

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CMT-MIG KAYNAKLI ALÜMİNYUM VE ÇELİK BAĞLANTILARININ
ÖZELLİKLERİ VE OPTİMİZASYONU**

ERDEM ÜNEL

KOCAELİ 2016

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

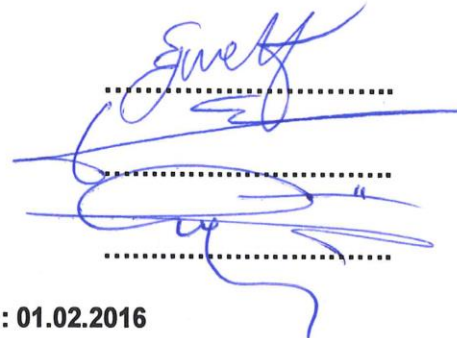
**CMT-MIG KAYNAKLI ALÜMİNYUM VE ÇELİK BAĞLANTILARININ
ÖZELLİKLERİ VE OPTİMİZASYONU**

ERDEM ÜNEL

**Doç.Dr. Emel TABAN
Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Prof.Dr. Erdinç KALUÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Doç.Dr. Uğur ÖZSARAÇ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.**



Tezin Savunulduğu Tarih: 01.02.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

EN AW 5754-H111 ve DX54D+Z alüminyum alaşımı & galvanize çelik robotik CMT kaynak bağlantılarının proses parametrelerinin optimizasyonu ile birlikte gerçekleştirilmesi, metalurjik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konulu bu çalışmayı bana öneren ve her türlü desteği sağlayan, bursiyer olarak yer aldığım 114M784 kodlu TÜBİTAK projesinin yürütücüsü ve tez danışmanı hocam Sayın Doç. Dr. Emel TABAN' a ve bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren Prof. Dr. Erdinç KALUÇ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Robotik CMT kaynaklarının gerçekleştirilmesinde Fronius İstanbul Elektronik Ticaret ve Servis Ltd. Şti.' de tüm imkânları sağlayan genel müdür Sayın Nusret BİLEN' e ve kaynakların yapılmasında yoğun emeği geçen Ali DÜNDAR' a teşekkür ederim. Yorulma deneylerinin yapılmasında gerekli laboratuvar imkânını sağlayan Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Aydın ŞIK'a ve her ihtiyacım olduğunda tereddütsüz yardımına koşan Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Merve YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu uzun ve zorlu süreçte olduğu gibi her koşulda desteklerini esirgemeyen ve yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunar tezin sonuçlarının tüm bilim dünyasına ve ülke endüstrisine faydalı olmasını dilerim.

Şubat - 2016

Erdem ÜNEL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ.....	1
1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	3
1.1. Alüminyumun Özellikleri.....	5
1.1.1. Fiziksel Özellikleri.....	5
1.1.1.1. Yoğunluk.....	5
1.1.1.2. Elektrik iletkenliği ve öz direnç.....	6
1.1.1.3. Manyetiklik.....	7
1.1.1.4. Isıl iletkenlik.....	8
1.1.1.5. Isıl genleşme.....	8
1.1.1.6. Korozyon Dayanımı.....	9
1.1.2. Alüminyumun Mekanik Özellikleri.....	10
1.2. Alüminyum Alaşımaları.....	12
1.2.1. Dövme alüminyum alaşımaları.....	13
1.2.2. Döküm alüminyum alaşımaları.....	16
1.3. Alüminyumun Otomotiv Sektöründeki Yeri ve Önemi.....	16
2. ALÜMİNYUM-ÇELİK KAYNAĞINDA KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	21
2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	21
2.2. Sürtünme Nokta Karıştırma Kaynağı (FSSW).....	23
2.3. Deltaspot Kaynağı.....	25
2.4. Laser Roll Kaynağı.....	27
2.5. Laser-MIG Hibrit Kaynağı.....	28
2.6. Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transferi) Yöntemi.....	29
2.6.1. CMT Yönteminin genel üstünlükleri.....	32
2.6.1.1. Düşük ısı girdisi.....	32
2.6.1.2. Çapaksız kaynak.....	32
2.6.1.3. Kararlı ark.....	32
2.6.2. Kaynak bağlantılarında CMT yönteminin üstünlükleri.....	32
2.6.2.1. Çelik kaynaklı bağlantılarında.....	32
2.6.2.2. Alüminyum-alüminyum CMT kaynaklı bağlantılarında.....	34
2.6.2.3. Çelik-alüminyum CMT kaynaklı bağlantılarında.....	36
2.6.2. Yöntemin türevleri.....	37
2.6.2.1. CMT Pulse.....	38
2.6.2.2. CMT Advanced.....	38
2.6.2.3. CMT Advanced pulse.....	38
3. KONUyla İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR VE BU ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI.....	40
3.1. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	40
3.2. Çalışmanın Amacı ve Planlanması.....	59

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	60
4.1. Genel	60
4.2. Deney Malzemesi.....	60
4.3. Deney Parçalarının Boyutları ve Deney Düzeneği	60
4.4. Robotik CMT Kaynak İşleminin Yapılışı.....	63
4.5. Robotik CMT Kaynak Yönteminde Kullanılan Parametreler	64
4.6. Deney Numunelerinin Hazırlanma Esasları.....	65
4.6.1.Çekme deney numunelerinin çıkarılması.	65
4.6.2.Yorulma deney numunelerinin çıkarılması.	67
4.6.3.Metalografi incelemeleri ve sertlik taraması için numune hazırlanması	67
4.7. Deneylelerin Yapılışı	67
4.7.1.Çekme deneyleri	67
4.7.2.Yorulma deneyleri	68
4.7.3.Metalografik inceleme	69
4.7.4.Vickers sertlik taraması.....	69
5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	70
5.1. Görsel İnceleme Sonuçları.....	70
5.2. Çekme Deneyi Sonuçları	71
5.3. Parametre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar	72
5.4. Metalografik İnceleme Sonuçları.....	75
5.5. Mikrosertlik Deney Sonuçları	84
5.5. Yorulma Deneyi Sonuçları	85
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR	90
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	94
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Birim hacim başına ağırlık miktarı.....	6
Şekil 1.2.	Alaşım elementinin yoğunluk ve Young modülüne olan etkisi	6
Şekil 1.3.	Alüminyumun elektrik iletkenliği	7
Şekil 1.4.	Alüminyumun ısı iletkenlik değerinin diğer metaller ile karşılaştırılması	8
Şekil 1.5.	Haddelenmiş 3103 alüminyum levhanın çukurcuk korozyon dayanımı.....	9
Şekil 1.6.	Alaşım elementinin alüminyumun korozyon dayanımı ve yorulma mukavemetine etkisi.....	9
Şekil 1.7.	Farklı saflıktaki alüminyum ve alaşımlarının sıcaklığa bağlı olarak % uzama ve mukavemetlerdeki değişim. (1) %99,5 (2) %99,99 (3) %99,997	11
Şekil 1.8.	Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi	11
Şekil 1.9.	Alüminyumun araçlarda kullanılması ve tarihsel gelişimi.....	17
Şekil 1.10.	Avrupa’ da üretilen araçlarda kullanılan alüminyum miktarı.....	18
Şekil 1.11.	Model bazında kullanılan % alüminyum miktarı	18
Şekil 1.12.	Dünya genelinde CO ₂ emisyonu hedefleri.....	19
Şekil 2.1.	Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi (FSW) prensibi.....	22
Şekil 2.2.	Sürtünme karıştırma yöntemi ile birleştirilen 2013 Honda Accord ön alt çerçeve	22
Şekil 2.3.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yönteminin prensibi.....	24
Şekil 2.4.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı birleştirme mekanizması.....	24
Şekil 2.5.	FSSW yöntemi ile birleştirilmiş alüminyum ile çelik levha kesit görüntüsü.....	24
Şekil 2.6.	Robotik FSSW uygulanan Mazda RX-8 arka kapısı ve dış panel görüntüsü.....	25
Şekil 2.7.	Deltaspot kaynak yönteminde kullanılan kaynak tabancası.....	26
Şekil 2.8.	Deltaspot kaynağı proses bandı	26
Şekil 2.9.	Laser Roll Kaynak prosesinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 2.10.	Hibrit Laser-MIG kaynak prosesi	28
Şekil 2.11.	CMT yönteminin aşamaları (a-d)	30
Şekil 2.12.	CMT yönteminin milisaniye zaman diliminde akışı.....	30
Şekil 2.13.	CMT yönteminde akım ve voltajın zamanla ilişkisi.....	31
Şekil 2.14.	Robotik ve manuel uygulamada CMT sistem konfigürasyonu 1) TPS 3200/4000/5000 CMT güç kaynağı, 2) RCU 5000’i uzaktan kumanda ünitesi, 3) FK 4000 soğutma ünitesi, 4) Robot arayüzü, 5) VR 7000 CMT Tel besleyici, 6) Robot, 7) Tel tamponu, 8) Tel desteği, 9) TransPuls sinerjik 2700 CMT güç kaynağı, 10) Su soğutmalı CMT uygulaması için geliştirilmiş torç.....	31

