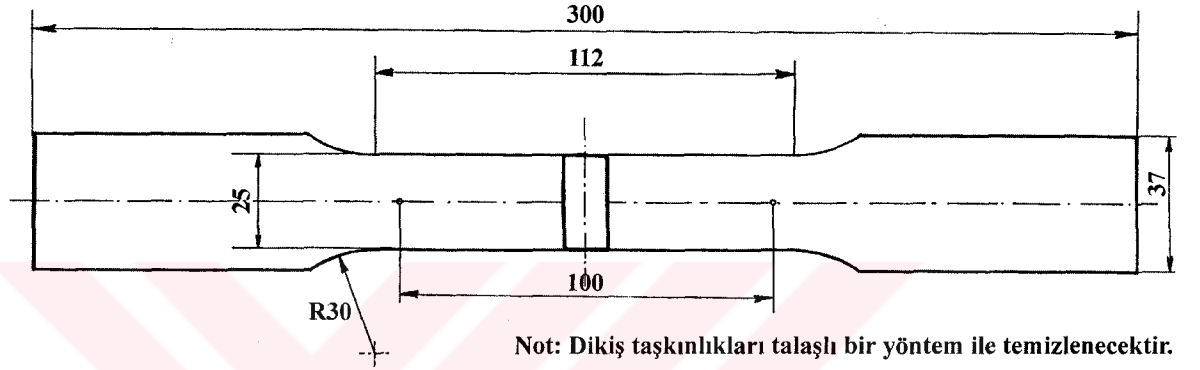
Şekil 6.15.- Kaynaklı levhalardan deney numunelerinin kodlanarak çıkarılması.



Şekil 6.16 a, b, c.- MIG, TIG ve FSW kaynaklı levhalardan numunelerin işaretlenmesine ait fotoğraflar.

6.7.2.1. Çekme deney numuneleri

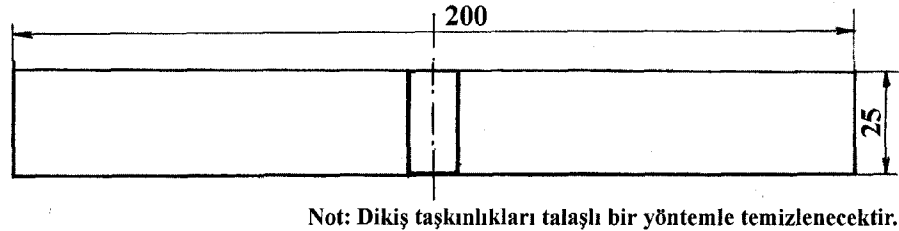
Kaynaklı levhalardan, belirlenen plana göre EN 895 standardına uygun olarak çekme deney numuneleri MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar için giyotin makas ile, FSW kaynaklı bağlantılar için testere ile kesilerek çıkarılmış, Şekil 6.17’de görülen ölçülerde freze tezgahı ile hazırlanmıştır. Kaynak dikiş taşkınlıkları taşlanarak parça yüzeyleri düzeltilmiştir.



Şekil 6.17.- EN 895’ e uygun olarak hazırlanmış çekme deney parçasının boyutları.

6.7.2.2. Eğme deney numuneleri

Kaynaklı levhalardan, belirlenen plana göre EN- 910 standardına uygun olarak, eğme deney numuneleri MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar için giyotin makas ile, FSW kaynaklı bağlantılar için testere ile kesilerek çıkarılmış, Şekil 6.18’de görülen ölçülerde freze tezgahında kenarları işlenerek hazırlanmıştır. Dikiş taşkınlıkları hassas olarak taşlanarak parça yüzeyleri düzeltilmiştir.



Şekil 6.18.- EN 910’ a uygun olarak hazırlanmış eğme deney parçası boyutları.

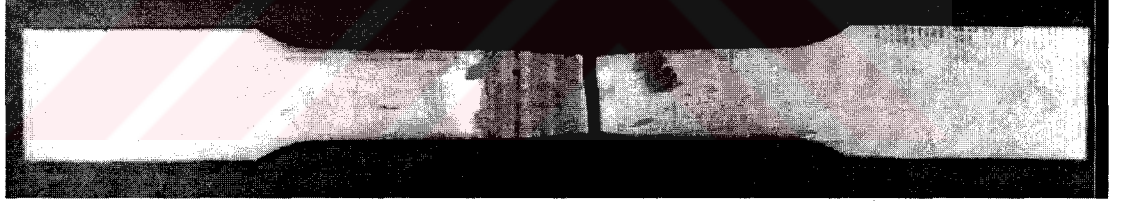
6.7.2.3. Metalografi incelemeleri ve sertlik taraması için numune hazırlanması

Kaynaklı levhalardan, belirlenen plana göre 10x 60 mm boyutlarında mekanik olarak kesilerek çıkarılan metalografik inceleme numuneleri, daha sonra metalografik numune kesme cihazında, yumuşak malzemeler için özel olarak üretilmiş kesme taşı ile hassas bir biçimde 10x 30 mm boyutlarına indirilmiştir.

6.8. Deneilerin Yapılışı

6.8.1. Çekme deneyleri

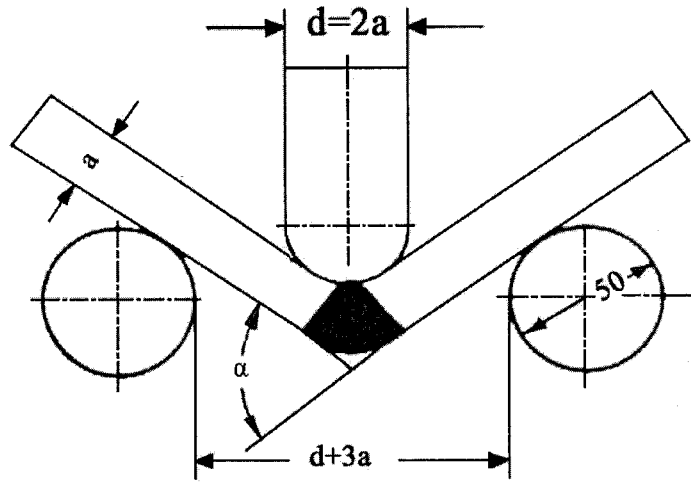
Çekme deneyleri için KOÜ. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Malzeme Laboratuvarındaki, maksimum 60 ton kapasiteli M9500 model DARTEC marka Universal çekme deneyi cihazı kullanılmıştır ve tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm sonuçlar, bilgisayar ortamında kaydedilmiş ve grafikler elde edilmiştir.



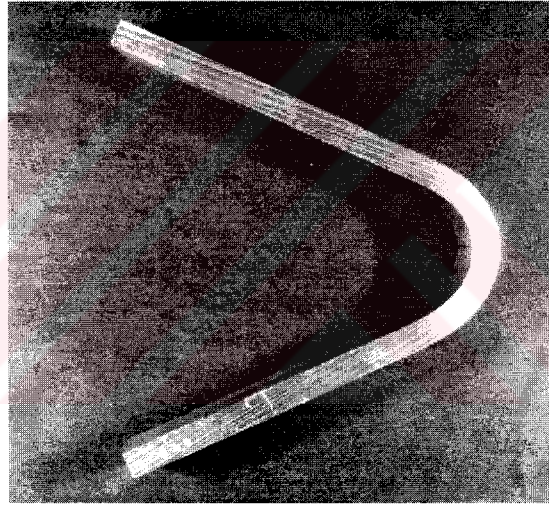
Şekil 6.19.- Çekme deneyi uygulanmış bir deney numunesi görüntüsü.

6.8.2. Eğme deneyleri

Eğme deneyleri, KOÜ. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında bulunan 40 ton kapasiteli ALŞA markalı cihaz kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 6.20.- Kaynak dikişlerinin eğme deneyi uygulanma prensibi



Şekil 6.21.- Eğme deneyi uygulanmış bir deney numunesi görüntüsü.

6.8.3. Metalografik inceleme deneyleri

Tüm kaynaklı bağlantılardan en gerçekçi sonuçları almak amacı ile metalografik deney numuneleri genel yapıyı temsil edebilecek şekilde seçilmiştir. Kesilerek hazırlanan numuneler sıcak bakalit alma cihazında bakalite alınmıştır.*

*METKON Sıcak Bakalit Kalıplama Presi, KOÜ. Mühendislik Fakültesi Makina Müh. Bölümü Metalografi Lab.

Daha sonra, numunelere zımparalama ve parlatma işlemini takiben tüm numuneler, modifiye edilmiş Keller ayırıcı kullanılarak ortalama 40 s. süre ile dağlanmışlardır. Ayıraç kalıntıları temizlenen numuneler önce makro fotoğraf çekimine **, sonra da mikroyapı incelemelerine*** tabi tutulmuşlardır. Tüm metalografik numunelerde esas metal, IEB ve kaynak metali büyütme oranı 50x ve 200x olmak üzere detaylı bir biçimde incelenmiş ve video- kamera aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılmış, Clemex Software- Canada kullanılarak analiz edilmiştir.

6.8.4. Vickers Sertlik Taraması

Tüm kaynaklı bağlantılardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde Vickers sertlik ölçme cihazı**** kullanılarak sertlik taraması yapılmıştır. Vickers sertlik taramaları, parça üst yüzeyinden 2 mm derinlikte 50 gr (HV 0.05) deney yükü uygulanarak esas metal, (TMEB- FSW kaynaklı numunelerde) IEB ve kaynak metali esas alınarak hat biçiminde 2 mm ve gerektiği durumlarda 1 mm aralıklarla, kaynak merkezinden sağa ve sola doğru gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.22.- Mikrosertlik taraması yapılmış bir deney numunesinin makro görüntüsü.

**Pentax K 1000- KOÜ. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı.

***Nikon Eclipse L 150 Metal Mikroskobu ve Clemex Görüntü Analiz Sistemi- KOÜ. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı.

**** Zwick Marka Vickers Sertlik Ölçme Cihazı- KOÜ. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı.

7. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ

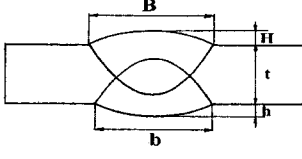
7.1. Görsel İnceleme Sonuçları

Deneyleerde kullanılacak olan numunelerin, kaliteli kaynak bölgelerinden seçilmesini amaçlayan ve tüm kaynaklı levhalar üzerinde kaynak sonrası gerçekleştirilen görsel incelemelerde ANSI/AWS B1.11-88 (Guide for the Visual Inspection of Welds) esas alınarak bu standardın öngördüğü sınırlarda kabuller yapılmıştır.

Öncelikle, incelenen çift taraftan kaynak edilmiş olan MIG kaynaklı bağlantıların hemen hemen hiçbirinin kaynak dikişinde yanma oluşu hatası görülmemesine karşın yalnızca M11 kodlu levha üzerinde çok az bir bölgede, mukavemet değerlerini etkilemeyecek ölçüde kesintili türde yanma oluşu saptanmıştır. Sıçramalar, yönergelerin öngördüğü sınırlar dahilinde olup kaynaktan sonra taşlanarak mekanik olarak temizlenmiştir. Kaynak dikişlerinde herhangi bir süreksizlik izlenmemiştir, kaynak dikiş tırtılı oldukça düzgün ve kaliteli bir kaynak dikişi görünüşü göstermiştir.

Tüm MIG kaynaklı bağlantılarda, kaynak dikiş boyutları 50 mm aralıklarla ölçülmüş olup sonuçlar normaldir ve tüm ölçme sonuçları Tablo 7.1’de verilmiştir. En büyük açılma miktarları MIG kaynaklı olan bu bağlantılarda görülmüş, (Şekil 7.1), değerler Tablo 7.2’de özetlenmiştir.

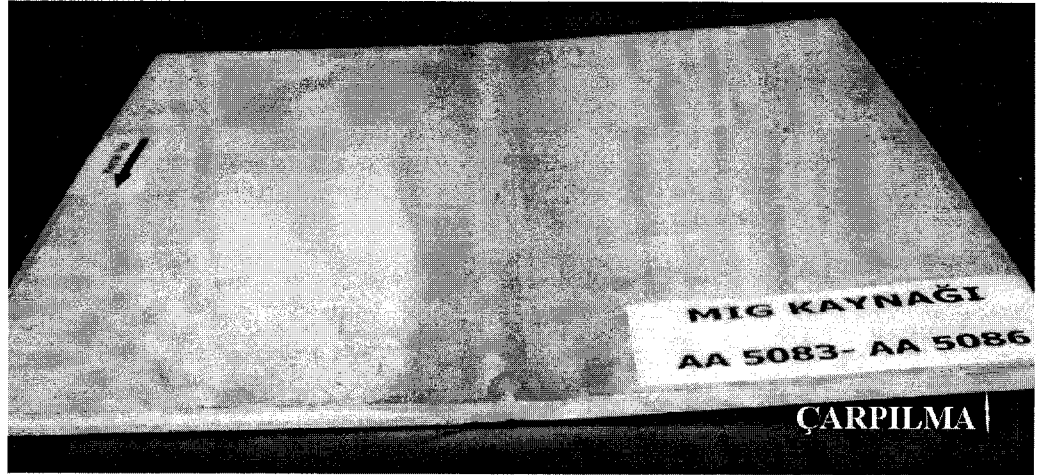
Tablo 7.1.- MIG kaynaklı bağlantılarda kaynak dikiş boyutları.



The diagram shows a cross-section of a MIG welded joint. Two plates of thickness t are joined by a weld. The weld has a width B at the top, a width b at the bottom, and a height H from the top surface to the bottom surface. The thickness of the plates is t . The total thickness of the joint is $2t$.

$t = 6.45$

Numune Kodu	B	H	b	h	Nufuziyet= H+h+t
M11	11.67	1.23	11.24	1.40	9.08
M12	11.04	1.48	10.82	1.21	9.14
M22	10.51	1.22	10.92	1.05	8.72



Şekil 7.1.- MIG kaynaklı bağlantılarda çarpılma örneği.

Tablo 7.2.- MIG kaynaklı bağlantılarda çarpılma miktarları

Numune Kodu	Çarpılma Miktarı
M11 ÜST YÜZ	7.7
M12 ÜST YÜZ	8.95
M22 ÜST YÜZ	14.75
M11 KÖK	8.5
M12 KÖK	8.1
M22 KÖK	18.35

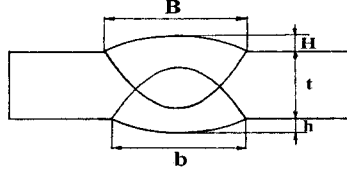
Çift taraftan kaynak edilmiş olan TIG kaynaklı bağlantıların da hemen hemen hiçbirinin kaynak dikişinde yanma oluşu hatası görülmemesine karşın yalnızca T22 kodlu levha üzerinde çok az bir bölgede, mukavemet değerlerini etkilemeyecek ölçüde kesintili yanma oluşu saptanmıştır.

Sıçramalar, standard ve yönergelerin öngördüğü sınırlar dahilinde olup kaynaktan sonra taşlanarak mekanik olarak temizlenmiştir. Kaynak dikişlerinde herhangi önemli bir süreksizlik izlenmemiştir, kaynak dikiş tırtılı oldukça düzgündür.

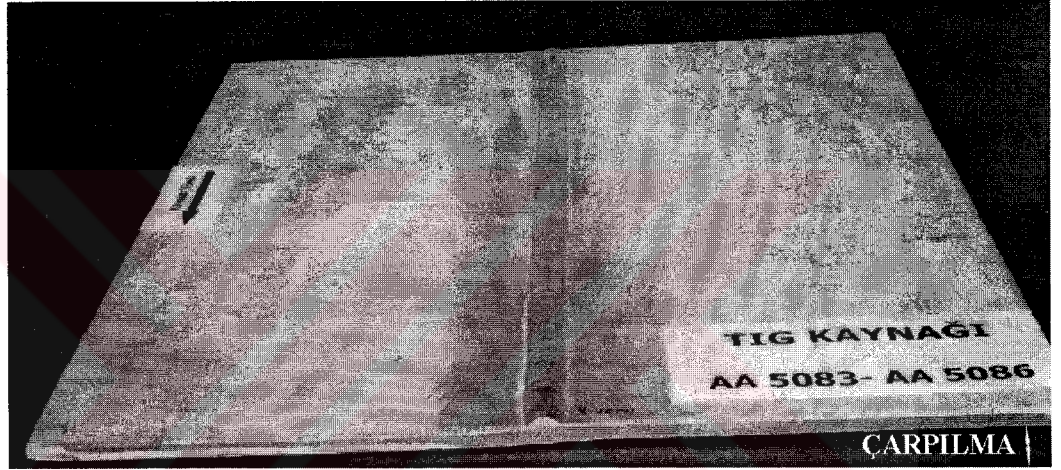
Tüm TIG kaynaklı bağlantılarda kaynak dikiş boyutları 50 mm aralıklarla ölçülmüş olup sonuçlar normaldir ve tüm ölçme sonuçları Tablo 7.3'de verilmiştir. TIG kaynaklı bağlantılardaki açılma çarpılma miktarları MIG kaynaklı bağlantılara göre daha azdır, değerler Tablo 7.4'de özetlenmiştir.

Tablo 7.3.- TIG kaynaklı bağlantılarda kaynak dikiş boyutları

t= 6.45



Numune Kodu	B	H	b	h	Nufuziyet= H+h+t
T11	10.57	1.68	11.26	0.92	9.05
T12	10.32	1.77	11.32	0.87	9.09
T22	10.83	1.71	11.22	1.02	9.18



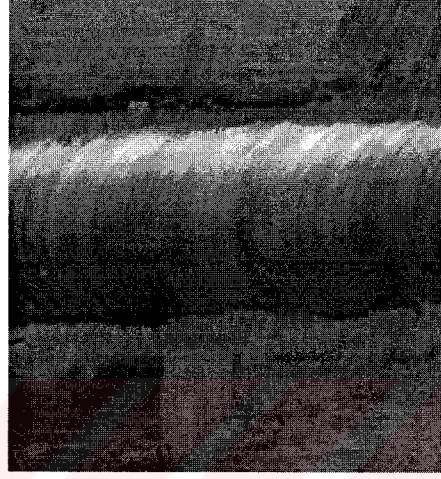
Şekil 7.2.- TIG kaynaklı bağlantılarda çarpılmaya bir örnek.

Tablo 7.4.- TIG kaynaklı bağlantılarda çarpılma miktarları.

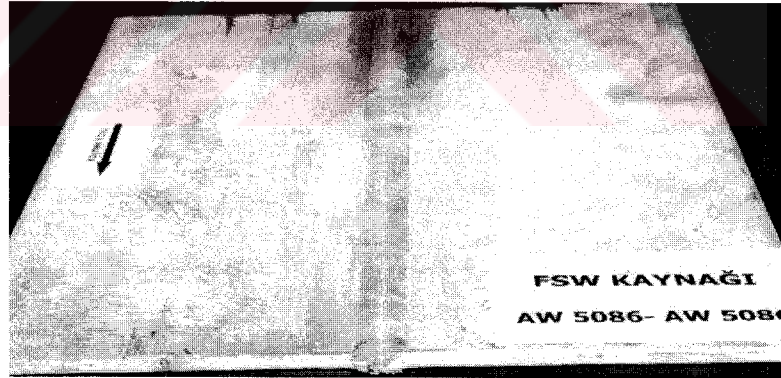
Numune Kodu	Çarpılma Miktarı
T11 ÜST YÜZ	6.65
T12 ÜST YÜZ	1.6
T22 ÜST YÜZ	1.2
T11 KÖK	1.17
T12 KÖK	1.2
T22 KÖK	1.15

FSW bağlantılarının görsel incelemelerinde, dikiş görünümü takımın açılı ilerlemesine bağlı olarak yarı dairesel halkalar biçiminde olmakla birlikte, bazı yerlerde oldukça sık ve parlaktır. Takım omuz çapına bağlı olarak dikiş genişlikleri 20 mm ve homojendir. Yalnızca başlangıçta yaklaşık 20-30 mm'lik kısım, başlangıç

plakası kullanılmadığından dolayı düşük boyutludur ve omuz çapı ölçüsüne doğru normal bir genişleme göstermiştir. Alt ve üst kaynak dikişlerinin çökme miktarı en çok 0.5 mm olmakla beraber normaldir (Şekil 7.3). FSW yöntemi ile birleştirilmiş tüm levhalarda çarpılmaya rastlanmamıştır (Şekil 7.4). Kaynaktan sonra mekanik özellikleri etkilemeyecek ölçüde yalnızca yüzey temizleme amacı ile çok az bir miktarda taşlama işlemi yapılmıştır.



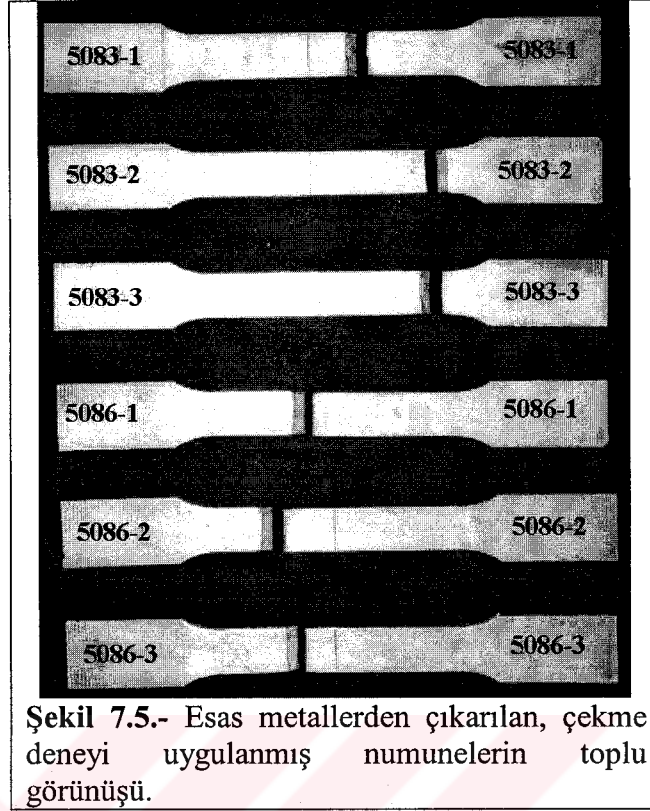
Şekil 7.3.- FSW yöntemi uygulanarak kaynak edilmiş bir bağlantıdan alınmış dikiş görünümü.



Şekil 7.4.-FSW yöntemi uygulanarak kaynak edilmiş bir deney parçasında çarpılma oluşmadığını gösterir fotoğraf.