Şekil 2.15. Kısa devre arkı I:185 A, U:17,6 V (a) ve CMT I:200, U:16,2 V(b).....	32
Şekil 2.16. Kısa ark ile CMT yöntemi kaynak hızlarının karşılaştırılması (a) ve 1m kaynak dikişinde oluşan çapak miktarı g/m (b).....	33
Şekil 2.17. 1mm Çelik kaynağında kısa ark ile CMT yöntemi ısı girdileri karşılaştırılması	33
Şekil 2.18. Kısa devre arkı ile I:97 A, U:18,1 V (a) ve CMT ile I:98, U:11,8 V 1mm çelik kaynağında kaynak dikişi görüntüleri	33
Şekil 2.19. Daldırma galvaniz ile kaplanmış çelik ile elektro galvaniz kaplanmış 1mm kalınlığındaki çelik sacların CuSi3 dolgu metali ile CMT lehim görüntüsü	34
Şekil 2.20. 0,3 mm Alüminyum levhanın kaynağı Vs:6,4m/dk	34
Şekil 2.21. 0,8 mm iki AlMg3 levhanın hiçbir bağlantı tertibatı kullanılmadan alın birleştirilmesi.....	35
Şekil 2.22. Isı girdisi ve kaynak hızlarının karşılaştırılması	35
Şekil 2.23. 2 mm kalınlığındaki levhanın bindirme kaynağında boşluk doldurma kabiliyeti	36
Şekil 2.24. Çelik/Alüminyum hibrit bağlantısı ve çarpışma testi görüntüleri	37
Şekil 2.25. CMT ve darbe döngülerinden oluşan kombinasyon.....	38
Şekil 2.26. Negatif CMT ve pozitif CMT' nin kombinasyonu	38
Şekil 2.27. Negatif CMT ve darbe döngülerinden oluşan kombinasyon	39
Şekil 2.28. Farklı CMT uygulamalarının diğer yöntemler ile karşılaştırılması.....	39
Şekil 3.1. 1mm AA6061T6-1mm Galvanizli yumuşak çelik: (a) ön yüz, (b) arka yüz	40
Şekil 3.2. CMT Kaynak-lehimlenmiş 1mm kalınlığındaki AA6061T6-1mm Galvanizli çelik mikroyapı görüntüsü (Cao ve diğ., 2013)	41
Şekil 3.3. (a) kaynak metalinin ortasında işaretlenmiş bölgeden alınan mikroyapı (b) kaynak metalinin alt bölgesinde kesikli olarak işaretlenmiş bölgeden alınan mikroyapı	41
Şekil 3.4. Arayüzey mikroyapısı (a) ve çizgi analizi sonucu (b)	42
Şekil 3.5. Geçiş bölgesine ait mikroyapı (a) ve mavi ok boyunca alınan çizgi analiz sonucu (b).....	42
Şekil 3.6. Lehim arayüzeyinde bağlantı mukavemeti, ısı girdisi ve IMC tabaka kalınlığının etkileşim. (a) Isı girdisinin bağlantı mukavemetine etkisi. (b) Isı girdisi – IMC kalınlık değişimi. (c) IMC kalınlığının bağlantı mukavemetine etkisi	43
Şekil 3.7. Örnek A ve B nin görüntüleri. (a) ön ve (b) arka	44
Şekil 3.8. Artan ısı girdisi ile bağlantı açısında meydana gelen değişim	45
Şekil 3.9. Çelik ile alüminyum arayüzeyinin SEM görüntüsü	45
Şekil 3.10. Çelik ile kaynak metali arayüzeyi SEM görüntüsü	46
Şekil 3.11. Farklı ısı girdisi değerlerinde arayüzeyde oluşan intermetalik tabakaların mikrosertlik değerleri	46
Şekil 3.12. Alüminyum çelik bağlantısının makro görüntüsü ve kaynak dikişi	48
Şekil 3.13. Kaynak dikişi SEM görüntüsü ve EDX analizi bölgesi ile EDX analiz sonuçları	48
Şekil 3.14. Çelik ile alüminyum arayüzeyinde oluşan intermetalik tabaka	49
Şekil 3.15. Mikro ve makroyapı örnekleri (Muncut ve diğ., 2011)	50
Şekil 3.16. Farklı parametreler ile birleştirilmiş metallerin kaynak dikiş görüntüleri ve örnek birleştirme.....	52
Şekil 3.17. Kaynak konfigürasyonu (Yang ve diğ., 2013-a)	53
Şekil 3.18. CMT kaynağının makro ve mikroyapıları (a) üst görünüş ve (b) kesit (kaynak hızı:0,5m/dak, tel besleme hızı:4,4 m/dak, metaller arası boşluk:0 ve torç bindirme mesafesi:0).....	54
Şekil 3.19. Kaynak metalindeki çinko-zengin bölge	55
Şekil 3.20. İntermetalik tabakanın SEM görüntüsü	56