7.2. Çekme Deneyi Sonuçları

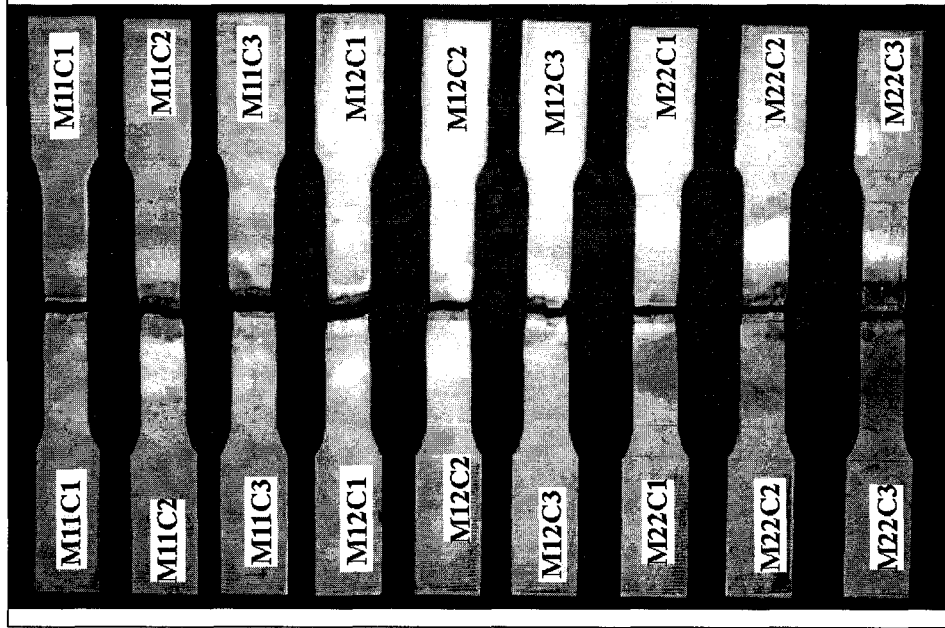
Esas metaller ve üç ayrı kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deney numuneleri üzerinde çekme deneyi sonrası oluşan kopma biçimleri Şekil 7.5, 7.6, 7.7 ve 7.8' de görülmektedir.



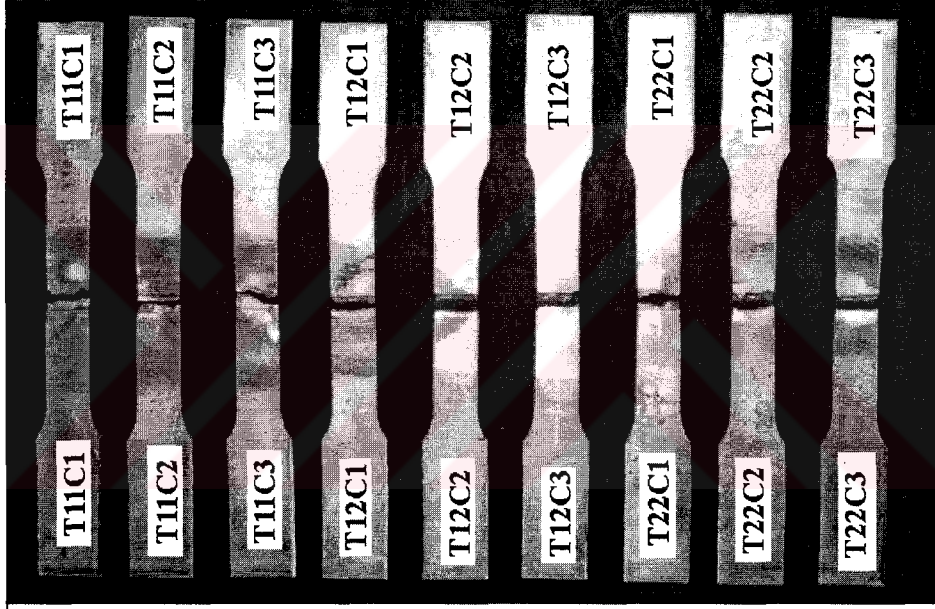
MIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama miktarı ve kopmanın olduğu yeri belirten sonuçlar Tablo 7.5'te özetlenmiştir.

Tablo 7.5.- MIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları.

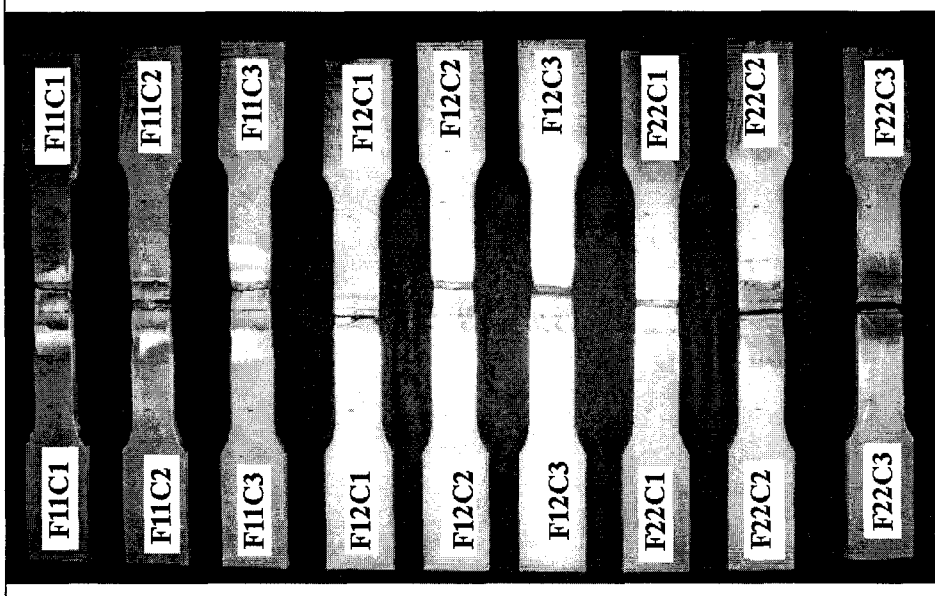
Parça No.	$R_{p0.2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	Uzama (%)	Kopma Yeri
M11 C1	172	271	2.8	Kaynak Metali
M11 C2	170	273	3.1	Kaynak Metali
M11 C3	172	273	3.3	Kaynak Metali
M11 ORT.	171	272	3.06	
M12 C1	173	281	3.4	Kaynak Metali
M12 C2	185	285	2.9	Kaynak Metali
M12 C3	184	283	3.4	Kaynak Metali
M12 ORT.	181	283	3.2	
M22 C1	178	281	6.8	Kaynak Metali
M22 C2	177	286	7.4	Kaynak Metali
M22 C3	178	278	6.6	Kaynak Metali
M22 ORT.	177	282	6.93	Kaynak Metali



Şekil 7.6.- MIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deneyi uygulanmış numuneler.

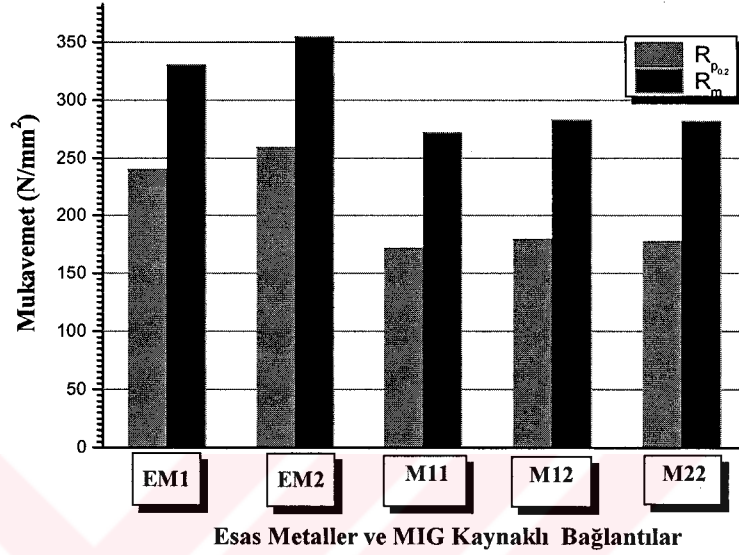


Şekil 7.7.- TIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deneyi uygulanmış numuneler.



Şekil 7.8.- FSW kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deneyi uygulanmış numuneler.

MIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deney numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen akma mukavemeti ve çekme mukavemet değerleri, esas metallerin akma ve çekme mukavemet değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.9'daki grafikte verilmiştir.



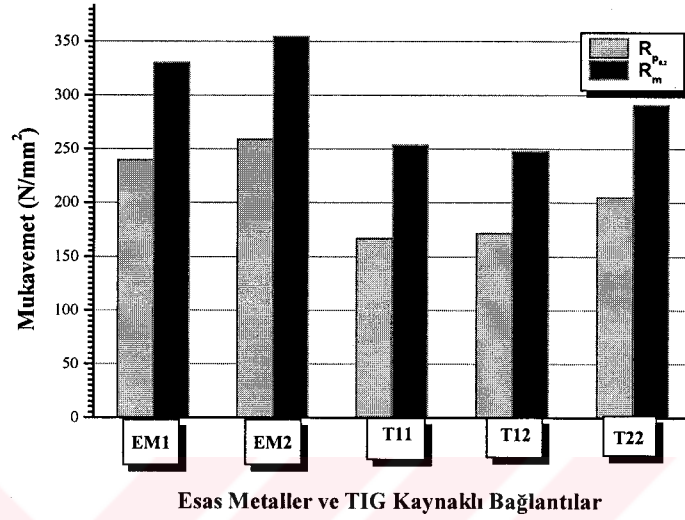
Şekil 7.9.- MIG kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin esas metallerle karşılaştırılması.

TIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama miktarı ve kopmanın olduğu yeri belirten sonuçlar Tablo 7.6' da özetlenmiştir.

Tablo 7.6.- TIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları.

Parça No.	R _{p0.2} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	Uzama (%)	Kopma Yeri
T11 C1	170	251	4.6	Kaynak Metali
T11 C2	176	280	5.2	Kaynak Metali
T11 C3	156	230	5.1	Kaynak Metali
T11 ORT.	167	254	4.96	
T12 C1	171	247	4.7	Kaynak Metali
T12 C2	174	223	4.3	Kaynak Metali
T12 C3	171	273	5.0	Kaynak Metali
T12 ORT.	172	248	4.66	
T22 C1	205	288	8.	Kaynak Metali
T22 C2	210	296	8.81	Kaynak Metali
T22 C3	201	290	8	Kaynak Metali
T22 ORT.	205	291	8.03	

TIG kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme deney numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen akma mukavemeti ve çekme mukavemet değerleri, esas metallerin akma ve çekme mukavemet değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.10'daki grafikte gösterilmiştir.



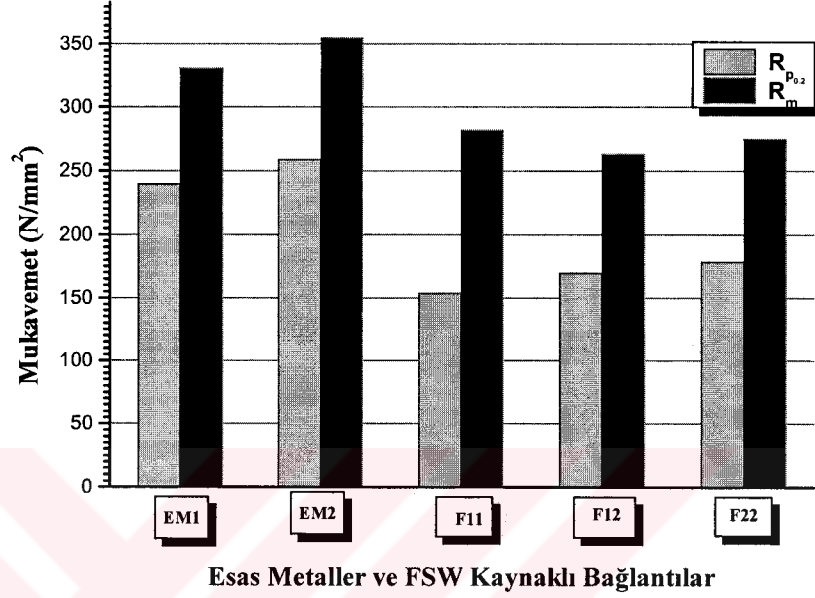
Şekil 7.10.- TIG kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin esas metal ile karşılaştırılması.

FSW yöntemi uygulanmış bağlantılarından çıkarılan çekme numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama miktarı ve kopmanın olduğu yeri belirten sonuçlar Tablo 7.7'de özetlenmiştir

Tablo 7.7.- FSW bağlantılarının çekme deneyi sonuçları.

Kaynak Numunesi	$R_{p0.2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	Uzama (%)	Kopma Yeri
F11 C1	154	282	12.9	TMEB
F11 C2	154	283	13.8	Kaynak Metali
F11 C3	154	282	14.6	TMEB
F11 ORT.	154	282	13.7	
F12 C1	165	214	14.4	Kaynak Metali
F12 C2	170	287	11.1	TMEB
F12 C3	175	288	12.4	TMEB
F12 ORT.	170	263	12.63	
F22 C1	114(sapma)	154(sapma)	6.4	Kaynak Metali
F22 C2	194	300	5.2	TMEB
F22 C3	164	250	2.8	TMEB
F22 ORT.	179	275	4.8	

FSW bağlantılarından çıkarılan çekme deney numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen akma mukavemeti ve çekme mukavemet değerleri, esas metallerin akma ve çekme mukavemet değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7.11'deki grafikte gösterilmiştir.

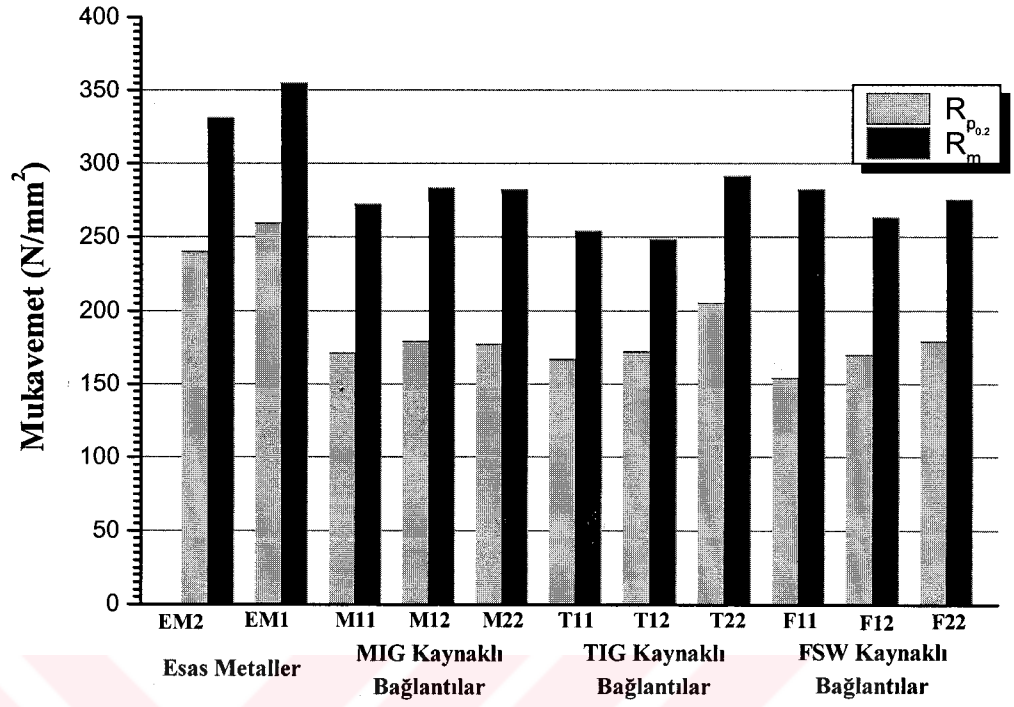


Şekil 7.11.- FSW bağlantılarının mekanik özelliklerinin esas metaller ile karşılaştırılması.

Tüm kaynaklı bağlantılar ile esas metallerin mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 7.12' de verilmektedir.

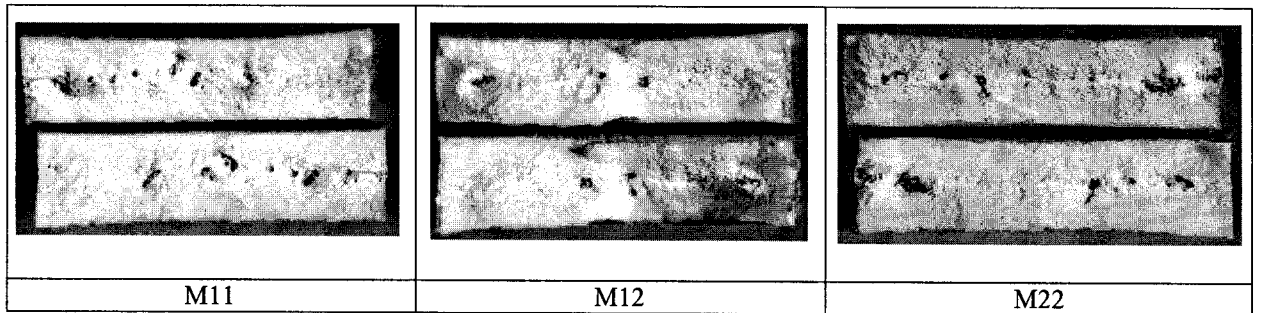
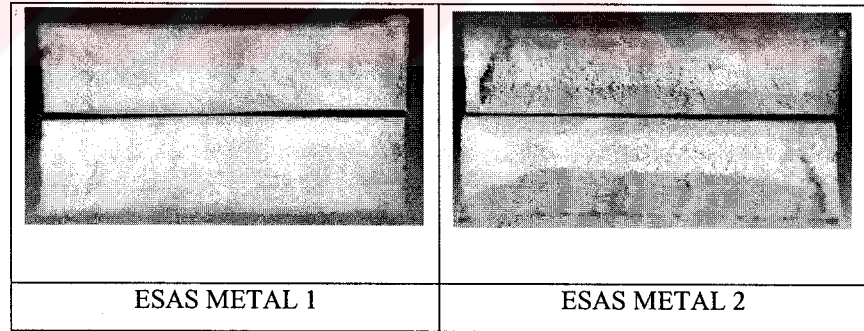
Esas metaller ile MIG, TIG ve FSW yöntemleri kullanılarak kaynak edilmiş levhalardan çıkarılan çekme deney numunelerine uygulanan çekme işlemi sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerine ait görüntüler Şekil 7.13, 7.14 ve 7.15'de görülmektedir.

MIG, TIG ve FSW yöntemleri kullanılarak kaynak edilmiş numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri Bölge 1 ve Bölge 2 yüzeyleri dikkate alınarak, MIG kaynaklı bağlantılar için Şekil 7.16'da, TIG kaynaklı bağlantılar için Şekil 7.17'de ve FSW bağlantıları için de Şekil 7.18 'de verilmektedir.

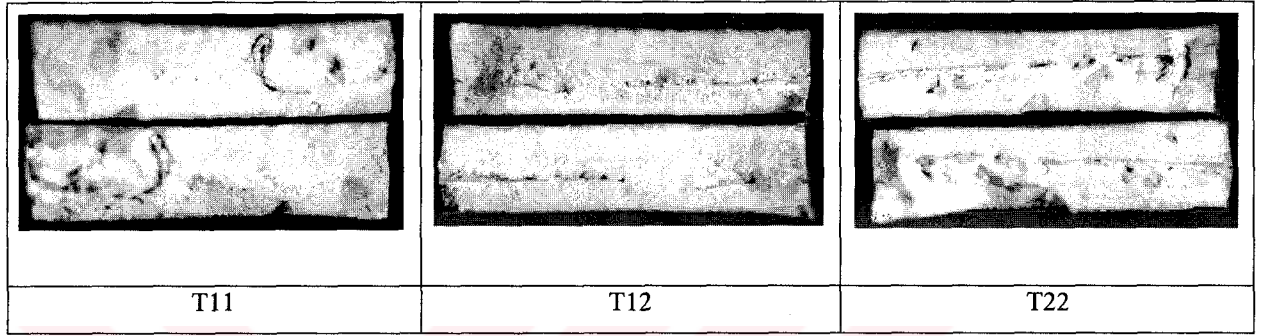
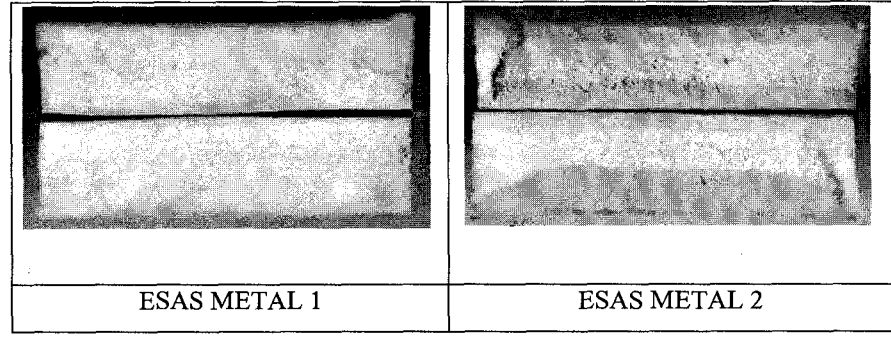


Esas Metaller ve Kaynaklı Bağlantılar

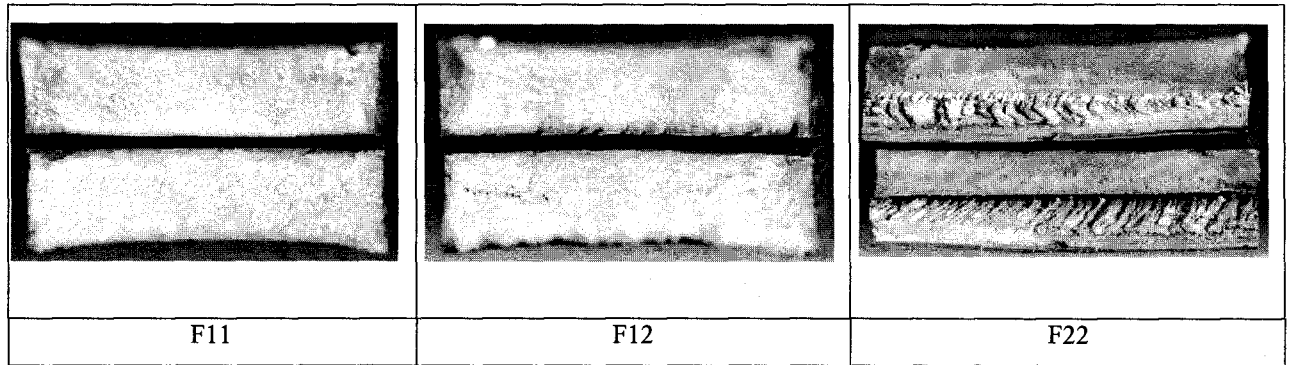
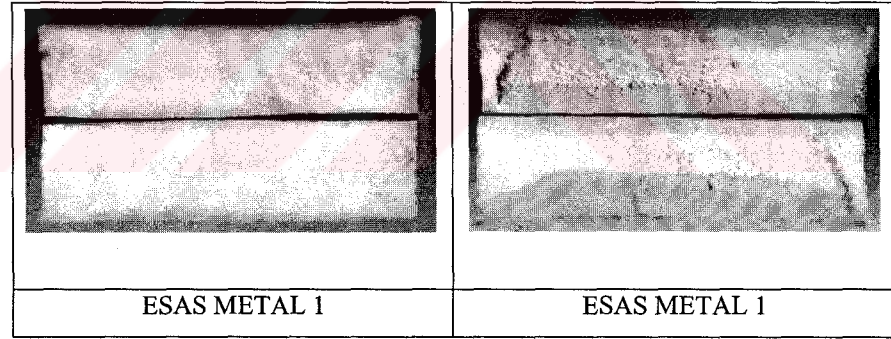
Şekil 7.12.- Tüm kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin esas metaller ile karşılaştırılması.