Şekil 3.21. CMT kaynak edilmiş alüminyum ile galvanizsiz karbon çeliği makro ve kesit görüntüsü (a) üst görünüş ve (b) kesit görüntüsü	56
Şekil 3.22. Hata türleri ve kırılma yüzeyleri. Alüminyum HAZ bölgesinden kırılma (a) ve Alüminyum çelik arayüzeyinden kırılma (b).....	57
Şekil 3.23. Isıdan etkilenmiş bölge şematik görünüm	57
Şekil 4.1. Kaynak edilecek parçaların boyutları.....	62
Şekil 4.2. Deney düzeneği ve kaynak torç açıları şematik gösterimi	62
Şekil 4.3. Sinerjik robotik CMT kaynağının uygulanması.....	63
Şekil 4.4. Robotik CMT kaynağı sonrası kaynak dikişinin görünüşü	63
Şekil 4.5. TS EN 288-4' e göre kaynaklı levhalardaki numune dağılım planı.....	66
Şekil 4.6. EN ISO 4126:2012 standart test numunesi boyutları.....	66
Şekil 4.7. Yorulma deney numune ölçüleri	67
Şekil 4.8. (a) INSTRON çekme test makinası, (b) çekme test numuneleri.....	68
Şekil 4.9. (a) Eğmeli yorulma makinası ve (b) yorulma numunesi.....	69
Şekil 5.1. CMT kaynaklı 14 numuneye ait kaynak dikişi görüntüleri	70
Şekil 5.2. EN AW 5754-H111 çekme testi numunesi	71
Şekil 5.3. DX54D+Z Galvanize çelik çekme testi numunesi	71
Şekil 5.4. Minitab programı önyüz görüntüsü	73
Şekil 5.5. S/N için faktör eğrilerinin grafiksel gösterimi	74
Şekil 5.6. Ortalamalar için faktör etkilerinin grafiksel gösterimi.....	75
Şekil 5.7. 1 no'lu numune arayüzeyi 500x Ortalama 3,89µm IMC Isı girdisi 0,65 kJ cm ⁻¹	76
Şekil 5.8. 9 no'lu numune arayüzey görüntüsü 500x. Isı girdisi 1,34 kJcm ⁻¹	76
Şekil 5.9. Isı girdisinin IMC kalınlığına etkisi	78
Şekil 5.10. Isı girdisinin bağlantı mukavemetine etkisi	78
Şekil 5.11. 7 Numaralı örnek grubu kaynak metali SEM görüntüsü	79
Şekil 5.12. Çinkoca zengin bölge (a) örnek 7, (b) örnek 2	79
Şekil 5.13. EDX çizgi analiz sonucu	80
Şekil 5.14. 1 no' lu numune (a) ve 10 no' lu numune (b) ye ait makro görüntüler	80
Şekil 5.15. Alüminyum ile çelik arayüzeyinde oluşan IMC tabakası SEM görüntüsü. (a) numune 3, ortalama IMC kalınlık 2,30 (b) numune 5, ortalama IMC kalınlık 4,63	81
Şekil 5.16. 1 no' lu numuneye ait IMC den' alınan EDX analizi sonucu	81
Şekil 5.17. 1 ve 16 no'lu numunelere ait kopma türü görüntüleri (a) ısıdan etkilenmiş bölgeden kopma, (b) IMC arayüzeyden kopma	82
Şekil 5.18. 1' no lu numuneye ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	83
Şekil 5.19. 5 no' lu numuneye ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	84
Şekil 5.20. 16 no' lu numuneye ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	84
Şekil 5.21. Mikrosertlik ölçümü alınan bölge şematik gösterimi.....	85
Şekil 5.22. Farklı ısı girdisi değerlerinde kaynak metali ve ana metal aras mikrosertlik dağılım grafiği	85
Şekil 5.23. Eğmeli yorulma test sonuçları.....	86

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metaller ile karşılaştırılması	4
Tablo 1.2. Dökme ve döküm alüminyum alaşım türleri ve alaşım içerikleri	12
Tablo 1.3. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanları	12
Tablo 1.4. Alüminyum alaşım grupları	14
Tablo 1.5. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına TS 1321' e göre uygulanan temel sertleştirme işlemleri.....	15
Tablo 1.6. Döküm alüminyum alaşımlarının simgelenmesi.....	16
Tablo 3.1. 1060 Al alaşımı ve Galvanizli çeliğin birleştirilmesinde kullanılan CMT kaynak parametreleri.....	44
Tablo 3.2. AlMg3 ve DX51D kaynağında kullanılan parametreler	52
Tablo 4.1. Deneyde malzemelerinie ait kimyasal kompozisyonlar	61
Tablo 4.2. Deney malzemelerinin mekanik özellikleri	61
Tablo 4.3. L16 Deney deseni	64
Tablo 4.4. Robotik CMT kaynak yönteminde kullanılan parametreler	65
Tablo 5.1. Çekme testi sonrası L16 deney deseni üzerindeki kaynak parametreler, elde edilen ortalama yük değeri ve ısı girdisi.....	71
Tablo 5.2. Parametrelere ait dereceler	73
Tablo 5.3. Sinyal gürültü oranı için varyans analizi	74
Tablo 5.4. Numunelere ait mukavemet, ısı girdisi ve intermetalik faz kalınlığı değerleri	77
Tablo 5.5. Numunelere ait ortalama yorulma çevrim sayısı.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
Ar	: Argon
GPa	: Giga Pascal
He	: Helyum
I	: Akım
J/sn	: Joule/saniye
kg	: Kilogram
kg/mm ²	: Kilogram/milimetre ²
kN	: Kilonewton
KWh	: Kilowatt/hour
Lt	: Litre
MPa	: Mega Pascal
N/mm ²	: Newton/milimetre ²
Rm	: Maksimum çekme mukavemeti
Rp0,2	: Akma mukavemeti
U	: Potansiyel farkı
V	: Voltaj
Vs	: Welding Speed (Kaynak hızı)
µm	: Mikrometre
Zn	: Çinko

Kısaltmalar

ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
AW	: Aluminum Wrought (Dövme Alüminyum)
AWS	: American Welding Society (Amerikan Kaynak Cemiyeti)
CMT	: Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transferi)
CMTF	: Cold Metal Transfer Pulse (Soğuk Metal Transferi Puls)
EDX	: Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi)
EN	: European Norms (Avrupa Standartları)
FSSW	: Friction Spot Stir Welding (Sürtünme Nokta Karıştırma Kaynağı)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
GMAW	: Gas Metal Arc Welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
HAZ	: Heat Affected Zone (Isıdan Etkilenmiş Bölge)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
IACS	: International Annealed Copper Standard (Uluslararası Tavlı Bakır Standardı)
IMC	: Inter Metallic Compound (İntermetalik Bileşen)
KHI	: Kawasaki Heavy Industries (Kawasaki Ağır Sanayi)
LNG	: Liquid Natural Gas (Sıvı Doğal Gaz)
LOM	: Light Optical Microscope (Işık Mikroskobu)
MIG/MAG	: Metal Inert Gaz/Metal Aktif Gaz
RFW	: Resistance Spot Welding (Direnç Nokta Kaynağı)
S/N	: Signal/Noise (Sinyal/Gürültü)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SPH :Sıkı Paket Hegzagonal
TWI :The Welding Institute (Kaynak Enstitüsü)
YMK :Yüzey Merkezli Kübik

CMT-MIG KAYNAKLI ALÜMİNYUM VE ÇELİK BAĞLANTILARININ ÖZELLİKLERİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Son zamanlarda, otomotiv endüstrisi yakıt tasarrufu sağlayan araçlar üretmek ve böylece enerji tüketimini ve hava kirliliğini azaltmak için çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Daha hafif konstrüksiyona olan ihtiyaç farklı metallerin kullanılmasını beraberinde getirmiştir. Böylece çelik-alüminyum gibi farklı metallerin birleştirilmesi gereklilik haline dönüşmüştür. Bu endüstriyel gereklilik üreticileri 2004 yılında Fronius tarafından geliştirilen ve bu çalışmada kullanılan soğuk metal transferi (CMT) gibi yüksek teknolojik kaynak prosesleri geliştirmeye yönlendirmektedir.

Bu çalışmada, 480x150 mm boyutlarında 0,75 mm DX54D+Z galvanizli çelik ve 1 mm EN-AW-5754 alüminyum alaşımı levhalar L16 Taguchi deney tasarımı yöntemi uygulanmak üzere robotik CMT kaynak teknolojisi ile birleştirilmiştir. Birleştirmeler 1,2 mm çapında AISi3Mn dolgu metali kullanılarak 10 mm bindirme mesafesinde ve ticari saflıktaki argon koruyucu gaz ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmesi amacıyla çekme, yorulma testleri uygulanmış, taramalı elektron mikroskopu (SEM), X-ray spektrometresi (EDX) ve optik ışık mikroskopu (LOM) ile analiz edilmiştir. Bağlantıların kaynak bölgelerinden alınan numuneler mikroskobik ve makroskobik olarak incelenmiş, mikro sertlik taraması yapılmıştır. Kırılma yüzeyleri SEM ile incelenerek kaynak bölgelerinin mikroyapısal özellikleri incelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda CMT yöntemi ile birleştirilmiş çelik-alüminyum alaşımına ait çekme test sonuçları temel alınarak yapılan analiz ile optimum kaynak parametreleri 3-4 m/dak tel besleme hızı, 0-1 mm elektrot besleme mesafesi, 8-10 mm/s kaynak hızı değerleri olarak elde edilmiştir. Mukavemet, intermetalik tabaka kalınlığı ve yorulma testi sonuçları arasındaki ilişki incelendiğinde bu iki metalin belirtilen proses parametreleri ile uygun şekilde birleştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: CMT, DX54D+Z, EN-AW 5757, Farklı Metallerin Kaynağı, Taguchi Analizi.

INVESTIGATION ON PROPERTIES OF ALUMINUM AND STEEL CMT-MIG WELDS AND ITS OPTIMIZATION

ABSTRACT

Recently, the growing demand for fuel efficient vehicles to reduce energy consumption and air pollution is a big challenge for the automotive industry. The need for lightweight constructions has become strong interest in multi-material systems. Therefore, joining dissimilar materials as steel-aluminium alloy has become necessity. The industrial demand drives manufacturers to develop high performance welding process like Cold Metal Transfer (CMT) invented by Fronius in 2004 that has been used in this research.

In this study, 0,75mm DX54D-Z galvanized steel and 1mm EN-AW 5754 plates with dimension 480x150 mm were welded by robotic CMT welding equipment by using L16 array Taguchi method. 1,2 mm AISi3Mn filler wire and commercially pure argon shielding gas have been used with an overlap distance of 10mm. Tensile, fatigue tests have been applied to specimens extracted from all weldments. Scanning electron microscope (SEM), X-ray spectrometry (EDX) and light optical microscopy (LOM) and microhardness have been main characterization methods for microstructural analysis. Fracture surface of tensile test specimens has been examined by SEM for investigating microstructural properties of weld zones.

As a result, the optimum process variables for weldability of 1 mm EN-AW 5754 and 0,75 mm DX54D-Z joints could be obtained with a deviation distance range of 0-1mm, a welding speed range of 8-10 mm/s and a wire-feed speed range of 3–4 m/min. Correlation between joint strength, IMC thickness and fatigue testing has been investigated and it is concluded that it is feasible to joint mentioned materials using above process parameters.

Keywords: CMT, DX54D+Z, EN-AW-5754, Dissimilar Metal Joining, Taguchi Analysis.

GİRİŞ

Alüminyum dünyada en çok tüketilen demir dışı metaldir. Antik Roma ve Yunan uygarlıklarından bu yana (boyama ve tıp alanında) artan bir şekilde insanlığa hizmet amacıyla kullanılmaktadır ve günümüzde yaşantımızın ayrılmaz bir endüstriyel malzemesi konumuna gelmiştir. Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci element olmakla birlikte 19.yy'ın sonlarında mühendislik uygulamalarında ekonomikliği ile ön plana çıkan bir metal olmuştur. 19.yy'ın başlarında Sir Humphrey Davy tarafından alüminyum elementinin varlığının açıklandığı kabul edilmektedir. 1825 yılında ilk olarak Hans Christian Oersted laboratuvar ortamında alüminyumu ayrıştırarak alüminyumun varlığını ortaya koymuştur. 1886 yılına kadar geçen süreç içerisinde de üretimi laboratuvar ortamında kalmış ve az miktarda üretimi yapılmıştır. 1886 yılında ise ticari olarak üretimi birbirinden habersiz olan ve iki farklı kıtada yaşayan Charles Martin Hall (ABD) ve Paul Heralt (Fransa) tarafından gerçekleştirilmiştir (Cobden ve Banbury, 1994; Totten ve Mckenzie, 2003; Taban, 2004).

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, ticari hayatta öncelikle bakır, pirinç ve bronzun yerine geçmiştir. İlk yıllarındaki üretim güçlüğü nedeniyle 1885'te yıllık 200 ton üretilirken, bu rakam 2012' de 50 milyon tona ulaşmıştır. Günümüze kadar gelen süreçte endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Mukavemeti, estetik oluşu ve hafifliği sayesinde gün geçtikçe günlük yaşantımızın her alanına girmiş ve üstün özellikleri sayesinde dünyamızı daha iyi bir geleceğe hazırlamamız için sürdürülebilir gelişmelerin önemli bir aktörü haline gelmiştir (Güngör, 2013).

Günümüzde otomobil sektörü alüminyumu otomobil gövdelerinde kullanarak çelik gövdeye göre %24 daha hafif araçlar üretmektedir, bu da her 100 kilometrede 2 litre yakıt tasarrufu (araç türüne göre değişiklik gösterir) ve kilometrede ortalama 9 gram daha az CO₂ salınımı demektir. Günümüze kadar gelen bu süreçte otomobil üreticileri araçlarda alüminyumu ilk olarak 100 yıldan daha uzun süre önce kullanmaya başlamışlardı. Hafif oluşu ve korozyon dayanımı, gelişen otomotiv endüstrisi için mükemmel bir potansiyel oluşturuyordu. 1889 yılında Berlin'de düzenlenen uluslararası otomobil fuarında alüminyum gövdeye sahip ilk spor arabanın sergilenmesinin ardından iki yıl sonra Carl Benz alüminyum parçalara

sahip ilk araç motorunu üretmiştir. Fakat bu dönemdeki bilgi yetersizliği ve yüksek fiyatlardan dolayı kitlesel üretim gerçekleştirilememiştir (Url-2).