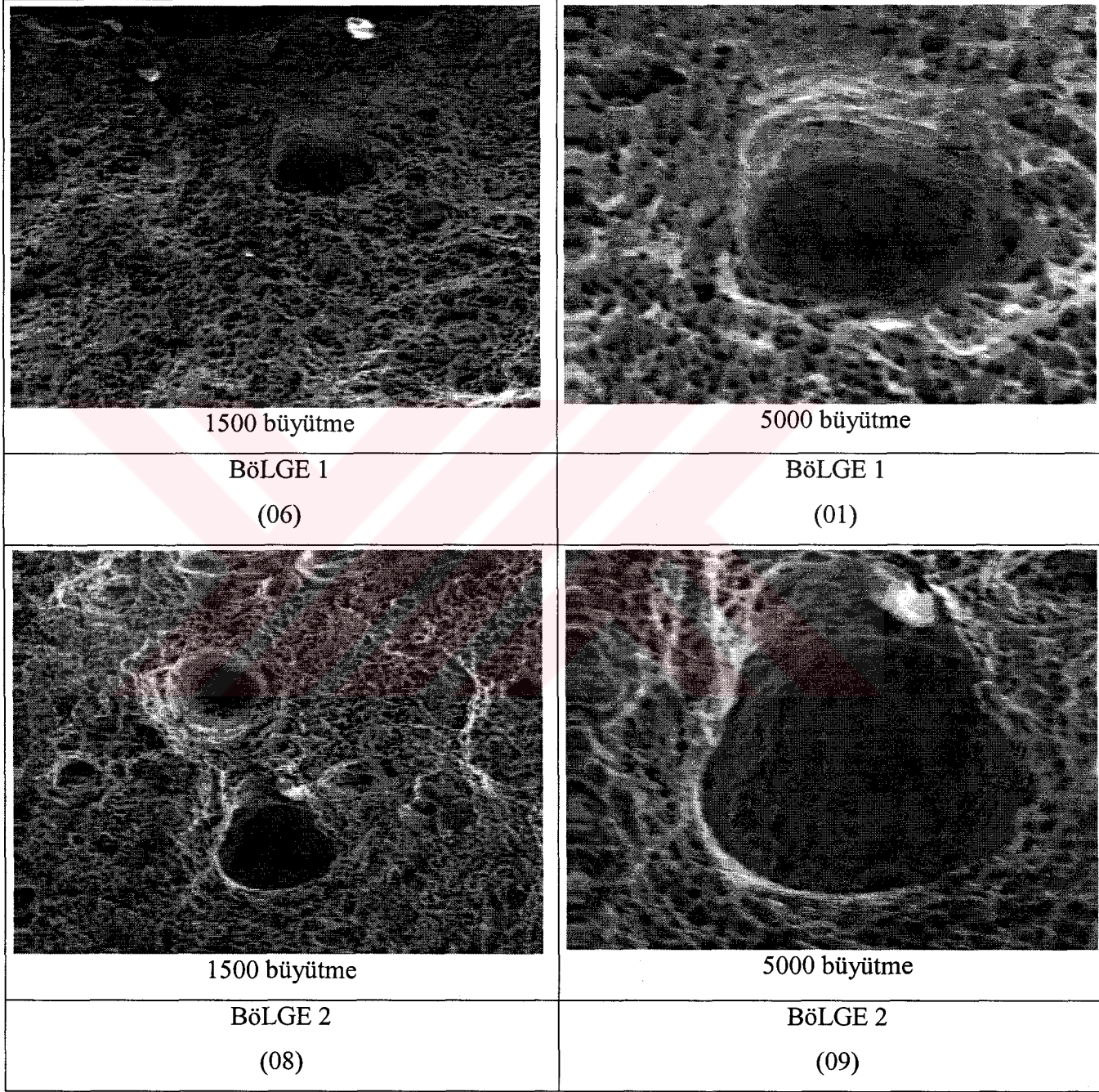
Şekil 7.13.- MIG kaynaklı bağlantılara ait kırılma yüzeyleri ve esas metal kırılma yüzeyleriyle karşılaştırması.



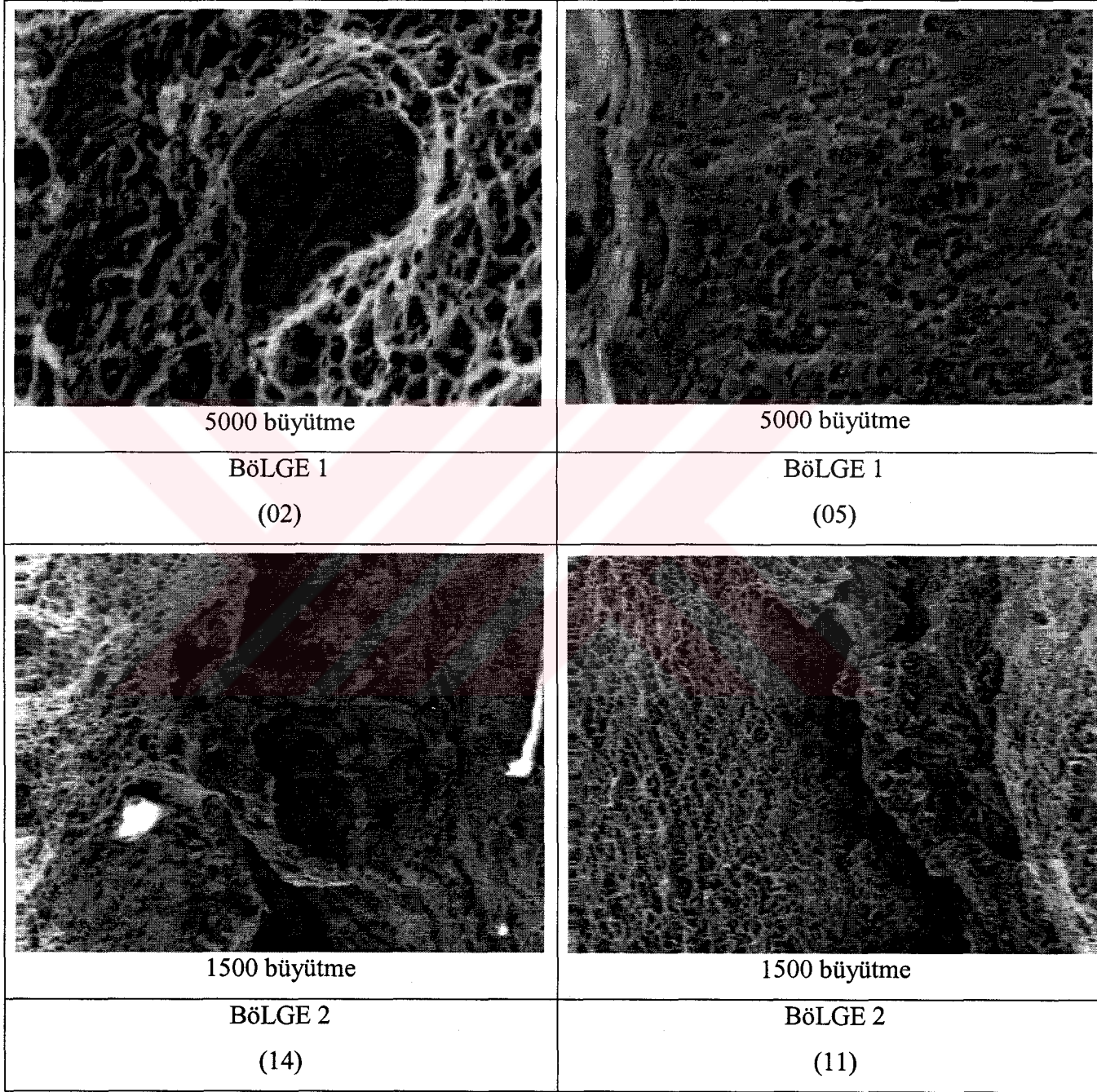
Şekil 7.14.- TIG kaynaklı bağlantılara ait kırılma yüzeyleri ve esas metal kırılma yüzeyleriyle karşılaştırması.



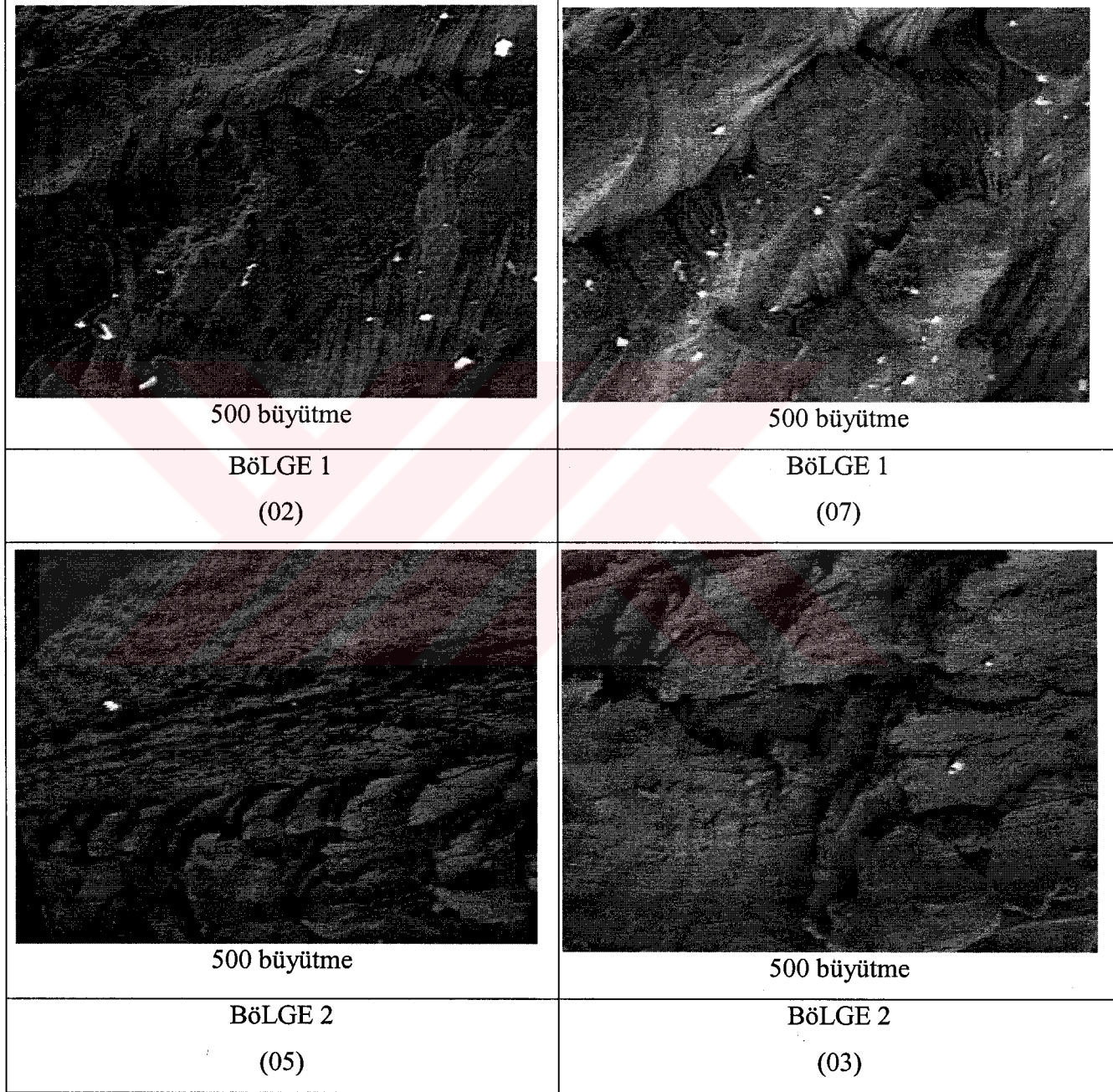
Şekil 7.15.- FSW yöntemi ile kaynak edilmiş bağlantılara ait kırılma yüzeyleri ve esas metal kırılma yüzeyleriyle karşılaştırması.



Şekil 7.16.- MIG kaynaklı bağlantıların (M11 kodlu numunenin) kırılma yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.



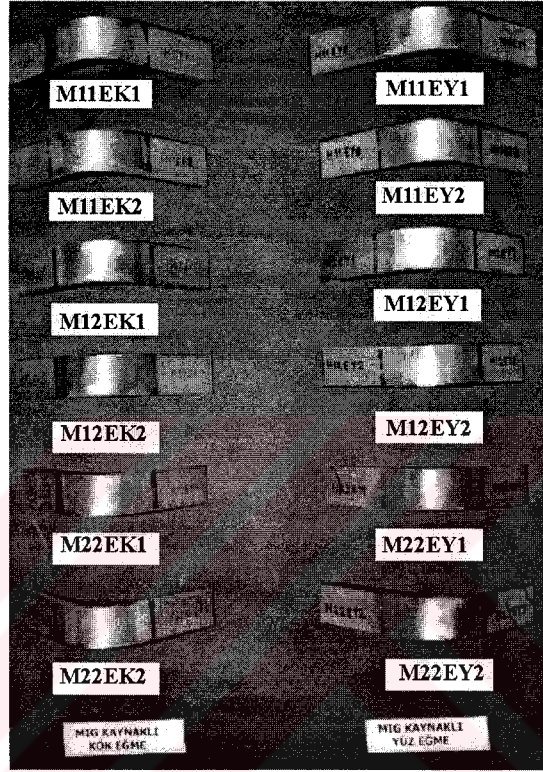
Şekil 7.17.- TIG kaynaklı bağlantıların (T22 kodlu numunenin) kırılma yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.



Şekil 7.18.- FSW kaynaklı bağlantıların (F22 kodlu numunenin) kırılma yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

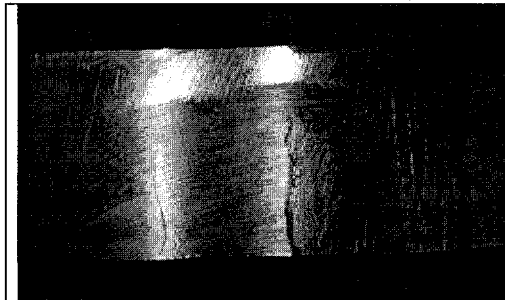
7.3. Eğme Deneyi Sonuçları

MIG, TIG ve FSW ile kaynak edilmiş levhalardan çıkarılan eğme numunelerine uygulanan kök eğme ve yüz eğme deneylerinde elde edilen sonuçlar Şekil 7.19, 7.22 ve 7.23' de görülmektedir.



Şekil 7.19.- MIG kaynaklı numunelerin kök eğme ve yüz eğme deney sonuçları.

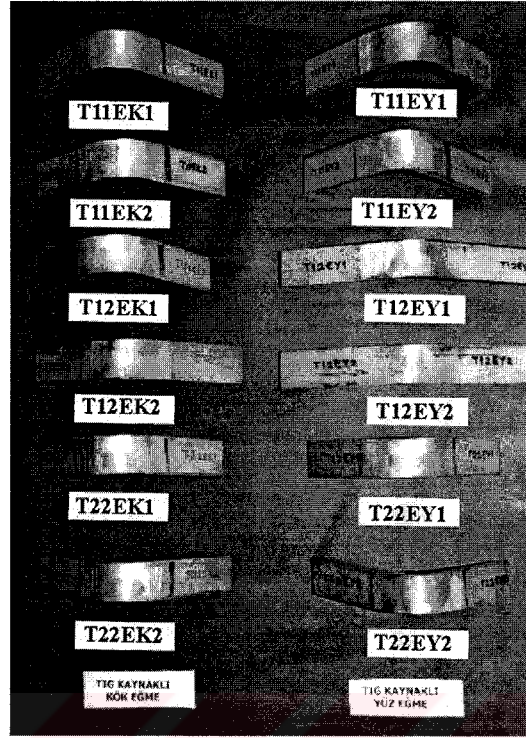
MIG ve TIG kaynaklı bağlantılarda eğme deneyi sonucu gözlenen çatlama ve yanma olukları Şekil 7.20 ve Şekil 7.21' de gösterilmektedir.



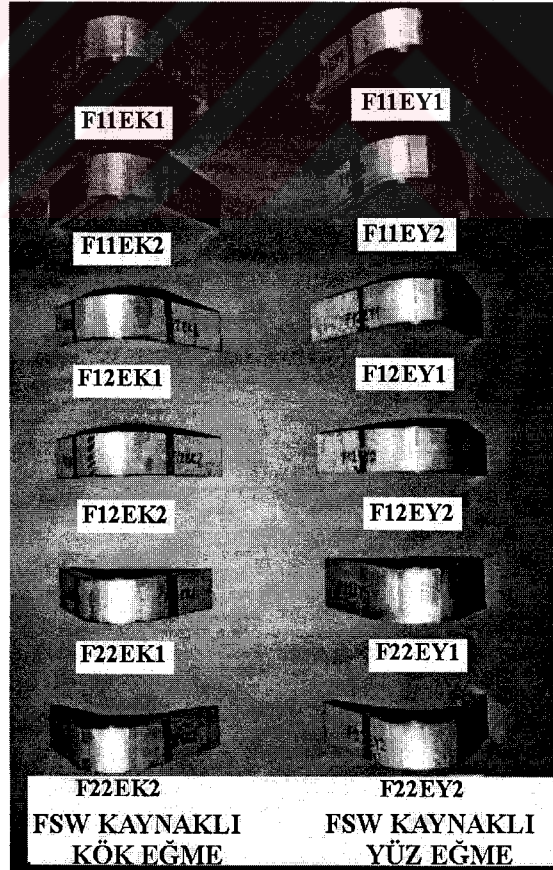
Şekil 7.20.- MIG kaynaklı bir bağlantıda eğme deneyi sonucu gözlenen hata.



Şekil 7.21.- TIG kaynaklı bir bağlantıda eğme deneyi sonucu gözlenen hata.



Şekil 7.22.- TIG kaynaklı numunelerin kök eğme ve yüz eğme sonuçları.



Şekil 7.23.- FSW yöntemiyle kaynak edilmiş numunelerin kök eğme ve yüz eğme deney sonuçları.

Tablo 7.8.- MIG kaynaklı bağlantılara ait eğme deney sonuçları.

Numune Kodu	Sonuç
M11 EY1	Çatlama görülmedi
M11 EK1	Çatlama gözlemlendi
M11 EY2	Çatlama görülmedi
M11 EK2	Çatlama görülmedi
M12 EY1	Çatlama görülmedi
M12 EK1	Çatlama görülmedi
M12 EY2	Çatlama görülmedi
M12 EK2	Çatlama görülmedi
M22 EY1	Çatlama görülmedi
M22 EK1	Çatlama görülmedi
M22 EY2	Çatlama görülmedi
M22 EK2	Çatlama görülmedi

Tablo 7.9.- TIG kaynaklı bağlantılara ait eğme deneyi sonuçları.

Numune Kodu	Sonuç
T11 EY1	Çatlama gözlemlendi
T11 EK1	Çatlama gözlemlendi
T11 EY2	Çatlama görülmedi
T11 EK2	Çatlama görülmedi
T12 EY1	Çatlama gözlemlendi
T12 EK1	Çatlama görülmedi
T12 EY2	Çatlama gözlemlendi
T12 EK2	Çatlama gözlemlendi
T22 EY1	Çatlama görülmedi
T22 EK1	Çatlama görülmedi
T22 EY2	Yanma oluşu gözlemlendi
T22 EK2	Çatlama gözlemlendi

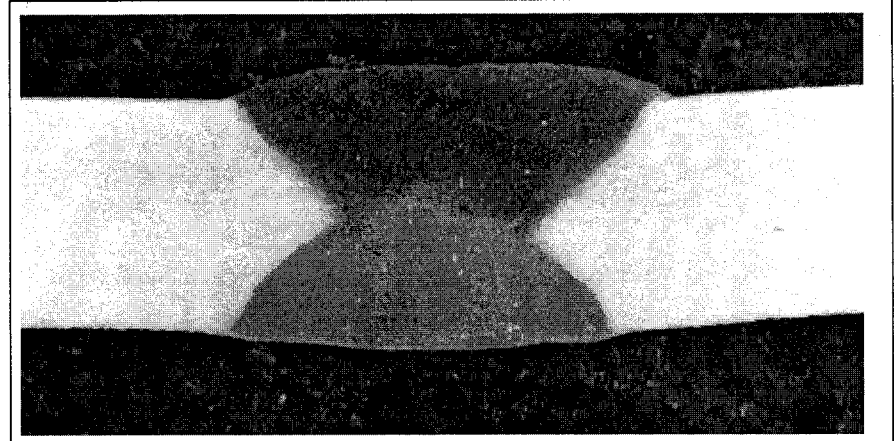
Tablo 7.10.- FSW bağlantılarına ait eğme deneyi sonuçları.