Otomobil gövdelerinde alüminyumun kullanılmaya başlanması ile geleneksel gövdelerde kullanılan çelik ile alüminyumun birleştirilmesi için teknolojik çalışmalar gerçekleştirilmekte, bu alandaki problemler giderilmeye çalışılmaktadır. Dolayısı ile bu boşluğu doldurmak amacı ile 2004 yılında Fronius tarafından dünyaya tanıtılan CMT kaynak yöntemi kullanılarak son yıllarda otomobil gövdelerinde çeliğin yerini almaya aday 5XXX serisi alüminyum alaşımı ile galvanizli çeliğin birleştirilmesi hedeflenmiştir. Sonrasında mekanik testlerinin (çekme, yorulma) gerçekleştirilmesi, metalürjik incelemelerin (metalografi, SEM ve sertlik) yapılarak sonuçların ülke ve dünya endüstrilerine aktarılması esas alınmıştır. 1 mm kalınlığındaki 5754-H111 alüminyum alaşımı ve 0,75 mm kalınlığında seçilen DX54D+Z galvanizli çelik 480x150 boyutlarında kesildikten sonra aseton ile yüzeyleri temizlenerek. 1,2 mm çapında AlSi3Mn dolgu metali kullanılarak %100 Argon koruyucu gaz atmosferi altında sinerjik CMT kaynak robotu ile daha önce literatür çalışmalarında farklı metaller için elde edilen değerler ve laboratuvar ortamında yapılan denemeler göz önünde tutularak oluşturulan parametre değerleri ile L16 Taguchi deney düzeneği oluşturularak kaynaklar gerçekleştirilmiş, ardından mekanik ve metalürjik çalışmalar yapılarak en uygun parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çekme test sonuçları temel alınarak yapılan Taguchi analizini takiben, numuneler optik mikroskop ve SEM ile incelenmiş, EDX analizleri ve eğmeli yorulma testine tabi tutulmuştur. Ayrıca kaynak bölgesinin Vickers sertlik taraması yapılmıştır.

1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum ve alaşımlarını hayatımızın önemli bir parçası haline getiren en önemli neden, bir metalde aranan önemli özelliklerin birçoğunu tek çatı altında toplamasıdır. Bu özellikler hafiflik, mukavemet, sonsuz geri dönüşüm kabiliyeti, elektrik ve korozyon direncinin yüksek oluşu, dayanıklılığı, sünekliği, şekillendirilebilir ve yalıtkan oluşudur. Bu özellikleri bir bünyede toplaması neticesinde, uçaklar, hızlı trenler, yüksek performanslı otomobil ve yüksek hızlı deniz taşıtları, evlerin ısıtılması, elektriğin taşınması, yemeklerin saklanması gibi birçok alanda insanlığın hizmetine sunulmuştur (Güngör, 2013; Url-6).

Aşağıda alüminyumun çelik ile karşılaştırmalı olarak özellikleri listelenmiştir. Bu iki metal arasındaki fiziksel ve kimyasal farklılıklar alüminyum ile çeliğin kaynak ile birleştirilmesinde karşılaşılan problemleri doğurmaktadır.

Fiziksel ve kimyasal karakteristikleri açısından alüminyum ile çelik karşılaştırıldığında iki metalin birleştirilmesindeki zorluklar net bir şekilde görülmektedir. Bu özellikler aşağıdaki gibidir.

- İki metalin ve oksitlerinin ergime sıcaklıklarının farklı olması. Demir oksit demir metaline yakın veya daha düşük sıcaklıklarda ergirken alüminyum oksit 2060°C de yani alüminyumun ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta ergimektedir. İstenilen kaynak kalitesinin sağlanması açısından bu oksit tabakasının alüminyum üzerinden kaldırmak oldukça önemlidir.
- Alüminyum üzerinde oluşan oksit tabakası oldukça dayanıklıdır. Metal yüzeyine iyi yapışma ve kendi kendini yenileyebilme özelliğinden dolayı korozyon dayanımı oldukça iyidir. Ek bir koruma gerektirmeden açık uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu korozyon dayanımı anodik koruma ile kontrollü oksit tabaka kalınlığı sağlanarak artırılabilir.
- Alüminyumun ısı genleşme katsayısı yaklaşık olarak çeliğin iki katıdır. Bu da kaynak sonrası flambaj ve çarpılma oluşumuna sebep olabilir.
- Alüminyumun ısı iletkenlik değeri çelikten altı kat daha fazladır. Bu durumda alüminyumun kaynağı için ısı kaynağının çeliğe göre daha yoğun ve şiddetli olması gerekmektedir.

- Alüminyumun özgül ısısından dolayı istenilen sıcaklığa çıkılması için verilmesi gereken ısı çeliğe göre iki kat daha fazladır.
- Alüminyum yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu değer çeliğin elektrik iletkenliğinden altı kat daha fazladır. Alüminyumun direnç nokta kaynağında bu durum bir dezavantaja dönüşmektedir.
- Alüminyum ısıtıldığında çelikte olduğu gibi bir renk değişimi göstermez. Bu durum kaynak operatörünü yanıltabilir ve alüminyumun ergitme kaynağı uygulamalarında karşılaşılan zorluklardan biridir.
- Alüminyumun manyetik olmayışı ark üfleme problemi ortadan kaldırmaktadır.
- Alüminyumun yüzey merkezli kübik yapıda olması düşük sıcaklık uygulamalarında çentik etkisi oluşmadan rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Hatta buna ek olarak bazı alaşımların (EW-5083 Al Mg 4.5Mn) sıcaklık düşüşü ile çekme mukavemeti ve sünekliği artmaktadır. Örneğin -200°C 'de %60 uzama göstermektedir. Yüzey merkezli kübik yapıda olması aynı zamanda çok iyi şekil alabilirlik özelliği göstermesini de açıklamaktadır. Böylece ekstrüzyon, derin çekme, yüksek enerjili şekillendirme gibi yöntemler ile ürün üretilmesini mümkün kılar.
- Alüminyum ısıtıldığında ve soğutulduğunda kristal yapısını çeliğin aksine değiştirmez. Bu durum hızlı soğuma koşullarında çelikte görüldüğü gibi faz değişiminden gelen sertleşme etkisini ortadan kaldırmaktadır (Mathers, 2002).

Tablo 1.1. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metaller ile 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
Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	660	1536	1455	1083	1670
Özgül ısı ($\text{J}/\text{kg K}$)	930	448	440	385	470
Isı iletkenliği ($\text{W}/\text{m K}$)	235	79,6	92,1	389,4	15,5
Isıl genişleme katsayısı ($\Delta l/l^{\circ}\text{C}$)	$33,9 \times 10^{-6}$	12×10^{-6}	1×10^{-6}	$16,5 \times 10^{-6}$	$18,2 \times 10^{-6}$
Elektrik direnci ($\mu\Omega\text{cm}$)	2,65	9,7	6,8	1,67	55
Elastisite modülü E (N/mm^2)	$6,7 \times 10^4$	21×10^4	21×10^4	$12,4 \times 10^4$	$10,8 \times 10^4$
Maksimum çekme mukavemeti (N/mm^2)	65	235	300	210	245

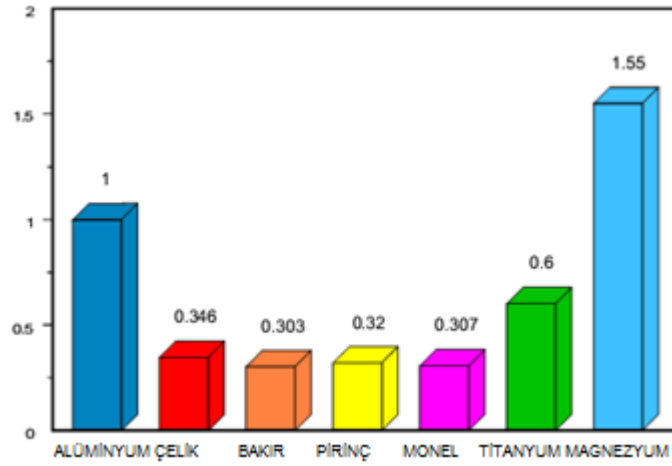
1.1. Alüminyumun Özellikleri

1.1.1. Fiziksel özellikleri

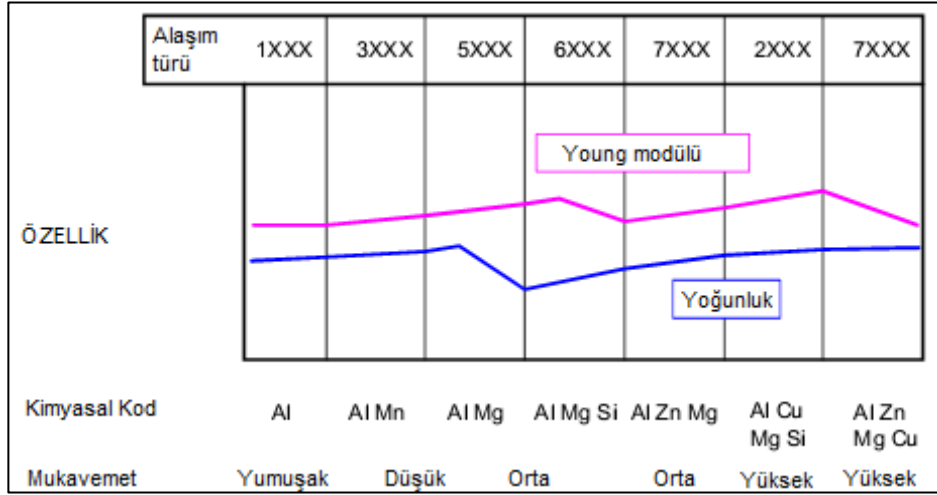
Fiziksel, kimyasal ve mekanik davranış olarak değerlendirildiğinde alüminyum da çelik, bronz, bakır, çinko, kurşun veya titanyum gibi metal sınıfında değerli bir maddedir. Alüminyumu metal olarak değerli yapan özelliklerin başında hafifliği, mukavemeti, geri dönüşüm özelliği, korozyon dayanımı, dayanıklılığı, sünekliği, şekil verilebilirliği ve elektrik-ısı iletkenliği gelir. Diğer ticari metaller gibi ergitilebilir, dökülebilir, makinada işlenebilir ve ayrıca kolaylıkla dövülebilir. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler uzay ve havacılık sanayisi için vazgeçilmezdir (Totten ve Mackenzie, 2003).

1.1.1.1. Yoğunluk

Hafif olması, alüminyumun en fazla bilinen karakteristiklerinden biridir. Titanyum ve magnezyum dışında diğer sık kullanılan metallere göre üçte bir oranında daha hafiftir (Şekil 1.1.). Birçok metalde olduğu gibi artan sıcaklık ile birlikte yoğunluğu azalır fakat lityum hariç farklı metaller ile alaşımlandığında yoğunluğunda dikkate değer bir değişim gözlenmez ($\pm 0,02$). Lityum ile alaşımlandığında yoğunluk %15' e kadar düşmektedir (Şekil 1.2.). Ağırlık hareket içeren tüm uygulamalar için oldukça önemlidir. Ağırlık tasarrufu ile de hem daha faydalı yük elde edilir hem de operasyon daha ekonomik gerçekleştirilebilir. Ağırlık tasarrufu yaparak aynı zamanda enerji tasarrufu yapılabildiği gibi, ağırlık azalması ile titreşim yükleri azalır, hareketli ve dönen parçaların performansı artar ve daha düşük taşıma masrafları ortaya çıkar. Hafif ve yüksek mukavemetin bir arada olduğu özel alüminyum alaşımlar geliştirilmiştir ve bu alaşımlar sayesinde çeliğe göre üçte bir ağırlıkta ve daha mukavim ürünler elde edilebilir. Geliştirilen bu alaşımlar son atmış yılda özellikle uçak endüstrisinde vazgeçilmez bir konuma gelmiştir (Cobden ve Banbury, 1994). Endüstride birçok metalin yerine kullanılmasının ana nedeni diğer özellikleriyle birlikte mukavemet ağırlık oranında diğer metallere olan üstünlüğüdür. Hafifliği sayesinde özellikle araçlarda kullanımı ile yakıt ekonomisi, sürüş konforu, hızlanma, durma ve yükleme kapasitesi gibi konularda ek fayda sağlar.



Şekil 1.1. Birim hacim başına ağırlık miktarı



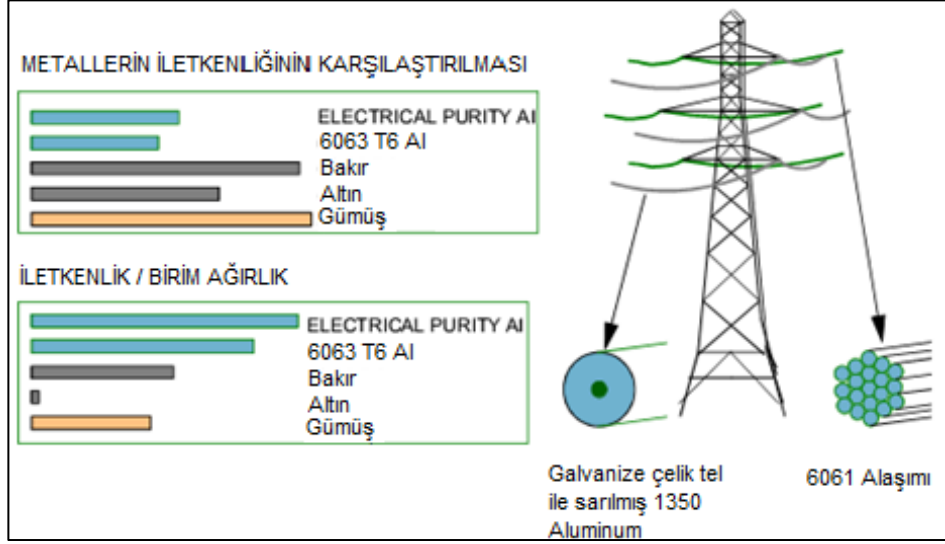
Şekil 1.2. Alaşım elementinin yoğunluk ve Young modülüne olan etkisi

Artan mukavemet ile birlikte süneklkte herhangi bir düşme gözlenmez. Alüminyum ve alaşımlarının yüzeyinde kendiliğinden 10^{-4} saniyede oluşan, kalınlığı 5-20 nm arasında değişen ve molekül yoğunluğu alüminyumun nerdeyse 1,3 katı olan oksit filmi sayesinde yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Ortamda su buharının bulunması, filmin kalınlığını daha da artırır (Totten ve Mckenzie, 2003; Url-8).