Numune Kodu	Sonuç
F11 EY1	Çatlama görülmedi
F11 EK1	Çatlama görülmedi
F11 EY2	Çatlama görülmedi
F11 EK2	Çatlama görülmedi
F12 EY1	Çatlama görülmedi
F12 EK1	Çatlama görülmedi
F12 EY2	Çatlama görülmedi
F12 EK2	Çatlama görülmedi
F22 EY1	Çatlama görülmedi
F22 EK1	Çatlama görülmedi
F22 EY2	Çatlama görülmedi
F22 EK2	Çatlama görülmedi

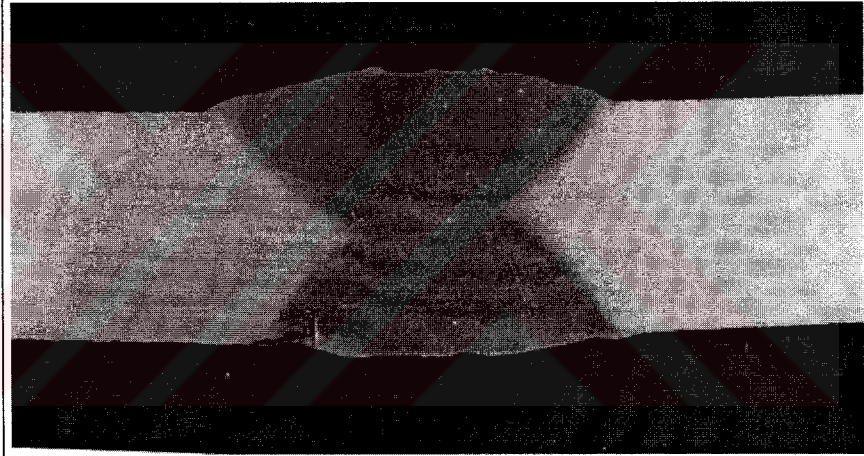
7.4. Metalografik İnceleme Sonuçları

Her üç kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bağlantılardan alınan numuneler üzerinde kaynak bölgeleri metalografik olarak detaylı bir biçimde incelenmiştir. Makroyapı ve mikroyapı incelemeleri ayrı ayrı yapılmış olup MIG, TIG ve FSW

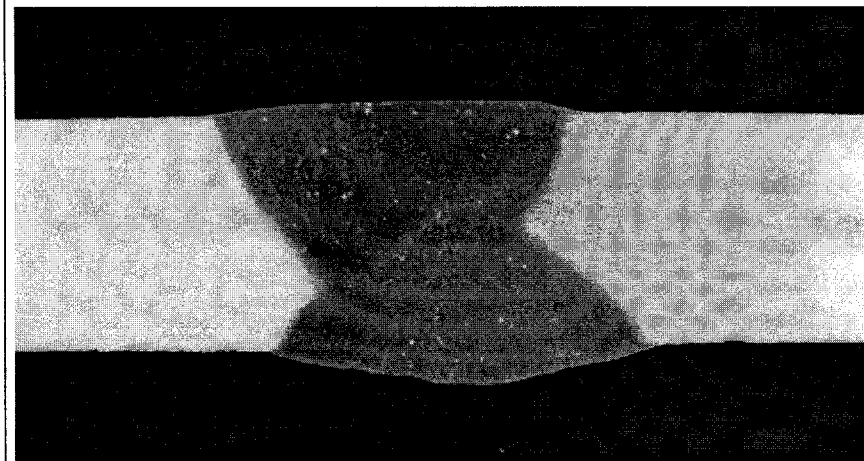
kaynaklı bağlantılara ait makroyapı görüntüleri Şekil 7.24, 7.25 ve 7.26'da toplu olarak verilmektedir.



M11

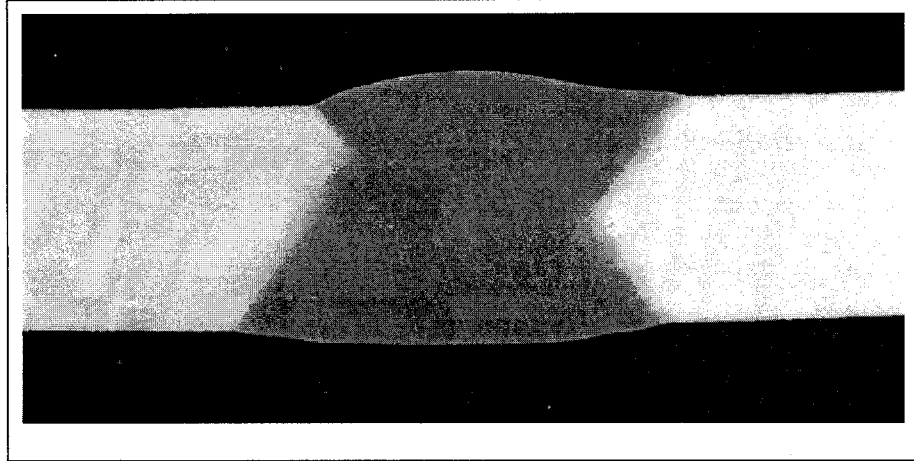


M12

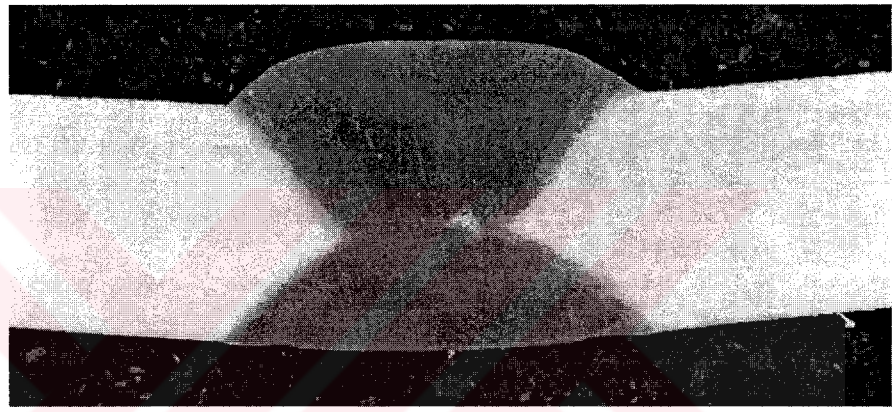


M22

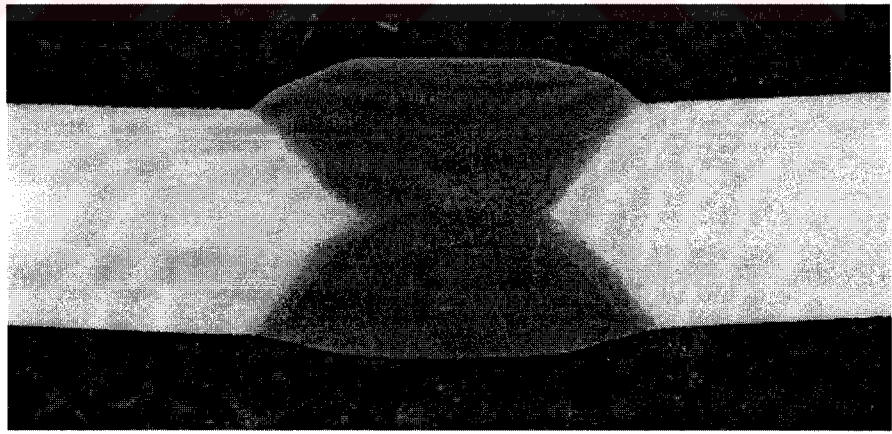
Şekil 7.24.- MIG kaynaklı bağlantılara ait makroyapı görüntüleri.



T11

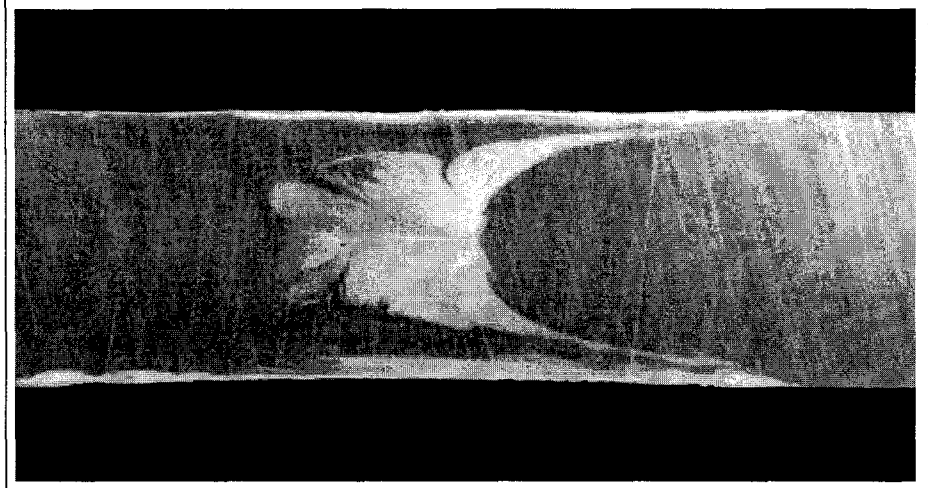


T12

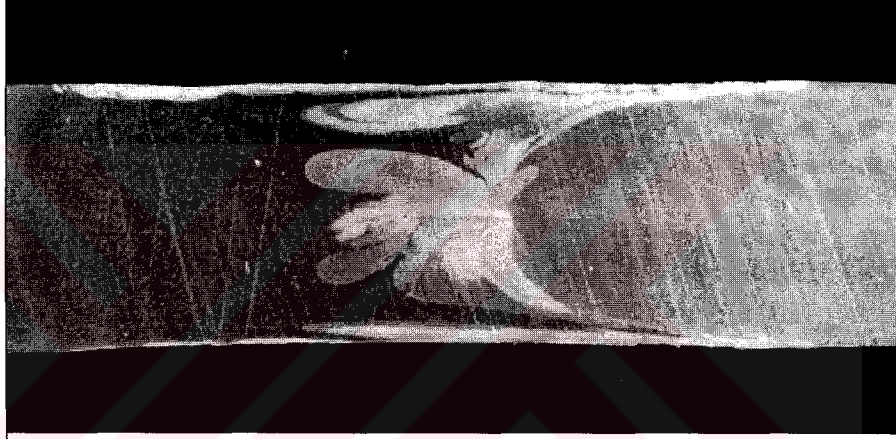


T22

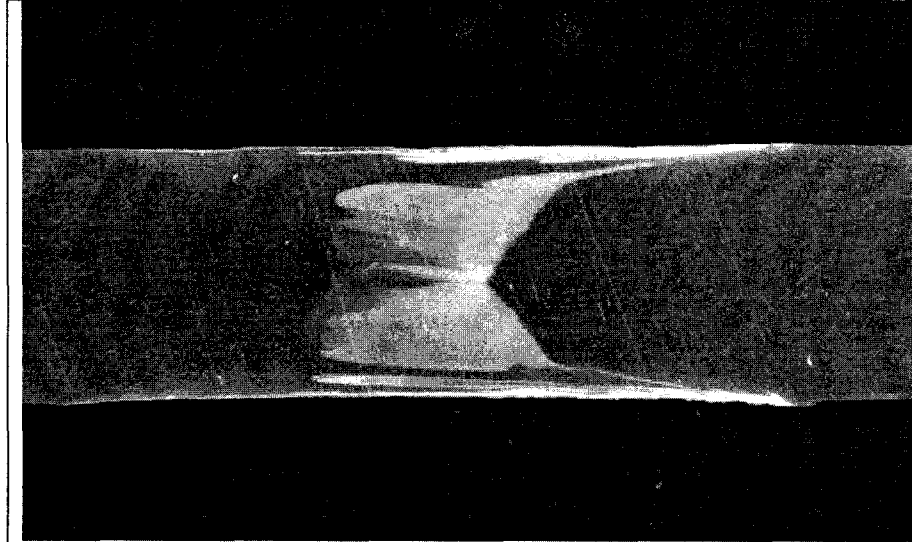
Şekil 7.25.- TIG kaynaklı bağlantılara ait makroyapı görüntüleri.



F11



F12



F22

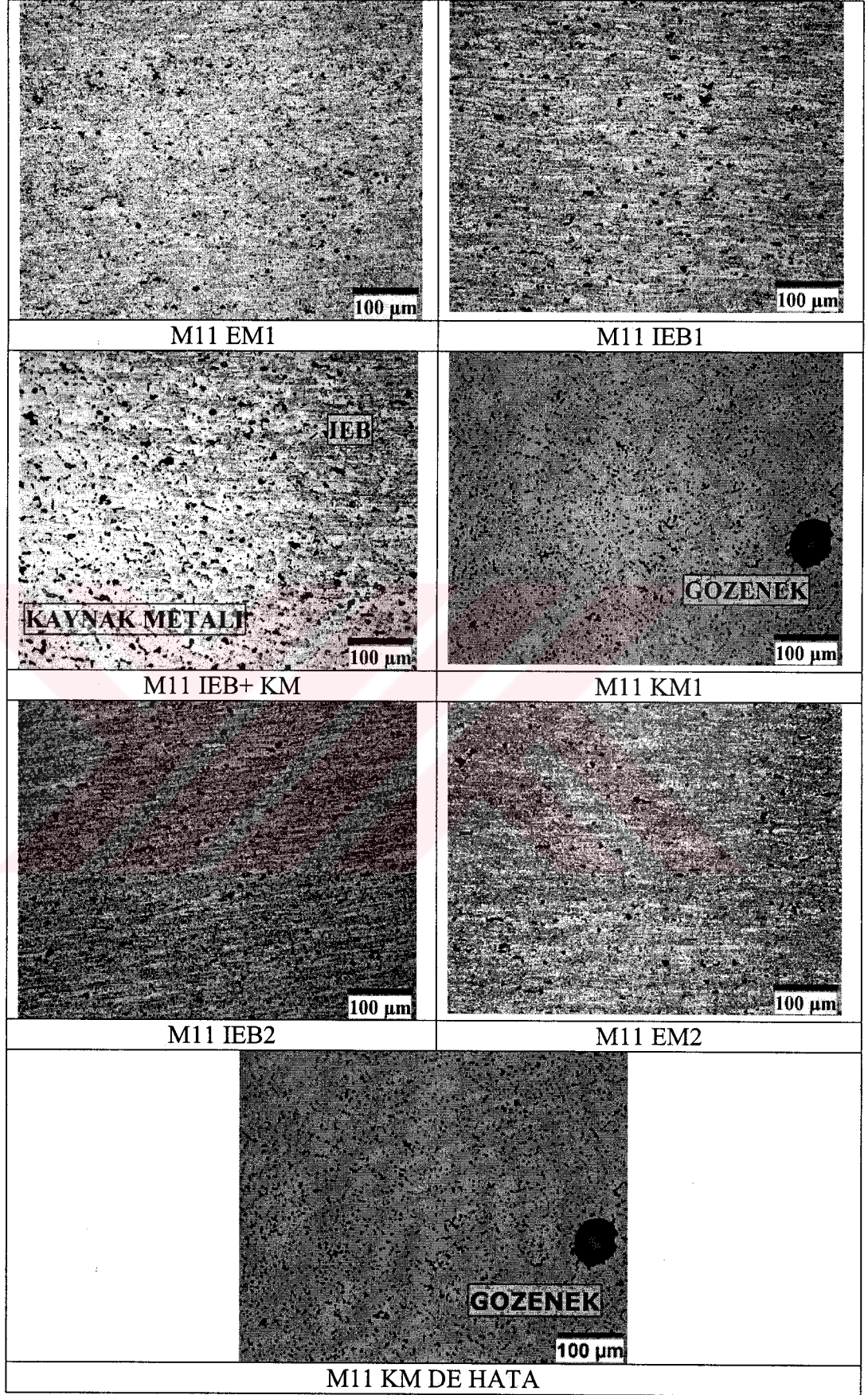
Şekil 7.26.- FSW bağlantılarına ait makroyapı görüntüleri.

MIG kaynaklı bağlantılar için kaynak bölgesinin (EM-IEB-KM-IEB-EM) metal mikroskobu ile 200x büyütme oranı ile Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmış olan mikroyapı incelemeleri Şekil 7.27, 7.28 ve 7.29'da verilmiştir.

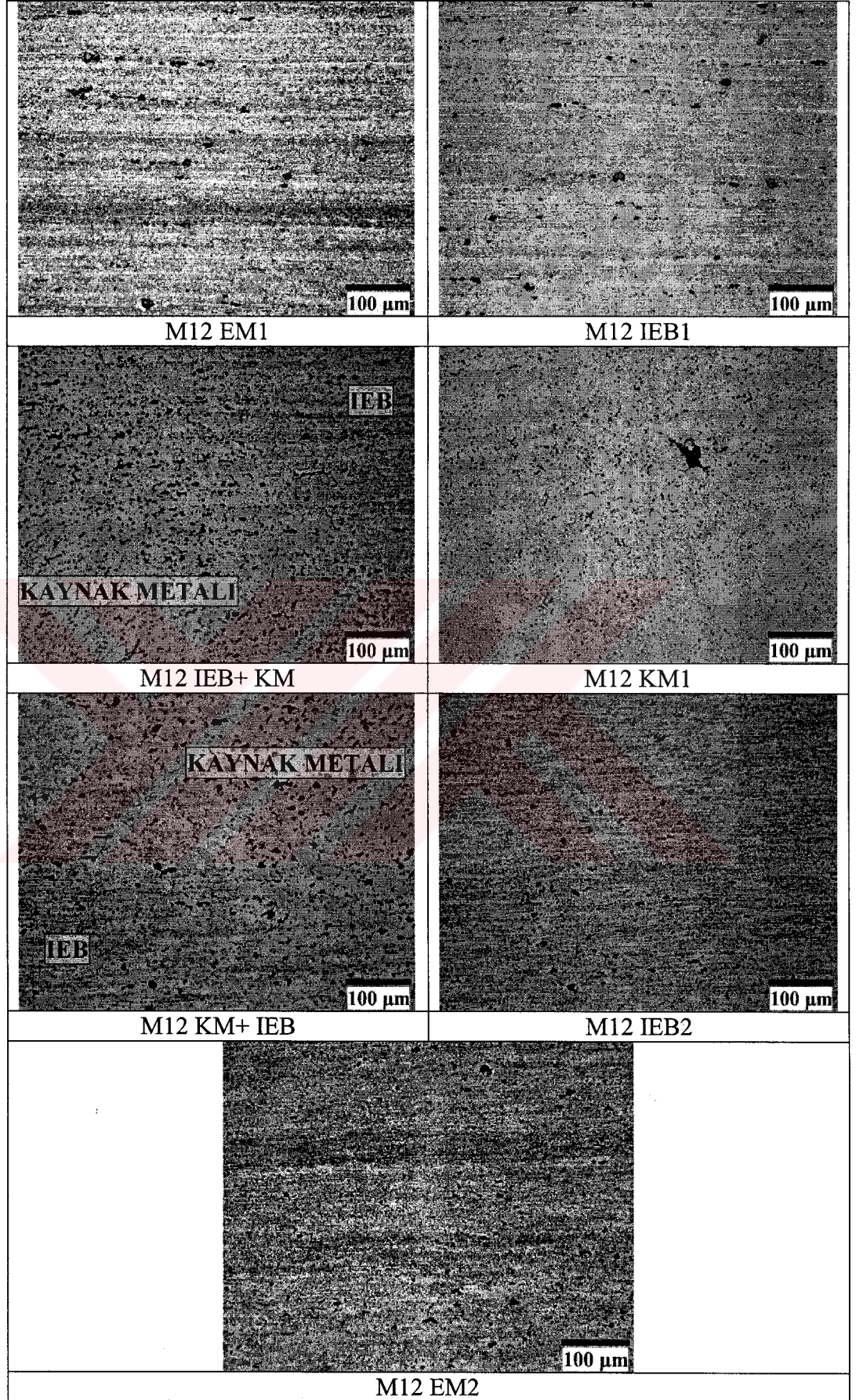
TIG kaynaklı bağlantılar için kaynak bölgesinin (EM-IEB-KM-IEB-EM) metal mikroskobu ile 200x büyütme oranı ile Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmış olan mikroyapı incelemeleri Şekil 7.30, 7.31 ve 7.32'de verilmiştir.

FSW bağlantıları için kaynak bölgesinin (EM-IEB-KM-IEB-EM) metal mikroskobu ile 200x büyütme oranı ve Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmış olan mikroyapı incelemeleri Şekil 7.33, 7.34 ve 7.35'de fotoğraflar halinde verilmiştir.

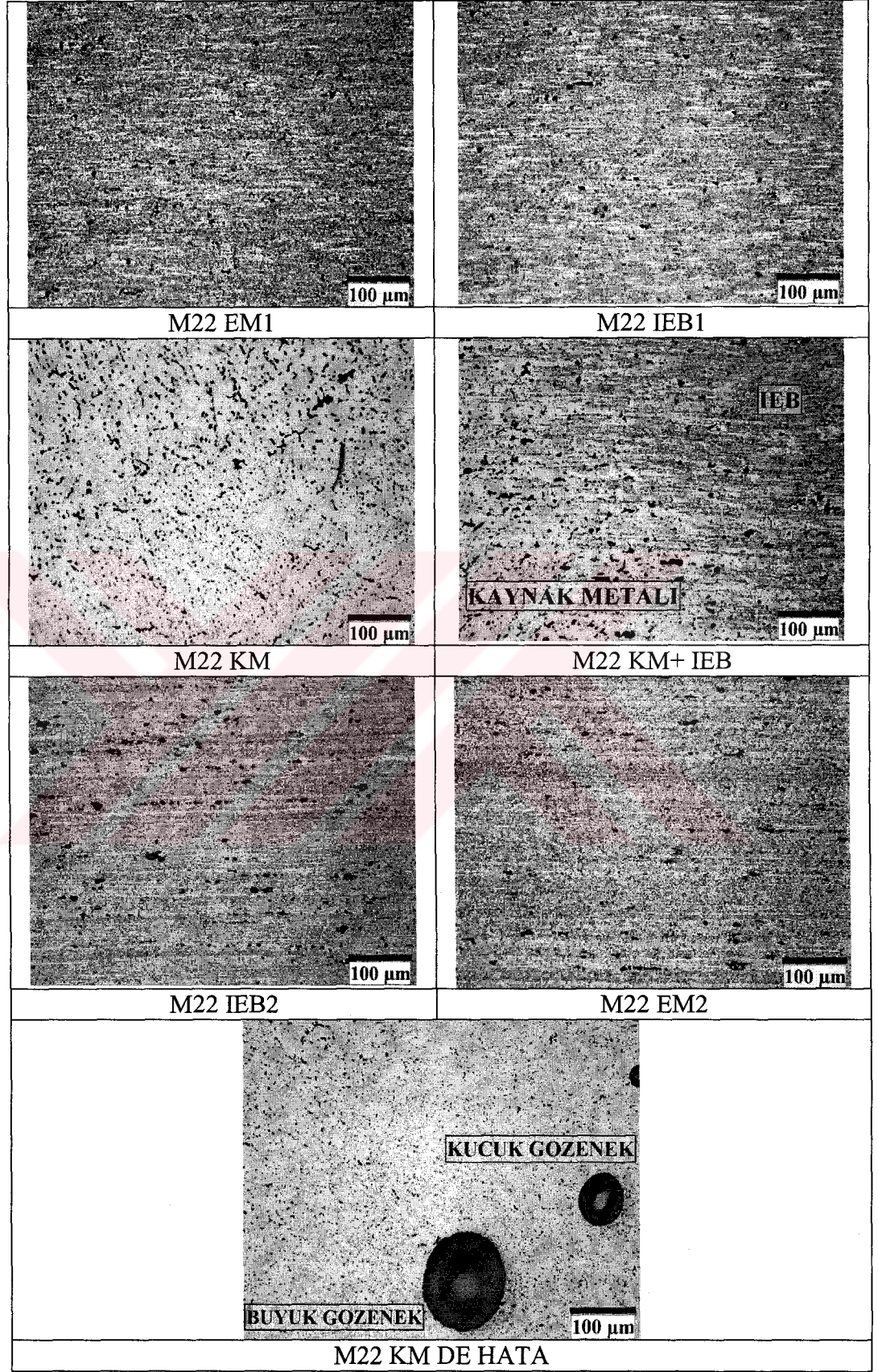
Ayrıca, FSW yöntemi ile kaynak edilmiş olan F11, F12 ve F22 kodlu numunelere ait mikroyapı fotoğrafları da toplu olarak Şekil 7.36'da verilmektedir. Mikroyapı görüntüleri önceki mikroyapı görüntülerinden farklı olarak 50x ve 100x büyütme oranlarında, Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak elde edilmiştir.