1.1.1.2. Elektrik iletkenliği ve özdirenç

%99.99 saflıktaki alüminyumun elektrik iletkenliği 20°C' de IACS (International Annealed Copper Standard)' nin %63,8' idir. Özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı saf alüminyumun elektrik iletkenliği tavlanmış bakırın elektrik iletkenliğinin iki katından, diğer tüm metallere daha fazladır (Şekil 1.3.). Tablo 1.1.' de de gösterildiği gibi 20°C deki elektrik direnci 2,69 mikro ohm cm dir.

Alaşım elementlerinin eklenmesi ile alüminyumun elektrik iletkenliği azalır fakat örneğin mukavemetteki artış gibi bu durumu dengeler niteliktedir. Isıl işlem sonucu da elektrik iletkenliği değişmektedir bunun sebebi katı ergiyik içinde çözünen elementlerin çözünmeyen bileşenlere göre daha fazla direnç göstermesidir. Elektrik özelliklerinin bu seviyede olmasından ötürü elektrik endüstrisi için oldukça iyi bir seçim olarak görölmektedir (Cobden ve Banbury,1994).



şekil 1.3. Alüminyumun elektrik iletkenliği

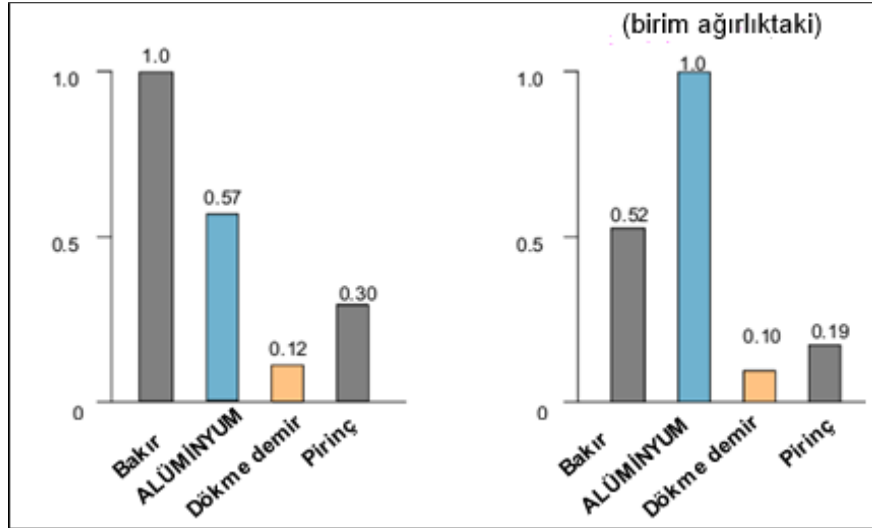
Alüminyumun elektrik iletkenliğinin yüksek olması direnç nokta kaynağı uygulamalarında bir dezavantaj oluşturabilir.

1.1.1.3. Manyetiklik

%99,99 saflıkta alüminyumun manyetik duyarlılığı X (χ) sadece $0,623 \times 10^{-6}$ dır ve pratikte manyetik olmayan metal olarak belirtilmiştir. Bakır alaşımı ile manyetik duyarlılık daha da azalmaktadır. Empürite olarak demir elementinin yapıda bulunması manyetik duyarlılık derecesini değiştirmes ve saf alüminyum ile aynı değerdedir. Alüminyumun manyetik olmayışı özellikle askeri uygulamalarda gemilerde hafifliği ve diğer manyetik olmayan metallere göre düşük fiyatı sayesinde oldukça büyük avantaj sunmaktadır. Aynı zamanda kaynaklı birleştirmelerde ark üflemesi gibi sorunları beraberinde getirmemesi alüminyumun ark kaynağında avantaj oluşturur (Mathers 2002; Cobden ve Banbury,1994).

1.1.1.4. Isıl iletkenlik

%99,99 saflıktaki saf alüminyumun ısı iletkenliği 0-100°C sıcaklıkları arasında 244 W/mK dir ve bu değer IACS' nin %61,9 unu oluşturmaktadır. Bu da ısı iletkenlik değerinin bakırın ısı iletkenliğinden iki kattan daha fazla olduğunu gösterir (Şekil 1.4.). Alaşım elementlerinin yapıya girmesi ile ısı iletkenlik keskin bir şekilde azalır. Isıl iletkenlik değeri, iyi şekillendirilebilmesi ve hafifliği gibi özelliklerin bir arada toplanması ile özellikle ısı değiştiricileri, araba radyatörleri ve mutfak araçlarının yapımında sık kullanılmaktadır. Alüminyumun ısı iletkenlik değeri çelikten altı kat daha fazladır. Bu durumda alüminyumun kaynağı için ısı kaynağının çeliğe göre daha yoğun ve şiddetli olması gerekmektedir (Mathers 2002; Cobden ve Banbury, 1994).



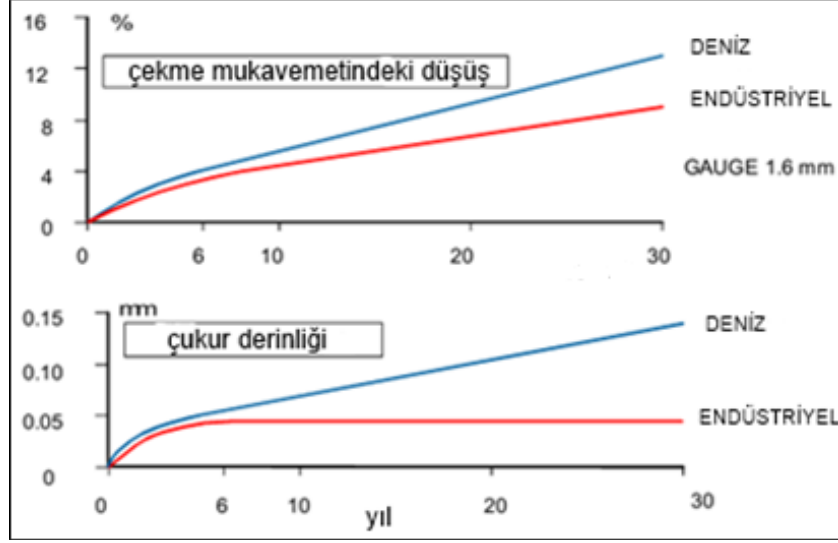
Şekil 1.4. Alüminyumun ısı iletkenlik değerinin diğer metaller ile karşılaştırılması

1.1.1.5. Isıl genleşme

Alüminyumun ısı genleşme değeri -200°C ile 600°C arasında lineer olmamasına rağmen pratik uygulamalar için 20°C ile 100°C arasında lineer kabul edilir. Alüminyumun ısı genleşme katsayısı yaklaşık olarak çeliğin iki katıdır. Bu da iki metalin kaynak ile birleştirilmesi sonrası ısı girdisi miktarına bağlı olarak flambaj ve çarpılma oluşumuna sebep olabilir.

1.1.1.6. Korozyon dayanımı

Alüminyum üzerinde bulundurduğu sağlam ve ince film oksit tabakası sayesinde diğer tüm metallere göre korozyona daha dayanıklıdır. Bu oksit tabakası oksijen atmosferinde her zaman alüminyumun üzerinde varlığını sürdürür. İki farklı ortamda alüminyumun korozyon dayanımı Şekil 1.5.' de gösterilmiştir (Cobden ve Banbury A,1994).