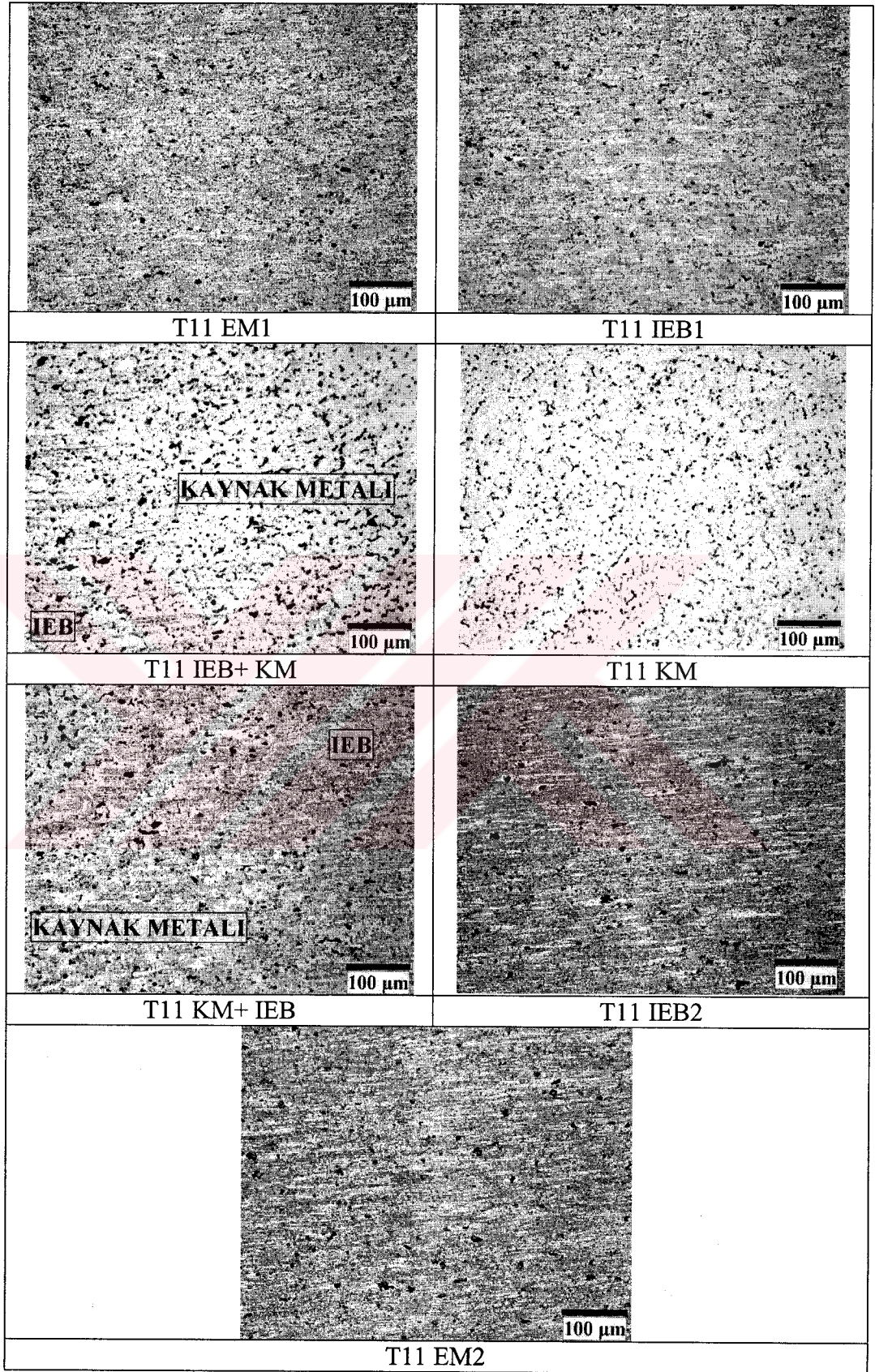
Şekil 7.27.- M11 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



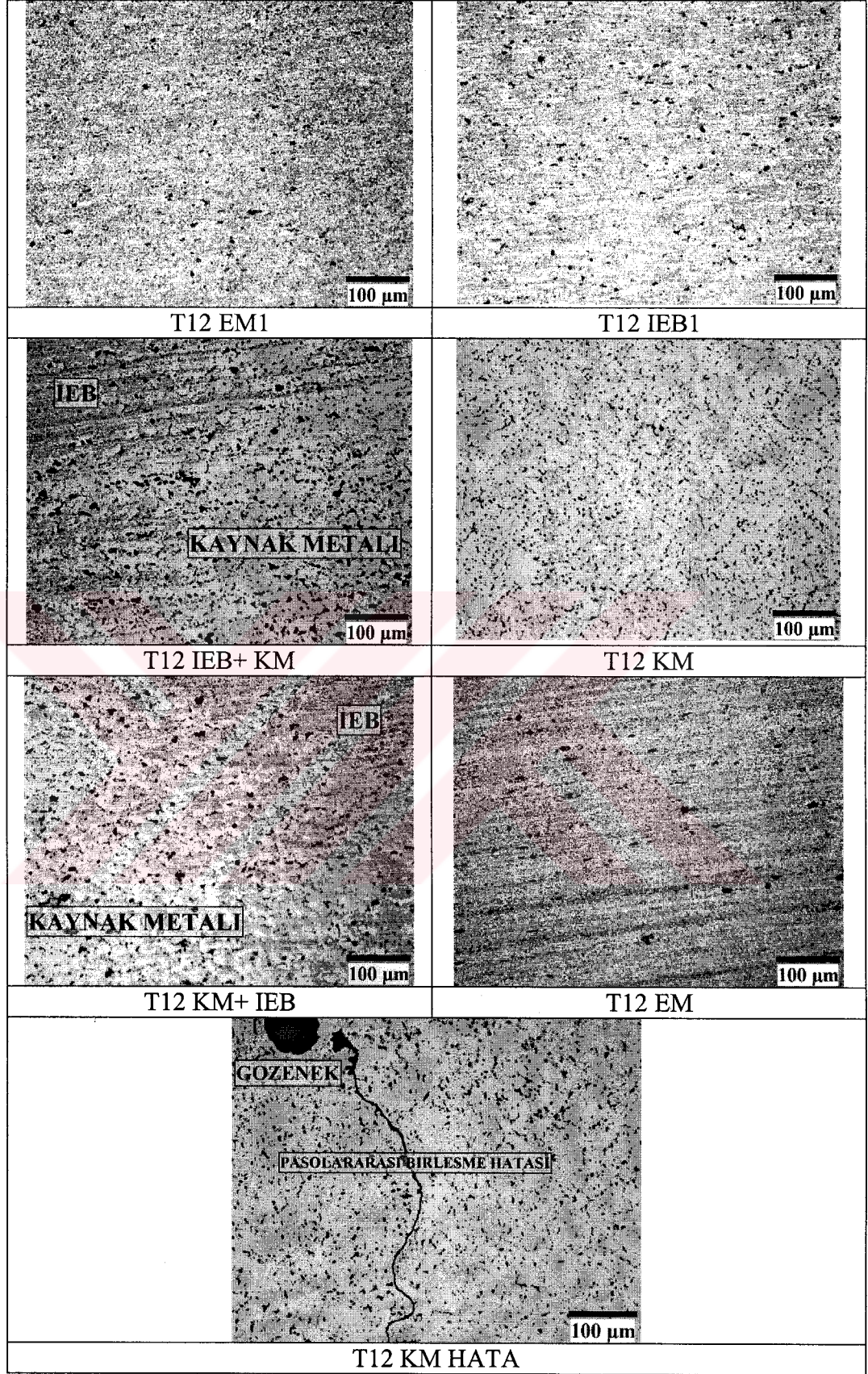
Şekil 7.28.- M12 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



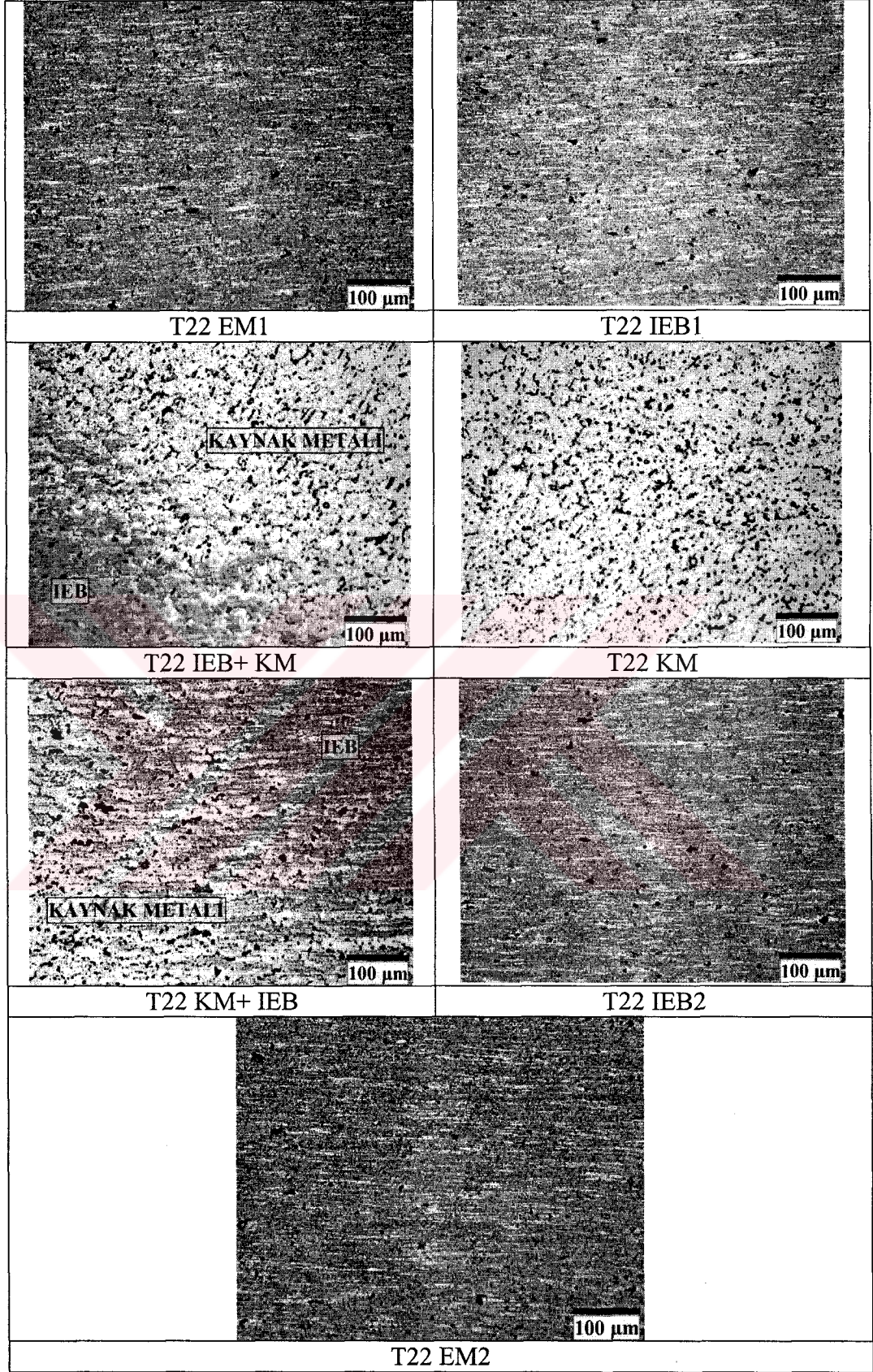
Şekil 7.29.- M22 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



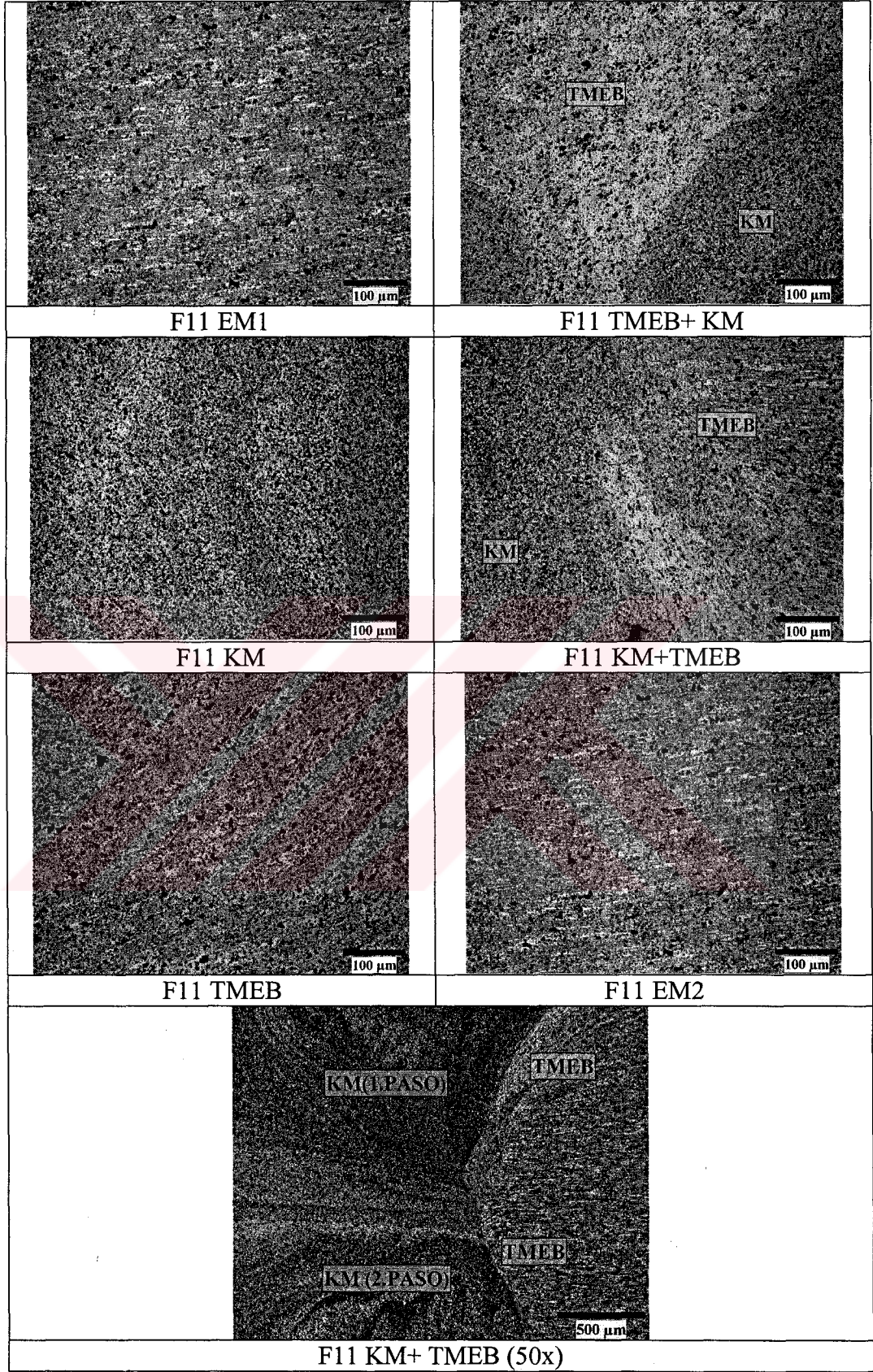
Şekil 7.30.- T11 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



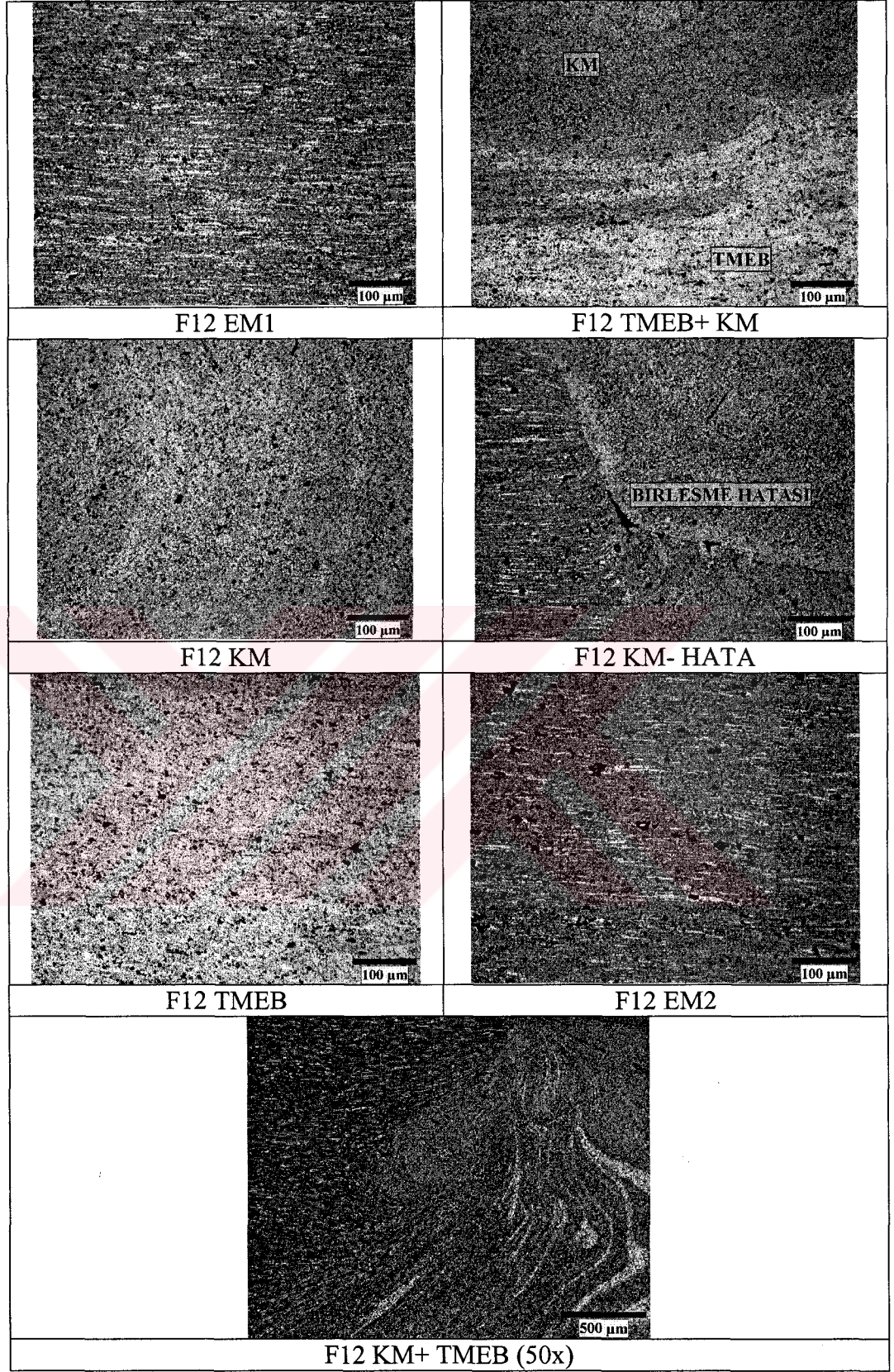
Şekil 7.31.- T12 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



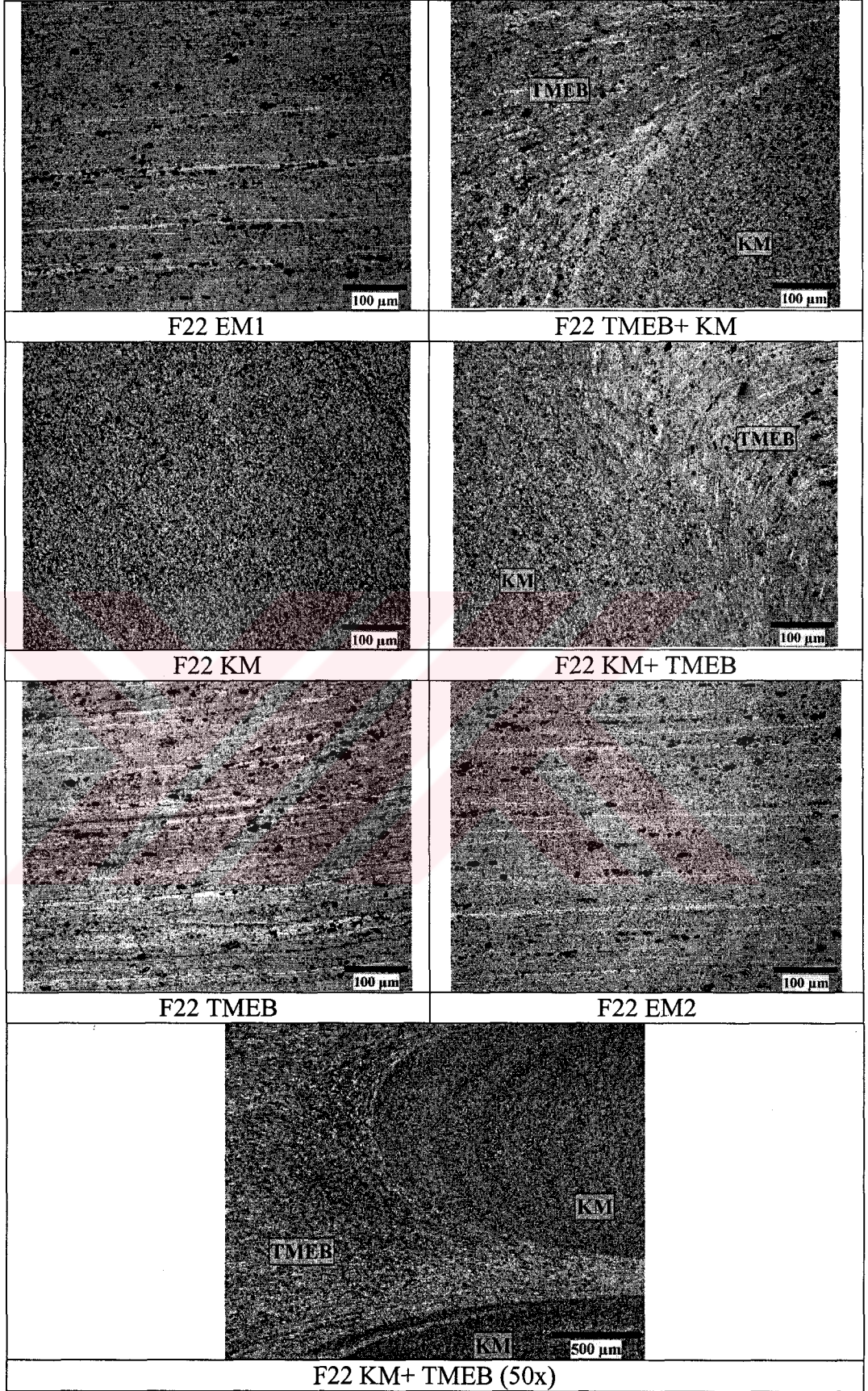
Şekil 7.32.- T22 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



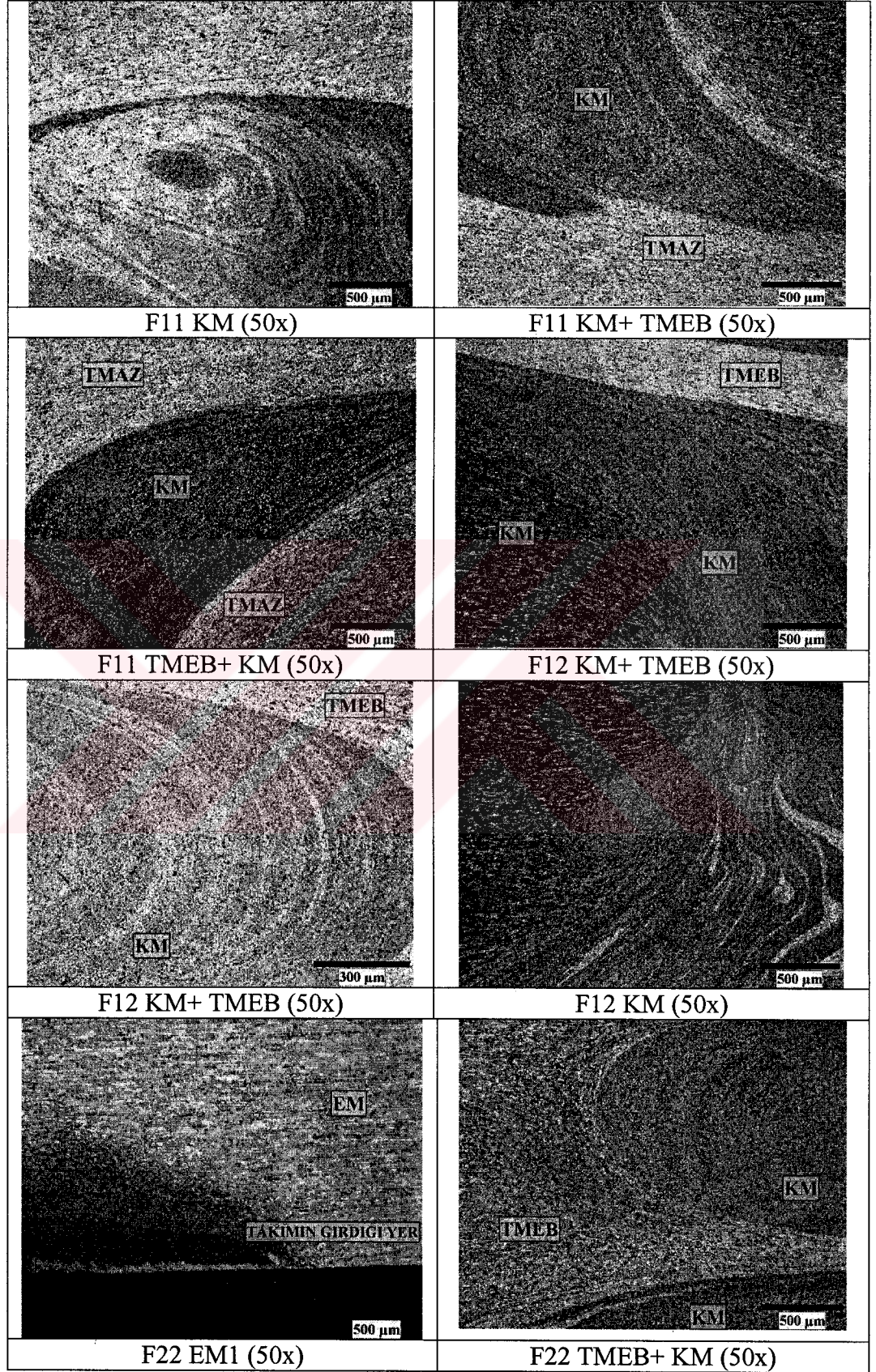
Şekil 7.33.- F11 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



Şekil 7.34.- F12 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



Şekil 7.35.- F22 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.



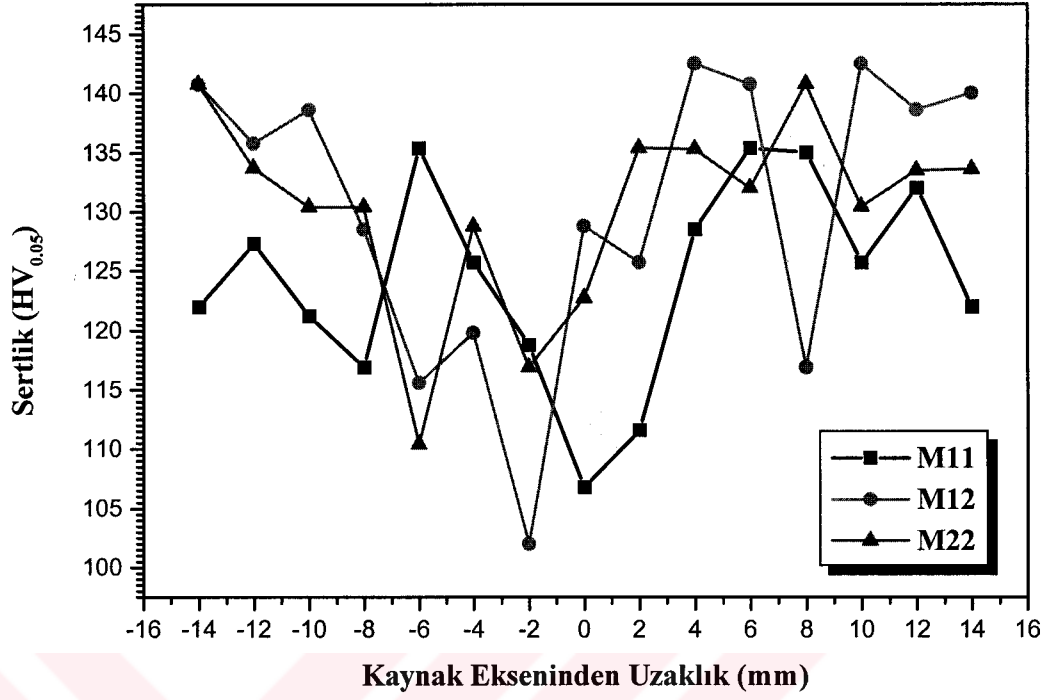
Şekil 7.36.- FSW bağlantılarına ait çeşitli toplu mikroyapı görüntüleri.

7.5. Mikrosertlik İnceleme Sonuçları

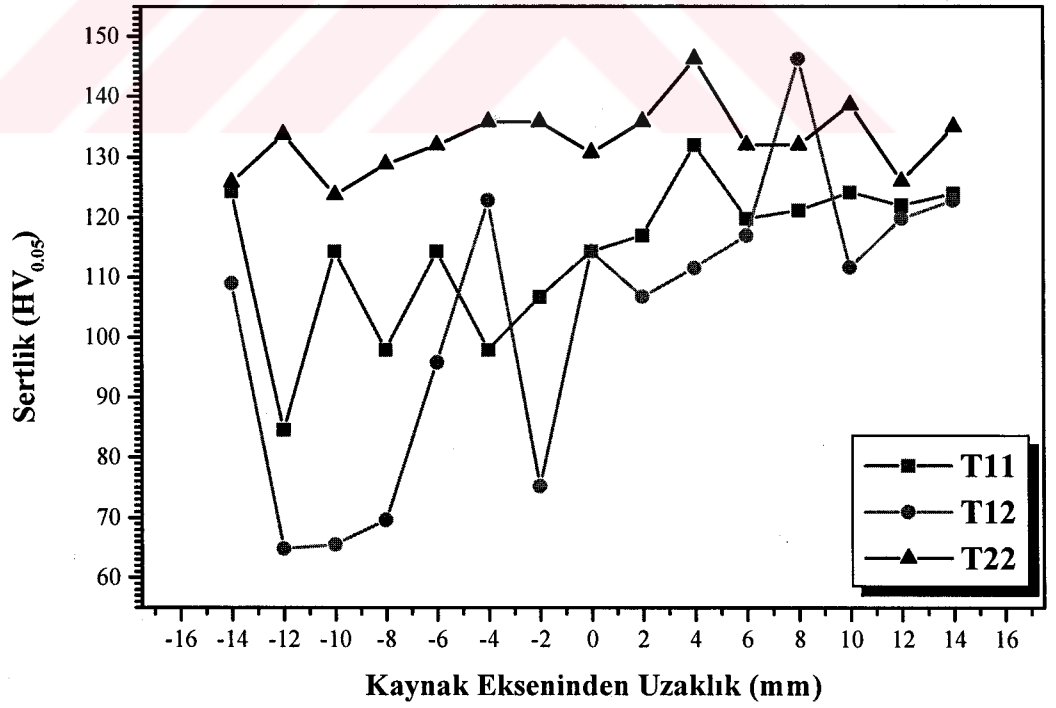
MIG, TIG ve FSW yöntemleri uygulanmış levhalardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde kaynak bölgesinden EM-IEB(TMEB)-KM-IEB(TMEB)-EM numune üst yüzeyinden 2 mm derinlikte, 2 mm aralıklarla kaynak eksenini sağında ve solunda 50 gr deney yükü ile (HV_{0.05}) yapılan Vickers sertlik tarama sonuçları Tablo 7.11'de ve Şekil 7.37, 7.38, 7.39 ve tüm sonuçlar toplu durumda Şekil 7.40'da verilmiştir.

Tablo 7.11.- MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik tarama sonuçları (HV_{0.05}).

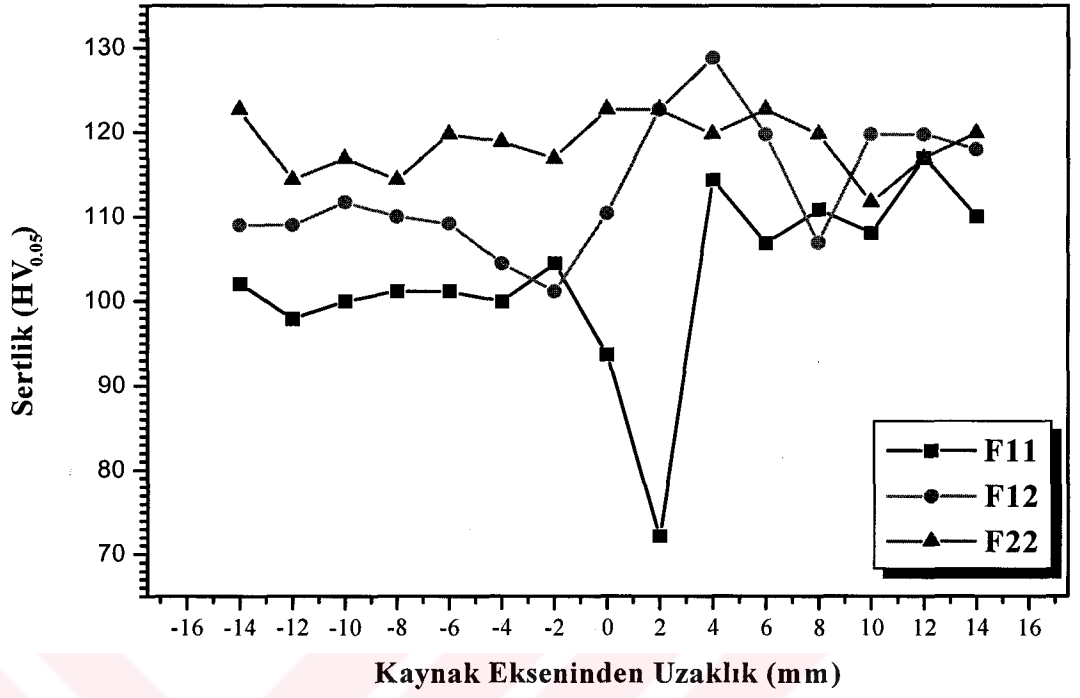
İz No.	Numune Kodu								
	M11	M12	M22	T11	T12	T22	F11	F12	F22
1	122.0	140.8	140.8	124.4	109	125.8	102	109	122.7
2	127.3	135.8	133.7	84.6	64.8	133.7	97.9	109	114.4
3	121.2	138.6	130.4	114.4	65.5	123.7	100	111.7	116.9
4	116.9	128.5	130.4	97.9	69.6	128.8	101.1	110	114.4
5	135.4	115.6	110.4	114.4	95.8	132	101.1	109.2	119.8
6	125.7	119.8	128.8	97.9	122.8	135.8	99.9	104.4	118.9
7	118.8	102	116.9	106.8	75.2	135.8	104.4	101.1	116.9
8	106.8	128.8	122.7	114.4	114.4	130.7	93.7	110.4	122.7
9	111.6	125.7	135.4	117	106.8	135.8	72.2	122.7	122.7
10	128.5	142.5	135.3	132	111.6	146.2	114.4	128.8	119.8
11	135.4	140.8	132	119.8	117	132	106.8	119.8	122.7
12	135	116.9	140.8	121.2	146.2	132	110.8	106.9	119.8
13	125.7	142.5	130.4	124.2	111.7	138.6	108	119.8	111.7
14	132	138.6	133.5	122	119.8	126	117	119.8	116.9
15	122	140	133.5	124	122.8	135	110	118	119.9



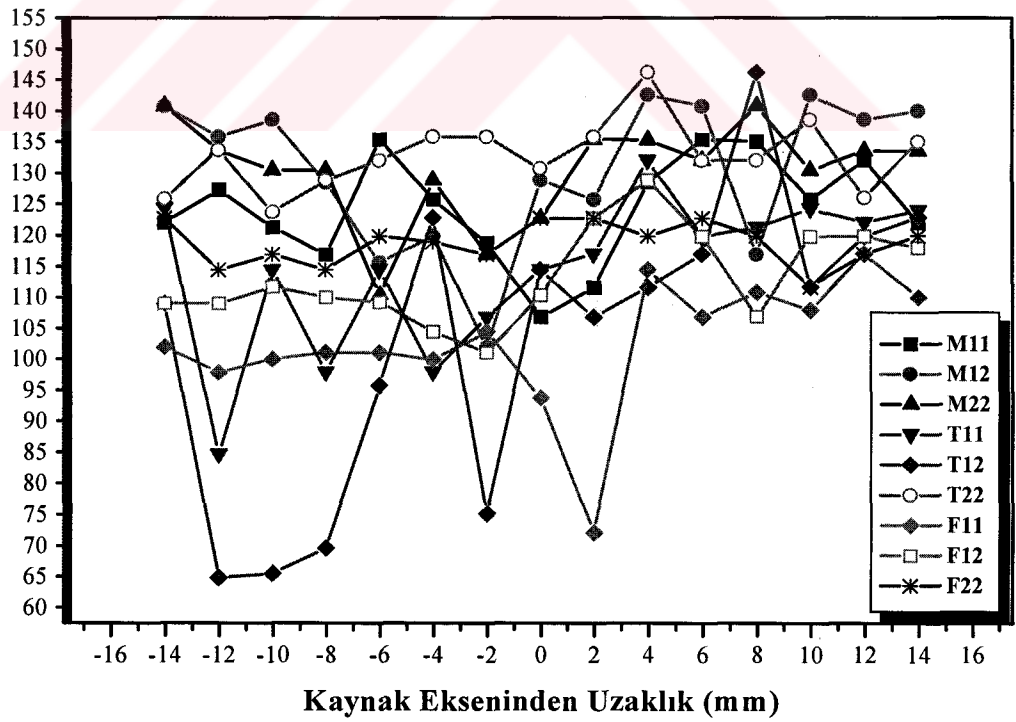
Şekil 7.37.- MIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.



Şekil 7.38.- TIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.



Şekil 7.39.- FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.



Şekil 7.40.- MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçları.

7.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

7.6.1. Görsel inceleme sonuçlarının irdelenmesi

Çift taraftan kaynak edilmiş olan MIG kaynaklı levhaların tümünde, kaynak dikişlerinin ilgili standard ve yönergelere göre normal olduğu, sıçramaların ergitme esaslı bu kaynak yönteminde oluşan tane boyutunda görüldüğü ve dikişlerde mekanik özellikleri etkilemeyecek derecede yanma olukları olduğu saptanmıştır. Dikiş boyutları normal ölçülerdedir, dikiş tırtılı kaliteli kaynak bağlantısında görülenle aynıdır. Ergitme esaslı bir kaynak yöntemi kullanıldığı için, ısı girdisi nedeniyle oluşan çarpılma miktarları da normaldir. Çarpılmayı, alüminyumun yüksek ısı iletkenliğine ve yüksek genleşme katsayısına sahip olması teşvik etmiştir. Bulgular, literatür ile uyumludur (Küleççi 2003).

Çift taraftan kaynak edilmiş olan TIG kaynaklı levhaların tümünde kaynak dikişlerinin ilgili standard ve yönergelere göre normal olduğu, sıçramaların ergitme esaslı bu kaynak yönteminde oluşan tane boyutunda görüldüğü ve dikişlerde mekanik özellikleri etkilemeyecek derecede yanma olukları olduğu görülmüştür. Dikiş boyutları normal ölçülerdedir ve dikiş tırtılı kaliteli kaynak bağlantısında görülenle aynıdır. Ergitme esaslı bir kaynak yöntemi kullanıldığı için, ısı girdisi nedeniyle oluşan çarpılma miktarları da normaldir. Çarpılmayı alüminyumu yüksek ısı iletkenliğine ve yüksek genleşme katsayısına sahip olması teşvik etmiştir. Bulgular, literatür ile uyumludur (Küleççi 2003).

Çift taraftan kaynak edilmiş olan FSW kaynaklı levhaların tümünde kaynak dikişleri, normal olup takım omzunun basınç etkisi ile oluşan çökme derinliği maksimum 0.5 mm'dir ve literatür ile uyum sağlamaktadır (Küleççi 2003, Thomas ve diğ. 1999, Threadgill 1997). Dikiş boyutları ve levhaya birleştirme çizgisi boyunca takımın girdiği bölgede nispeten dar başlaması ve 30 mm ileride takım omuz çapına uyumlu olması da normaldir; çünkü yöntemin uygulanmasında bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için başlangıç levhası kullanılmamıştır. Levha sonunda, takım çıkarken bıraktığı eksenel boşluk ta bu yöntemde gayet normaldir ve bu kısımlar deney numunelerinin çıkarılması sırasında ıskartaya ayrılmışlardır. Yüz ve kök dikişlerinde

takım omzunun bıraktığı yarı dairesel izler, bağlantı mukavemetini etkilemeyecek biçimde oluşmuştur ve yine bu yöntem ile oluşturulmuş kaynak dikişlerinin normal görünümündedir. Yöntem, bir katı faz kaynak yöntemi olduğu için malzeme sıcaklığı, kaynak metalinde maksimum 400 °C'ye ulaşmakta ve alüminyum alaşımının ergime sıcaklığının altında kalmaktadır, ısı girdisi yerel olarak oluşmakta ve dolayısı ile ergitme kaynak yöntemlerinde olduğunun aksine, bağlantılarda çarpılma oluşmamaktadır. Bulgular, literatür ile uyumludur (Külekcı 2003, Thomas ve diğ. 1999, Thomas 1998, Kaluç ve Bozduman 1997, Threadgill 1997.)

7.6.2. Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

MIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, (Tablo 7.5 ve Şekil 7.9) kaynaklı bağlantıların ortalama mukavemet değerlerinin esas metal mukavemet değerlerinden düşük olduğu ve tüm kopmaların kaynak metalinden olduğu görülmektedir. Bu da kaynak metalinin yumuşak olduğunu göstermektedir ve bu bulgular metalografik inceleme ve sertlik sonuçları ile karşılaştırıldığında (Tablo 7.11 ve Şekil 7.37) açıkça görülmektedir. Çünkü, MIG kaynağında kullanılan tel bileşiminin mukavemet üzerine etkisi vardır, kaynak metali döküm yapısındadır ve daha yumuşaktır. EM 1'in akma ve çekme mukavemetleri EM 2'ye göre daha düşüktür; burada malzemenin alaşım içeriği ve gördüğü mekanik mukavemetlendirme işleminin etkisi açıkça ortaya çıkmaktadır. Her üç levhanın akma ve çekme mukavemet değerleri ortalamaları birbirine yakındır. Bu, ilginç bir sonuçtur. Halbuki, MIG kaynaklı 2 no.lu metallerin mukavemet değerlerinin daha yüksek olması gerekmektedir; ancak burada kaynak metalinden kopma olması, sonucun bu yönde çıkmasını etkilemiştir.

TIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, (Tablo 7.6 ve Şekil 7.10) kaynaklı bağlantıların ortalama mukavemet değerlerinin esas metal mukavemet değerlerinden düşük olduğu ve tüm kopmaların kaynak metalinden olduğu görülmektedir. Bu da kaynak metalinin yumuşak olduğunu göstermektedir ve bu bulgular metalografik inceleme ve sertlik sonuçları ile karşılaştırıldığında (Tablo 7.12 ve Şekil 7.38) açıkça görülmektedir. T11 ve T12 kodlu levhaların akma ve çekme mukavemet değerleri ortalaması birbirine yakındır; ancak T22 kodlu levhanın

akma mukavemeti ortalama 205, çekme mukavemeti 291 MPa' dır ve diğerlerine göre daha yüksek değerlerdedir. Bu sonuç ta ilginçtir; halbuki bu bağlantılarda da aynı kaynak teli kullanılmıştır ve kopma kaynak metalinden olmuştur; ancak sertlik eğrileri incelendiğinde (Şekil 7.39) bu numunelerin sertlik değerlerinin diğerlerine göre yüksek olduğu görülmektedir. Bu açıdan, olayın açıklanabilmesi için kaynak bölgesinin metalografik olarak incelenmesi ve kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu ile yüksek büyütme oranlarında analiz edilmesi gerekmiştir. Bu bulgular incelendiğinde TIG kaynaklı bağlantılarda, kırılmanın özellikle T22 kodlu numunelerde daha sünek olduğu, kaynak metalinde daha az gözenekliliğe rastlandığı anlaşılmıştır.

FSW kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, (Tablo 7.7 ve Şekil 7.11) kopmaların F11C1 ve F11C3 kodlu numunelerde TMEB, F11C2 no.lu numunede kaynak metalinden, F12C2, F12C3 kodlu numunelerde TMEB'den F12C1 kodlu numunede kaynak metalinden, F22 kodlu numunelerin tümünde kaynak metalinden olduğu ve bağlantıların akma ve çekme mukavemet değerlerinin MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar ile hemen hemen eşit değerlerde olduğu (Şekil 7.12) ve bağlantıların kendi aralarında mukavemet değerlerinin çok fazla farklılık göstermediği görülmüştür. Kırılma yüzeylerinin makro yapıları incelendiğinde kırılmanın, sünek ve gevrek biçimde karışık olarak oluştuğu ve literatür taramalarından görüldüğü gibi, kırılmanın soğan halkalarından kat kat meydana geldiği, kaynak dikişinin TMEB'den olduğu, bu şekilde kırılma sayesinde FSW kaynaklı bağlantıların mukavemet değerlerinin ergitme esaslı kaynak bağlantıları ile karşılaştırıldığında, başarılı sonuçlar ortaya çıktığı görülmüştür. Mekanik mukavemetlendirme işleminin mekanik özellikleri artırıcı etkisi, F22 kodlu numunelerde, bir kez daha ortaya çıkmıştır. Sonuçlarda, F12 ve F22 kodlu numunelerde tamamen orijinal bulgular elde edilmiştir ve ilk kez bu çalışmada rapor edilmektedir.

7.6.3. Eğme deneyi sonuçlarının irdelenmesi

MIG, TIG ve FSW yöntemleri ile kaynak edilmiş levhalardan çıkarılan standard eğme numunelerinin yüz ve kök eğme sonuçları, gazaltı kaynak yöntemlerinde gazın

etkisiyle oluşan gözeneklerin teşvik ettiği tekil çatlamlar dışında, oldukça normaldir ve bu tür bağlantılarda karşılaşılan eğme sonuçları ile uyumludur.

Özellikle bir katı faz kaynak yöntemi olan FSW kaynak yöntemi ile oluşturulmuş kaynaklı bağlantıların eğme deneyi sonuçları ve gösterdikleri performans literatürde de belirtildiği gibi yöntemin ergitme esaslı kaynak yöntemlerine göre üstün bir yönünü daha ortaya çıkarmaktadır.

7.6.4. Metalografik inceleme sonuçlarının irdelenmesi

Her üç kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bağlantılardan alınan numuneler üzerinde kaynak bölgelerinin detaylı olarak metalografik incelemesi yapıldığında, MIG kaynaklı bağlantıların (Şekil 7.24, 7.27, 7.28, 7.29) ışık mikroskobu ile yapılan makro incelemelerinde kaynak bölgelerinin normal EM, IEB ve KM makro ve mikro yapıları görüntüsü verdiği görülmüştür. Esas metal mikroyapısının haddeme hatlarını içeren ve ince taneli homojen çökelti dağılımlı olduğu görülmüştür. IEB’de çökeltilerin daha sıklaşarak oluştuğu ve bölgenin kaynak metaline göre daha koyu renkte, daha sık çökeltili olduğu saptanmaktadır. IEB’den kaynak metaline geçişte keskin ergime çizgisi görüntüsü makroyapılarda da ortaya çıkmış olup bu bölgedeki mikroyapı geçişi de koyu renkten daha açık bir dokuya geçiş biçimindedir. Kaynak metali olarak kullanılan alaşımın ve hızlı soğumanın etkisiyle kaynak metal yapısında oluşmuş olan çökeltiler daha geniş aralıklarda KM yapısına serpilmiş durumdadır. Makro yapılarda, kaynak dikişinde izlenen gözeneklilik, kullanılan telin ve koruyucu gazın alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında neden olabileceği normal bir durumdur ve gözenek boyut ve miktarları kabul edilebilir sınırlardadır (Mathers 2002).

M22 kodlu numunelerde, esas metal yapısının daha ince tanelerden oluştuğu, IEB-KM geçişinin ve kaynak metali mikroyapısının normal olduğu ve olayın M11 ve M12 kodlu numunelerle benzeşim gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak M22 kodlu numunelerde, kaynak metalinde büyük gözenekler olduğu saptanmıştır. Bu, çekme deneyi sonucunda kırılma yüzeylerinin SEM taramasında da izlenen bir konudur. Ancak eğme deneyi sonuçlarında bu numunelerde çatlama görülmemiş ve çekme

deneyi sonuçlarında da bu gözenekliliğin mukavemet üzerine etkisinin fazla olmadığı ortaya çıkmıştır.

TIG kaynaklı bağlantıların (Şekil 7.25, 7.30, 7.31, 7.32) ışık mikroskobu ile yapılan makro incelemelerinde kaynak bölgelerinin normal EM, IEB ve KM makro ve mikro yapıları görüntüsü verdiği görülmüştür. Esas metal mikroyapısının haddeleme hatlarını içeren ve ince taneli homojen çökelti dağılımlı olduğu görülmüştür. IEB’de çökeltilerin daha sıklaşarak oluştukları ve bölgenin kaynak metaline göre daha koyu renkte, daha sık çökeltili olduğu saptanmaktadır. IEB’den kaynak metaline geçişte keskin ergime çizgisi görüntüsü makroyapılarda da ortaya çıkmış olup bu bölgedeki mikroyapı geçişi de koyu renkten daha açık bir dokuya geçiş biçimindedir. Kaynak metali olarak kullanılan alaşımın ve hızlı soğumanın etkisiyle kaynak metal yapısında oluşmuş olan çökeltiler daha geniş aralıklarda KM yapısına serpilmiş durumdadır. Makro yapılarda, kaynak dikişinde izlenen gözeneklilik, kullanılan TIG kaynak telinin ve koruyucu gazın, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında neden olabileceği normal bir durumdur ve gözenek boyut ve miktarları kabul edilebilir sınırlardadır (Mathers 2002).

T12 kodlu numunenin kök pasosunun yüz pasosu ile birleştiği bölgede, bağlantı boyunca devam eden bir eksik ergime saptanmıştır. Bu da bağlantı mukavemetinin T11’e göre yüksek olması gerekirken, düşmesine yol açmış, çentik etkisi yaratan bir olgudur. T22 kodlu bağlantılarda kaynak metalleri, oldukça simetriktir ve oldukça kaliteli çift taraflı bir kaynak dikişi kesiti göstermektedir. Dolayısı ile, bu bağlantıların mukavemet değerlerinin T11 ve T22 kodlu numunelere göre yüksek olmasının nedeni; buradan da görülmektedir. T11, T12, T22 kodlu tüm numunelerin mikroyapıları, T12 kodlu numunenin pasolararası birleşme hatası hariç normal alüminyum kaynak mikroyapısı göstermiştir.

FSW kaynaklı bağlantıların (Şekil 7.26, 7.33, 7.34, 7.35) ışık mikroskobu ile yapılan makro incelemelerinde, kaynak bölgelerinin normal EM, TMEB ve KM makro ve mikro yapıları görüntüsü verdiği görülmüştür. Esas metal mikroyapısının haddeleme hatlarını içeren ve ince taneli homojen çökelti dağılımlı olduğu, TMEB’de ise çökeltilerin daha sıklaşarak oluştukları ve bölgenin kaynak metaline göre daha açık

renkte olduğu saptanmıştır. Bu kaynak yönteminde, kaynak metali içiçe geçmiş soğan halkaları görünümünde olup koyu renkli ve açık renkli eliptik halkalardan oluşmuştur ve literatürde görülenler ile aynıdır.(Thomas ve diğ. 1999, Peel ve diğ. 2003, Threadgill 1997, Krishnan 2002). Takımın yarattığı plastikleşme etkisiyle karışan metal, simetrik eliptik halkalar dışında simetrik olmayan halkalar da içermektedir. Kaynak metali takım omuz kısmının basmış olduğu kaynak metali boyutları, takım omuz kısmından daha küçük boyutlarda, yaklaşık ¼ kadar küçük olup F11 ve F22 kodlu numunelerde simetrik, F12 kodlu numunede ise simetrik olmayan karışık biçimlidir. Çift taraftan birer pasoda oluşturulan kaynak metalinin içiçe geçmiş faylanma yapısı, düşük büyütmelelerde açıkça görülmekte ve halkalar takımın karıştırma etkisi ile birbiri içine dalmakta, ilginç ve incelenen literatürde daha önce görülmeyen bir karışım bölgesi yapısı oluşturmaktadır. Çekme deneyi sonucunda, kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri de sünek, gevrek bir kırılmayı göstermekte ve gevrek kırılmanın kaynak metalinde içiçe geçmiş koyu renkli ve açık renkli bölgelerdeki farklı yapı karakterlerinin sert- yumuşak yapı oluşumu etkisiyle ortaya çıktığının bir göstergesidir. F12 kodlu numunede mikroyapı incelemeleri takım dalmasının neden olduğu bir eksik ergime hattı (birleştirme hatası) oluştuğunu göstermektedir. Buradan F12 kodlu levhadan çıkarılan çekme deney numunelerindeki mukavemet değerlerinin F11 ve F22 kodlu levhalardan çıkarılan çekme numunelerinin mukavemet değerlerinden neden düşük olduğunun göstergesi olmaktadır.

Yapılan literatür taramalarında, deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum alaşımlarının ve farklı alaşım çiftinin çift taraflı FSW kaynağı yapıldığı durumlara rastlanmaması, konunun daha detaylı olarak ele alınması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır. Karşılaşılan bazı metalurjik olayları ve bunların mekanik özelliklere etkisini incelemek için daha ileri analiz sistemleri olan TEM incelemeleri, EDX incelemeleri yapılarak TMEB ve KM'de oluşan dislokasyonların yoğunlukları, boyutları ve bunlar arasında tane büyüklükleri de dikkate alınarak bir ilişkinin kurulması gerekmektedir. Böylece orijinal olan bu bulguların daha detaylı bir biçimde ülke ve dünya bilim literatürüne kazandırılması yerinde olacaktır.

7.6.5. Kaynak kesitlerinde mikrosertlik taraması sonuçlarının irdelenmesi

MIG, TIG ve FSW yöntemleri uygulanmış levhaların kaynak kesitlerinden çıkarılan metalografi numuneleri üzerinde 50 g deney yükü kullanılarak yapılan Vickers sertlik taramalarının sonuçları incelendiğinde (Şekil 7.37, 7.38, 7.39 ve 7.40):

MIG kaynaklı bağlantılarda esas metal sertliğinin ortalama 140, kaynak metali sertliğinin ortalama 115 HV civarlarında olduğu görülmüştür. Sertlik esas metalden, IEB'ye ve kaynak metaline doğru düşmektedir. Yani bağlantıların kaynak metalleri daha yumuşak görülmektedir. M22 kodlu numunede sertlik değerleri M11 ve M12'ye göre kaynak metalinde daha yüksek olarak ölçülmüştür. Zaten bu numunenin mekanik değerleri de yüksektir ve kaynak metali daha önceden belirtildiği üzere, esas metal ve ek kaynak metali karışımından oluşan bir metalurjik döküm yapısı göstermektedir ve bu durum normaldir.

TIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçlarında EM sertliklerinin düşmesi gibi bir durum ile karşılaşmıştır. Bu değer, ortalama 125 HV değerindedir. MIG kaynaklı bağlantılarda rastlananın tersine T12 hariç IEB ve KM'de EM sertlik değerine göre ani düşüşler görülmemiştir. Özellikle T22 kodlu numunede tüm bölgelerde sertlik değerleri diğerlerine göre yüksek seyretmektedir. Bu ilginç durum, bu bağlantıların mekanik değerlerinin de yüksek olduğunun bir kanıtı olmaktadır.

FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik tarama sonuçlarında da EM sertliklerinin ortalama 112 HV olduğu görülmüştür. F11 kodlu numunede sertlik, KM'de yaklaşık 72 HV değerine düşerken diğer numunelerde ise bunun tersi değerler ortaya çıkmıştır. Literatürde (Peel ve diğ. 2003, Threadgill 1997). FSW yöntemi uygulanmış bağlantıların sertlik değerlerinin EM'den TMEB'ye ve KM'ye doğru düşüş göstermesi ile karşılaşılırken burada tersine bir durum ortaya çıkmaktadır. Çift taraflı kaynağın ve takım omzunun ısıtma etkisinin çift taraflı olmasının kaynak bölgesini sertleştirdiği (F11 hariç) ve sertlik dağılımının tüm bölgelerde homojene yakın değişmesi ilginçtir. Zaten kırılma yüzeylerinin SEM incelemelerinde de yapıda bir gevrek kırılmanın olduğu görülmektedir ve bu konuda araştırmaların derinleştirilmesi yerinde olacaktır.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde yüksek mukavemetleri ve korozyona dirençleri nedeni ile zırhlı taşıt ve gemi yapımı endüstrilerinde en çok kullanılan alaşımlar olan 6.4 mm kalınlığındaki AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7) ve AW- 5086 (AlMg4) alaşımı levhaların MIG, TIG ve FSW kaynak yöntemleri kullanılarak çift taraflı kaynak edilmeleri ve bağlantıların mekanik özellikleri ve kaynak bölgelerinde, kaynak ısı girdisi nedeni ile oluşan metalurjik özellikleri detaylı bir biçimde incelemek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucunda aşağıda sıralanan genel sonuçlara ve önerilere ulaşılmıştır.

(1) FSW kaynaklı levhalarda açısız çarpılma görülmezken kaynak ısı girdisi nedeniyle MIG ve TIG kaynağı uygulanmış levhaların açısız çarpılmaları oldukça fazladır.

(2) MIG ve TIG kaynaklı levhalarda kaynak sırasında tel elektrod ve gaz sarfiyatının yanısıra dikiş taşkınlıklarının giderilmesi gibi maliyeti artırıcı etkenler çok fazladır.

(3) Sürtünen eleman ile kaynak edilmiş levhaların mekanik özelliklerinin MIG ve TIG kaynağı uygulanmış levhaların mekanik özelliklerine göre oldukça iyi olduğu saptanmıştır.

(4) Bir katı faz kaynak yöntemi olan FSW yöntemiyle oluşturulan bağlantıların kaynak dikişlerinin boyutları MIG ve TIG kaynaklılarda oluşanlara göre dörtte bir oranında daha küçüktür ve malzeme ergime sıcaklığına ulaşmadığından olumsuz etkide bulunan metalurjik dönüşümler ve çökelti bulunmamaktadır.

Başta alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan yeni bir katı faz kaynak yöntemi olan sürtünen eleman ile kaynak yöntemi ülkemizde daha yeni yeni tanınmakta ve endüstriyel uygulamaya her yeni yöntem gibi çok zor girmektedir.

Ancak, bu çalışma göstermiştir ki yöntem alüminyum ve alaşımları kullanılan birçok endüstri kolunda güvenle ve rahatlıkla uygulanabilir.

FSW yöntemi kullanılarak kaynak edilmiş levhaların kaynak bölgelerinin geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmesinde ve özellikle farklı alaşım çiftlerinin kaynağı üzerine daha derinlemesine bilimsel çalışmaların yapılmasında yarar vardır.



KAYNAKLAR

1. ANDERSON, T., 1999, Filler Metal Selection for Aluminium Welding, Svetsaren, No. 3, pp. 20- 22.
2. ANDERSON, T., 2000, The Advancement of Al within the Welding Fabrication Industry and Its Many Product Design Applications, Svetsaren, No. 2, pp. 3-5.
3. ANDERSON, T., 2001, Aluminium Welding within the Automotive Industry- Moving Forward with Weld Quality –Welding Equipment Charecteristics and Technical Training, Svetsaren, No. 2-3, pp. 47- 50.
4. ANDERSON, T., 2002, Understanding Aluminum Alloys, Welding Journal, Volume 81, No. 4, pp. 77- 80.
5. ANDERSON, T., 2004, New Developments in Aluminum Shipbuilding, Welding Journal, Volume 83, no. 2, pp. 28- 32.
6. ANIK, S., 1975, Kaynak Tekniği- Cilt 3- eliklerin Kaynak Kabiliyeti, İTÜ Yayını, İstanbul.
7. ANIK, S., ANIK, E.S., VURAL, M., 1993, 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
8. ANIK, S., DİKİCİOĞLU, A., VURAL, M., 1994, Koruyucu Gaz Altında Kaynak ve Alüminyumun MIG Kaynağı, Kaynak Tekniği Derneği, Yayın No. 1, Teknisyenler Matbaası, İstanbul.
9. ANIK, S., DORN, L., 1990, Metal Physical Processes During Welding- Weldability of Aluminum Materials, Schweissen und Schneiden, Vol. 42, Helf.9, pp. 457- 459.
10. ANIK, S., DORN, L., 1990, Metal Physical Processes Involved in Welding- Weldability of Aluminum Materials, Schweissen und Schneiden, Vol. 43, Helf. 4, pp. 210- 215.
11. ANIK, S., TÜLBENTÇİ, K., KALUÇ, E., 1991, Örtülü Elektrod ile Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayını, İstanbul.
12. ANSI/AWS B1.11-88, Guide for the Visual Inspection of Welds, AWS, American National Standards Institute, 1998.

13. ATAKOGLU, H., MISTIKOĞLU, S., ÇAM, G., 2003, Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Bir Al- Alaşımının İyçyapı ve Mekanik Karakterizasyonu, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, s. 65- 75.
14. AVNER, S.H., 1974, Introduction to Physical Metallurgy, McGraw Hill, USA.
15. BARGEL, H. J., SCHULZE, G., "Malzeme Bilgisi-Cilt II", Çev. Ş. Güleç, A. Aran, MBEAE Matbaası, 1987, Gebze-Kocaeli.
16. BENAVIDES, S., Li, Y., MURR, L.E., BROWN, D., MC CLURE, J.C., 1999, Low-Temperature Friction- Stir Welding of 2024 Aluminum, Scripta Materialia, Vol. 41, No.8, pp. 809- 815.
17. BHADESHIA, H. K. D. H, 2003, <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/FSW/aaa.html>
18. BİLİM VE TEKNİK, 1995, Çağın Metali Alüminyum, s. 42- 47, Tübitak-Ankara.
19. BLEWETT, R. V., 1991, Welding Aluminium and Its Alloys- A Review of Applications and Requirements, Welding and Metal Fabrication, October, pp. 449-455.
20. BRICK, R. M., PENSE, A.W., GORDON, R.B., 1977, Structure and Properties of Engineering Materials, Fourth Edition, McGraw Hill, Kogahusha Ltd., Tokyo- Japan.
21. BRUNNHUBER, D., BANDT, H., SCHMIDT, H., 2001, Aluminium Welding in Shipbuilding, Svetsaren, No. 2-3, pp. 19- 20.
22. BUSSU, G., IRVING, P.E., 2003, The Role of Residual Stress and Heat Affected Zone Properties on Fatigue Crack Propagation in Friction Stir Welded 2024- T351 Aluminium Joints, International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 77-88.
23. CABIBBO, M., MECCIA, E., EVANGELISTA, E., 2003, TEM Analysis of a Friction Stir- Welded Butt Joint of Al-Si-Mg Alloys, Materials Chemistry & Physics, Vol. 81, pp. 289- 292.
24. CAMPBELL, G., STOTLER, T., 1999, Friction Stir Welding of Armor Grade Aluminium Plate, Welding Journal, Vol. 78, pp. 45- 47.
25. CAREY, H. B., 2002, Modern Welding Technology, Prentice Hall, Inc. USA.
26. CEDERQVIST, L., REYNOLDS, A. P., 2001, Factors Affecting The Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints, Welding Journal, Vol 80, No. 12, pp. 281- 287.

27. CHARIT, I., R.S.MISHRA, R.S., 2003, High Strain Rate Superplasticity in a Commercial 2024 Al Alloy via Friction Stir Processing, *Materials and Engineering* Vol. A359, pp. 290- 296.
28. CHEN, C., KOVACEVIC, R., JANDGRIC, D., 2003, Wavelet Transform Analysis of Acoustic Emission in Monitoring Friction Stir Welding of 6061 Aluminum, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1383- 1390.
29. COLLIGAN, K. J., KONKOL, P. J., FISHER, J.J., PICKENS, J. R., 2003, Friction Stir Welding Demonstrated for Combat Vehicle Construction, *Welding Journal*, Vol. 82, No.3, pp. 34- 40.
30. DAVENPORT, A. J., AMBAT, R., JARIYABOON, M., WILLIAMS, S. W., PRICE, D. A., WESCOTT, A, MORGAN, P. C., 2003, Corrosion of Friction Stir Welds in Aerospace Alloys, Abs. 495, 204th Meeting, 2003, The Electrochemical Society Inc., Amerika.
31. DAWES, C.J., THOMAS, W., 1995, Friction Stir Joining of Aluminium Alloys, *TWI Bulletin* 6, Reprint 493/6/95, pp. 124-127.
32. DAWES, C.J., THOMAS, W.M., 1996, Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys, *Welding Journal*, Vol. 75, No.3, pp. 41- 45.
33. DEGARMO, E. P., BLACK, J. T, KOHSER, R. A., 1988, "Materials and Processes in Manufacturing", Seventh Edition, Macmillan Publishing Co. USA.
34. DENQUIN, A., ALLEHAUX, D., CAMPACNAC, M. H., LAPASSET, G., 2002, Influence of the Initial Ageing Condition on Microstructure and Properties of a Friction Stir Welded 6056 Alloy, *Materials Science Forum*, Vols. 396- 402, pp. 1199- 1204.
35. DICKERSON, T.L., PRZYDATEK, J., 2003, Fatigue of Friction Stir Welds in Aluminium Alloys That Contain Root Flaws, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 1399-1409.
36. DOLBY, R.E., SANDERSON, A., THREADGILL, P. L., 2001, Recent Developments and Applications in Electron Beam and Friction Technologies, 7th International Aachen Welding Conference, 3-4 May 2001, Germany.
37. DOMKE, W., 1988, Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi, Çev. M. Y. Gürleyik, Trabzon.
38. ELLIS, M. B. D., SPILLER, K. R., 1993, Gas Shielded Fusion Welding of Aluminium Alloys- A Review of the Techniques, *Welding and Metal Fabrication*, No. 11/12, pp. 441- 447.

39. EN 1043-2, 1996, Destructive Tests on Welds in Metallic Materials- Hardness Test- Part 2: Micro Hardness Testing on Welded Joints, European Standards, CEN, Brussel.
40. EN 288-4, 1992, Specification and Approval of Welding Procedures for Metallic Materials- Part 4: Welding Procedure Tests for the Arc Welding of Aluminium and Its Alloys, European Standards, CEN, Brussels.
41. EN 573-4, 1995, Aluminium and Aluminium Alloys- Chemical Composition and Form of Wrought Products, Part 4. Forms of Products, European Standards, CEN, Brussel.
42. EN 895, 1995, Destructive Tests on Welds in Metallic Materials- Transverse Tensile Tests, European Standards, CEN, Brussel.
43. EN 910, 1996, Destructive Tests on Welds in Metallic Materials- Bend Tests, European Standards, CEN, Brussel.
44. EN ISO 18273, 1999, Welding Consumables- Wire Electrodes, Wires, and Rods for Arc Welding of Aluminium and Aluminium Alloys- Classifications (ISO/DIS 18273:1999), European Standards, CEN, Brussel.
45. EN ISO 9692-3, 2001, Welding and Allied Processes- Recommendations for Joint Preparation- Part 3: Metal Inert Gas Welding and Tungsten Inert Gas Welding of Aluminium and Its Alloys, European Standards, CEN, Brussel.
46. ERICSSON, M., SANDSRÖM, R., 2003, Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds, and Comparison with MIG and TIG, International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 1379- 1387.
47. ERIKSSON, L. G., LARSSON, R., 2001, New Technology Changing the Rules of the Game in Al Construction, Svetsaren, No.2,3, pp. 3- 6.
48. ERIKSSON, L. G., LARSSON, R., 2002, Friction Stir Welding- Progress in R&D and New Applications, Svetsaren, Volume 57, No. 2, pp. 11- 14.
49. ESAB Superstir, 1996, Friction Stir Welding Machines and Installations for Weldjoint in Aluminium, PEMA Media Hallberg, Sweden.
50. FLORES, O. V., KENNEDY, C., MURR, L. E., BROWN, D., PAPPU, S., NOWAK, B. M., MCCLURE, J. C., 1998, Microstructural Issues in a Friction-Stir- Welded Aluminum Alloy, Scripta Materialia, Vol. 38, No. 5, pp. 703- 708.
51. GRÖNBECK, I., LARSSON, H., 1995, Welding Consumables for Aluminium Alloys, Svetsaren, No. 3, pp. 20- 23.
52. HASSAN, Kh.A.A., NORMAN, A.F., PRICE, D.A., PRANGNELL, P.B., 2003, Stability of Nugget Zone Grain Structures in High Strength Al-Alloy Friction Stir Welds During Solution Treatment, Acta Materialia, Vol. 51, pp. 1923- 1936.

53. HEINZ, B., SKROTZKI, B., 2002, Characterization of a Friction- Stir-Welded Aluminum Alloy 6013, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 33B, pp. 489- 498.
54. HILTON, D., 1990, "Shielding Gases for Gas Metal Arc Welding", Welding and Metal Fabrication, pp. 232-334.
55. JAMES, M.N., HATTINGH, D.G., BRADLEY, G.R., 2003, Weld Travel Speed Effects on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083 Aluminium, International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 1389- 1398.
56. JOHN, R., JATA, K.V., SADANANDA, K., 2003, Residual Stress Effects on Near-Threshold Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welds in Aerospace Alloys, International Journal of Fatigue, Vol.25 , pp. 939- 948.
57. JOHNSEN, M. R., 1999, Friction Stir Welding Takes Off at Boeing, Welding Journal, Volume 78, No. 2, pp. 35- 39.
58. KALLEE, S.W., DAVENPORT, J., NICHOLAS, E.D., 2002, Railway Manufacturers Implement Friction Stir Welding, Welding Journal, Vol. 81(11), pp.47- 50.
59. KALLEE, W., NICHOLAS, E.D., THOMAS, W.M., 2001, Friction Stir Welding- Invention, Innovations and Applications, INALCO 2001, 8th International Conference on Joints in Aluminium, Munich, Germany, 28- 30 March 2001.
60. KALUÇ, E., 2004, Kaynak Teknolojisi El Kitabı- Cilt 1- Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri, MMO Yayını, Yayın No: 356, Ankara.
61. KALUÇ, E., BOZDUMAN, B., 1998, Sürtünen Eleman ile Birleştirme Yöntemi, Makina Magazin, Sayı: 27, s.54-61.
62. KALUÇ, E., 2000, Metallerin Kaynak Kabiliyeti, Lisansüstü Ders Notları, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
63. KHANAPETOV, M., "Welding and Cutting of Metals", Mir Publishers, 1979, Moscova-Russia.
64. KNIPSTRÖM, K. E., PEKKARI, B., 1997, A Novel Joining Process- Friction Stir Welding, Svetsaren, No. 1-2.
65. KNIPSTRÖM, K. E., PEKKARI, B., 1997, Friction Stir Welding Process Goes Commercial, Welding Journal, Vol. 76, No. 9, pp. 55- 57.
66. KOHN, G., GREENBERG, Y., MAKOVER, I., MUNITZ, A., 2002, Laser Assisted Friction Stir Welding, Welding Journal, Vol. 81, No. 2, pp.46- 48.

67. KRISHNAN, K. N., 2002, On the Formation of Onion Rings in Friction Stir Welds, *Materials Science and Engineering*, A327, pp. 246- 251.
68. KURT, A, ÖZDEMİR, M., BOZ, M., 2003, Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, s. 89- 99.
69. KÜLEKÇİ, M.K., 2003, Mechanical Properties of Friction Stir-Welded of AlCu₄SiMg Aluminium Alloy, *Kovové Materiály*, Vol. 41 (2), pp.97- 105.
70. KÜLEKÇİ, M.K., ŞIK, A., 2003, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Alüminyum Alaşımı Levhaların Birleştirilmesi ve Elde Edilen Kaynaklı Bağlantıların Özellikleri, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, s. 77- 86..
71. KWON, Y.J., SHIGEMATSU, I., SAITO, N., 2003, Mechanical Properties of Fine- Grained Aluminum Alloy Produced by Friction Stir Process, *Scripta Materialia*, Vol. 49, pp. 785- 789.
72. LAHTI, K., 2003, FSW- Possibilities in Shipbuilding, *Svetsaren*, No.1., pp. 6-8.
73. LAHTI, K., JERNSTRÖM, P., 1999, Plasma Welding Aluminum, *Svetsaren* No. 3, pp. 26- 28.
74. LAKHTIN, Y., 1977, *Engineering Physical Metallurgy and Heat- Treatment*, Mir Publishers, Moscow.
75. LAKHTIN, Y., 1977b, *Engineering Physical Metallurgy*, Mir Publishers, Moscow.
76. LARSSON, H., KARLSSON, L., 2000, Friction Stir Welding of AA 5083 and AA 6082, *Svetsaren*, No. 2, pp. 6- 10.
77. LEE, W.B., YEON, Y.M., JUNG, S. B., 2003, The Joint Properties of Dissimilar Formed Al Alloys by Friction Stir Welding According to the Fixed Location of Materials, *Scripta Materialia*, Vol. 49, pp. 423- 428.
78. LEE, W.B., YEON, Y.M., JUNG, S.B., 2003b, The Improvement of Mechanical Properties of Friction –Stir- Welded A356 Al Alloy, Vol. A355, pp. 154- 159.
79. LI, Y., MURR, L.E., MCCLURE, J.C., 1999, Flow Visualization and Residual Microstructures Associated with the Friction- stir Welding of 2024 Aluminum to 6061 Aluminum, *Materials Science and Engineering*, A271, pp. 213- 223.

80. LI, Y., MURR, L.E., MCCLURE, J.C., 1999b, Solid- State Flow Visualization in the Friction Stir Welding of 2024 Al to 6061 Al, Scripta Materialia, Vol. 40, No. 9, pp. 1041- 1046.
81. LIENERT, T.J., STELLWAG, W.L., GRIMMETT, B.B., WARKE, R.W., 2003, Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal, Vol. 82(1), pp.1s- 9s.
82. LITYNSKA, L., BRAUN, R., STANIEK, G., DONNE, C.D., DUTKIEWICZ, J., 2003, TEM Study of the Microstructure Evolution in a Friction Stir- Welded AlCuMgAg Alloy, Materials Chemistry &Physics, Vol. 81, pp. 293-295.
83. LIU, G., MURR, L. E., NIOU, C-S., MCCLURE, J.C., VEGA, F.R., 1997, Microstructural Aspects of the Friction- Stir Welding of 6061- T6 Aluminum, Scripta Metarialia, Vol. 37, No.3, pp. 355- 361.
84. LIU, H.J., FUJII, H., MAEDA, M., NOGI, K., 2003, Tensile Properties and Fracture Locations of Friction- Stir- Welded Joints of 2017- T351 Aluminum Alloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 692- 696.
85. LUCAS, W., 1992, Choosing a Shielding Gas- Part 2, Welding and Metal Fabrication, pp. 269-276.
86. LUCAS, W., 1992b, Shielding Gases for Arc Welding- Part 1, Welding and Metal Fabrication, pp. 218-225.
87. MAHONEY, M. W., 1997, Science Friction, Welding&Joining, pp. 18-20.
88. MATHERS, G., 2002, The Welding of Aluminium and Its Alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
89. MCKAY, D., 1995, Gas Tungsten Arc Welding, Miller Electric Mfg. Co., USA.
90. MESSLER, R.W., 1999, Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy, John Wiley&Sons, Inc., USA.
91. MESSLER, R. W., 2004, What's Next For Hybrid Welding?, Welding Journal, Volume 83, No. 3, pp. 30- 35.
92. METALS HANDBOOK, 1983, Welding, Brazing and Soldering- Volume. 6, Ninth Edition, ASM, USA.
93. METALS HANBOOK, 1990, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials- Volume 2, Tenth Edition, ASM, USA.
94. MINNICK, W. H., 1996, Gas Metal Arc Welding Handbook, The Goodheart-Willcox Co., Inc., USA.

95. MINNICK, W.H., 1996, Gas Tungsten Arc Welding Handbook, The Goodheart-Willcox Co., Inc., USA.
96. NAGASAWA, T., OTSUKA, M., 2002, Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding Joints, <http://www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp/master/abstract/298110.html>.
97. NAKA, T., NAKAYAMA, Y, UEMORI, T., HINO, R., YOSHIDA, F., 2003, Effects of Temperature on Yield Locus for 5083 Aluminum Alloy Sheet, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, pp. 494- 499.
98. NICHOLAS, E. D., KALLEE, S. W., 2000, Friction Stir Welding- A Decade On, IIW Asian Pacific International Congress, Sydney.
99. NORLIN, A., 2000, A Century of Aluminium- a Product of the Future, Svetsaren, No. 2, pp. 31- 33.
100. OĞUZ, B., 1990, Demirdışı Metallerin Kaynağı, Metalurji-Uygulama, Oerlikon, Istanbul.
101. PAO, P. S., GILL, S. J., FENG, C. R., SANKARAN, K. K., 2001, Corrosion-Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded Al 7050, Scripta Materialia, Vol 45, pp. 605- 612.
102. PARK, H. S., KIMURA, T., MURAKAMI, T., NAGANO, Y., NAKATA, K., USHIO, M., 2004, Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welds of 60 % Cu,- 40 % Zn Copper Alloy, Materials Science and Engineering, A 371, pp. 160- 169.
103. PEEL, M, STEUWER, A., PREUSS, M, WITHERS, P.J., 2003, Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminium AA5083 Friction Stir Welds, Acta Materialia, Vol. 51, pp. 4791- 4801.
104. PRADO, R. A., MURR, L. E., SOTO, K.F., MCCLURE, J. C., 2003, Self-optimization in Tool Wear for Friction-Stir Welding of Al 6061+20%Al₂O₃ MMC, Materials Science and Engineering, A349, pp. 156- 165.
105. REITZ, V., 2002, Causing a Stir in Welding, Welding Design and Fabrication, No.4, pp. 46- 49.
106. REYNOLDS, A. P., TANG, W., GNAUPEL-HEROLD, T., PRASK, H., 2003, Structure, Properties, and Residual Stress 304L Stainless Steel Friction Welds, Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1289- 1294.
107. REYNOLDS, A.P., LOCKWOOD, W.D., SEIDAL, T.U., 2000, Processing-Property Correlation in Friction Stir Welds, Materials Science Forum, Vols. 331-337, pp. 1719- 1724.

108. RHODES, C.G., MAHONEY, M. W., BINGEL, W.H., 1997, Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum, Scripta Materialia, Vol. 36, No. 1, pp. 69- 75.
109. ROWE, G., 2003, Essential Variables for MIG Welding Aluminum, Svetsaren, No. 2, pp. 12- 33.
110. SACKS, R.J., 1976, Welding: Principles and Properties, Chas. A. Bennett Co., USA.
111. SALEM, H.G., 2003, Friction Stir Weld Evolution of Dynamically Recrystallized AA 2095 Weldments, Scripta Materialia, Vol. 49, pp. 1103- 1110.
112. SALEM, H.G., REYNOLDS, A.P., LYONS, J.S., 2002, Microstructure and Retention of Superplasticity of Friction Stir welded Superplastic 2095 Sheet, Stripta Materialia, Vol. 46, pp. 337- 342.
113. SANDERSON, A., PUNSHON, C. S., RUSSELL, J. D., 2000, Advanced Welding Processes for Fusion Reactor Fabrication, Fusion Engineering and Design, Vol. 49-50, pp. 77- 87.
114. SMITH, W. F., 2001, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çev. N. G. Kınıkoğlu, Literatür Yayınları No. 65, Istanbul.
115. SU, J.-Q., NELSON, T.W., MISHRA, R., MAHONEY, M., 2003, Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminium, Acta Materialia, Vol. 51, pp. 713- 729.
116. SUTTON, M.A., YANG, B., REYNOLDS, A.P., TAYLOR, R., 2002, Microstructural Studies of Friction Stir Welds in 2024- T3 Aluminum, Materials Science and Engineering, A323, pp. 160- 166.
117. SUTTON, M.A., YANG, B., REYNOLDS, A.P., YAN, J., 2003, Banded Microstructure in 2024- T351 and 2524- T351 Aluminium Friction Stir Welds Part II. Mechanical Characterization, Materials Science and Engineering, Vol. 364, pp. 66- 74.
118. SWINT, W., 2000, ESAB's Partnership with Canada's West Coasts Shipbuilding Industry- Pacificat 1000 Series High Speed Ferry, Svetsaren, No. 2, pp. 28- 30.
119. THE ALUMINUM ASSOCIATION, 1991, Welding Aluminum: Theory and Practice, pp. 6.1- 6.20, USA.
120. THOMAS, W. H., NICHOLAS, E. D., 1997, Friction Stir Welding for the Transportation Industries, Materials&Design, Vol. 18., Nos 4/6, pp. 269- 273.

121. THOMAS, W. M., 1998, Friction Stir Welding and Related Friction Process Characteristics, INOLCO'98, 7th International Conference on Joints in Aluminium, 15- 17 April 1998, pp. 1- 14, Abington, Cambridge, UK.
122. THOMAS, W. M., NICHOLAS, E. D., SMITH, S. D., 2001, Friction Stir Welding- Tool Developments, 2001 TMS Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, USA, 11- 15 February.
123. THOMAS, W. M., TREADGILL, P. L., NICHOLAS, E. D., 1999, The Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 4., No.6, pp.365- 372.
124. TREADGILL, P., 1997, Friction Stir Welds in Aluminium Alloys- Preliminary Microstructural Assessment, TWI Bulletin Reprint 513/2/97, UK.
125. TOPBAŞ, M. A., 1993, Endüstri Malzemeleri- Cilt 1, Yıldız- Istanbul.
126. TULBENTÇİ, K., KALUÇ, E., 1997, Gas Metal Arc Welding (MIG-MAG Welding), Arcotech Publication Nr.1, ISBN 975-94656-0-4, Istanbul.
127. TUTTLE, W., 1991, Understanding Aluminum Welding, No. 2, pp. 43- 46.
128. TULBENTÇİ, K., 1985, Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynak Yöntemi, YÜ Yazokulu, Istanbul.
129. TULBENTÇİ, K., 1987, Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı, YÜ Yazokulu, Istanbul,
130. TULBENTÇİ, K., 1998, MIG- MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi, Arcotech Yayını, No. 2, Istanbul.
131. TULBENTÇİ, K., KALUÇ, E., "Alüminyum ve Alaşımlarının Oksi-Asetilen Kaynağı", Gedik Teknik, Sayı: 2, Haziran 1995, İstanbul, s. 3-12.
132. TULBENTÇİ, K., KALUÇ, E., 1997, Kaynak Teknolojisinde Yeni Nesil Akım Üreteçleri: İnverterler, Kaynak Teknolojisi 1. Ulusal Kongre ve Sergisi, s. 93- 102, Ankara.
133. ULLYSSE, P., 2002, Three- dimensional Modelling of the Friction Stir- Welding Process, International Journal of Machine Tools&Manufacture, Vol. 42, pp. 1549- 1557.
134. WEISSBACH, W., 1993, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 4. Baskı, Çev. S. Anık, E. S.Anık, M. Vural, Istanbul.
135. WELDING HANBOOK, 2004, Volume 2, Welding Processes- Part I Ninth Edition, AWS, USA.

136. WELDING HANBOOK, 1996, Volume 3, Materials and Applications- Part I Eight Edition, AWS, USA.

137. WELDING HANDBOOK, 1978, Volume 2- Welding Processes- Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering, Seventh Edition, AWS, USA.

138. WELDING HANBOOK, 1991, Volume 2, Welding Processes, Eight Edition, AWS, USA.

139. WEMAN, K., 2000, Equipment for Aluminium Welding, Svetsaren, No. 2, pp. 11- 13.

140. www.gdls.com

141. www.nasa.gov

142. YAMADA, S., MASUBUCHI, K., 2000, Advanced Welding Technology Keeps Japan's High- speed Trains on Track, Welding Journal, Vol. 79, No. 11, pp. 48- 53.



- 7) KALUÇ, E., TABAN, E., “Oksijen ile Kesme Seminer Notu”, Diler Demir Çelik A.Ş., Eğitim Salonu, 60 s., KOÜ KATAEM- MMO Kocaeli Şubesi, 05- 14 Ağustos 2003, KOCAELİ.
- 8) KALUÇ, E., TABAN, E., “Elektrik Direnç Kaynak Yöntemleri Seminer Notları” Assan Hanıl A.Ş. Eğitim Salonu, 38 s., KOÜ KATAEM- MMO Kocaeli Şubesi 20 Mart 2004, KOCAELİ.
- 9) TABAN, E., KALUÇ, E., “Elektron Işın Kaynağı ve Endüstriyel Uygulamaları”, MakinaTek, (Kabul edildi yayımlanacak)
- 10) TABAN, E., KALUÇ, E., “Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler, Kaynak Kabiliyetleri ve Korozyon Davranışları” Metal Dünyası, (Kabul edildi, yayımlanacak)
- 11) KALUÇ, E., TABAN, E., “Laser Işını ile Kaynak Yöntemi ve Endüstriyel Uygulamaları” Makina Tek, (Kabul edildi, yayımlanacak).
- 12) TABAN, E., KALUÇ, E., “Plazma Arkı ile Kaynak ve Uygulamaları” Mühendis ve Makina, (Kabul edildi, yayımlanacak).
- 13) TABAN, E., KALUÇ, E., “Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynağı ve Endüstriyel Uygulamaları” Metal Dünyası, (Kabul edildi, yayımlanacak).
- 14) TABAN, E., KALUÇ, E., “Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi” Mühendis ve Makina, (Gönderildi).

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

- 1) ÇELİK, A. ALSARAN, A., KARAKAN, M., TABAN, E., "İyon Nitrürleme Sonrası Isıl İşlemin Yapısal ve Mekanik Özelliklere Etkisi ", 9. Denizli Malzeme Sempozyumu 8-9-10 Mayıs 2002 Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Denizli; Bildiriler Kitabı, s. 254-258., Denizli.
- 2) TABAN, E., KALUÇ, E., "Çinko Kaplı Çeliklerin Kaynağında Ortaya Çıkan Problemler ve Giderilmesi", Malzeme Bilimi ve Üretim Yöntemleri Sempozyumu (MBÜY 2003), Bildiriler Kitabı, s. 322- 331., İzmir.
- 3) TABAN, E., KALUÇ, E., "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler ve Kaynak Edilebilirliği", Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, Bildiriler Kitabı, s. 257- 267, Kocaeli.
- 4) TABAN, E., KALUÇ, E., "Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler, Kaynak Kabiliyetleri ve Korozyon Davranışları",Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s. 989- 1000, 14- 15- 16 Nisan 2004 Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Denizli.
- 5) TABAN, E., KALUÇ, E., "Petrol ve Doğalgaz Boru Hatlarının Yapımında Kullanılan Süpermartenzitik Paslanmaz Çelikler ve Kaynak Edilebilirliği", Metal Dünyası, Mayıs 2004, Sayı: 132., s. 87- 90.
- 6) KALUÇ, E., TABAN, E., "İleri Kaynak Teknolojisi", Ders Notları, KOÜ Mühendislik Fakültesi Yayını, No:138, Nisan 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Emel Taban, 1980 Erzurum doğumlu olup ilk öğrenimini takiben orta öğrenimini Erzurum Anadolu Lisesinde tamamlamış ve 1998 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve İmalat Bilim Dalında 2002- 2003 Güz yarıyılında yüksek lisansa başlamıştır, aynı zamanda Makina Mühendisliği Bölümü Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.