Şekil 1.5. Haddelenmiş 3103 alüminyum levhanın çukurcuk korozyon dayanımı



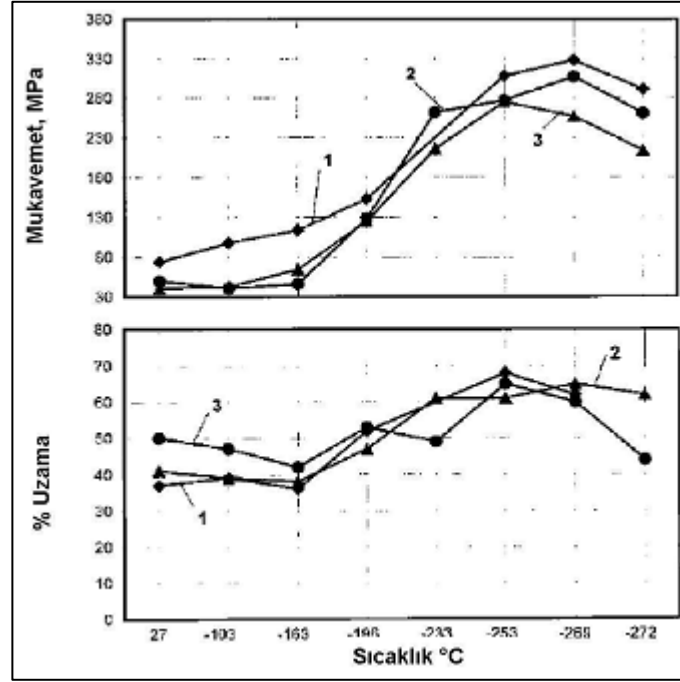
Şekil 1.6. Alaşım elementinin alüminyumun korozyon dayanımı ve yorulma mukavemetine etkisi

1.1.2. Alüminyumun mekanik özellikleri

Alüminyum ve alaşımlarının çoğunun kırılma tokluğu ve enerji yüklenme kapasitesi son derece yüksektir. Bu nedenle gevrek kırılma ve düzensiz çatlak büyüme dayanımının arandığı uygulamalarda önemli bir tercih sebebidir. 5xxx alüminyum 15 alaşımlarının LNG tanklarında kullanımı bunun en önemli örneklerindedir.

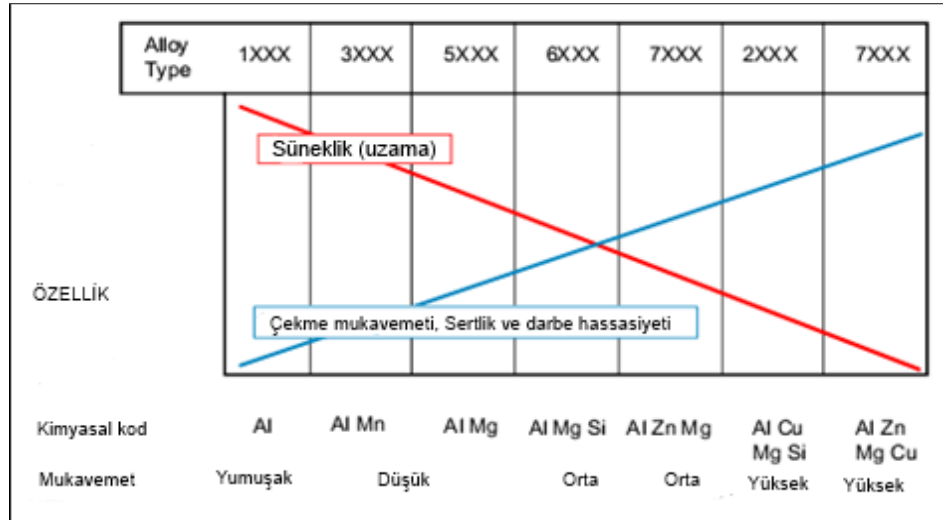
Alüminyum ve alaşımları, özellikle 3xxx, 5xxx ve 6xxx serileri, çok iyi düşük sıcaklık tokluğu gösterir. Sıfır altı sıcaklık hatta mutlak sifıra kadar süneklik, tokluk ve mukavemetleri oda sıcaklığına göre daha yüksektir (Şekil 1.7.) Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır. Mekanik özellikleri 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 da büyük ölçüde değişir (Kauffman, 2000; Taban, 2004).

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 katışık olarak bulunan silisyum ve demirden oluşmaktadır. Alüminyumun bileşiminde katışık olarak bulunan demir, özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemez. Buna karşın alüminyum 250-350°C' de tavlınır ise, katı çözültü durumunda bulunan silisyum ayrışır ve bu sıcaklığın üstünde tekrar katı çözültü 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 su verilerek hızla soğutulmalıdır (Taban, 2004; Güngör 2014).



Şekil 1.7. Farklı safıktaki alüminyum ve alaşımlarının sıcaklığa bağlı olarak % uzama ve mukavemetlerindeki değişim (1) %99,5 (2) %99,99 (3) %99,997 (Totten ve Mckenzie, 2003)

Alaşım elementi türüne bağlı olarak mukavemet ve süneklkte büyük değişimler gerçekleşir. Alüminyum ve alaşımlarının birçok endüstride doğan ihtiyaçları karşılayabilmesi temeli de bu özelliğinden kaynaklanmaktadır. Şekil 1.8.'de alaşımın farklı alaşım elementleri ile mekanik özelliğinde meydana gelen değişim net bir şekilde görülmektedir. Alaşımsız alüminyumun çekme mukavemeti 70 MPa iken 7xxx serisi alaşımda yaklaşık 700 MPa değerlere kadar çıkmaktadır.



Şekil 1.8. Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi (Cobden ve Banbury, 1994)

1.2. Alüminyum Alaşimleri

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları dövme ve döküm alüminyum alaşımlar olarak iki türde üretilmektedir. Dövme türünde üretilenler genellikle sıcak ve soğuk haddelenmiş sac, levha, çubuk ve tel şeklinde üretilmektedir. Özellikle dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısı işlem uygulanamayan (soğuk şekil değiştirme sertleşmeli) ve ısı işlem uygulanabilen (çökelti sertleşmeli) birçok türü taşıt yapım endüstrisinde (otomobil, raylı taşıt, zırhlı taşıt vb), uçak, uzay araçları ve gemi yapım endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Bunlar; 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlardır (Mathers, 2002; Taban, 2004).

Tablo 1.2. Dövme ve döküm alüminyum alaşım türleri ve alaşım içerikleri

		Ana Alaşım Elementi	Çözüldüğü atomlar	Pekleşme	Çökelti sert.	
DÖVÜLEBİLİR ALAŞIMLAR* EN-AW-	1XXX	%99 Al		X		Isıl işlem yapılamayan alaşımlar
	3XXX	Mn	X	X		
	4XXX	Si	X	X		
	5XXX	Mg	X	X		
	2XXX	Cu	X	(X)	X	Isıl işlem yapılabilen alaşımlar
	6XXX	Mg + Si	X	(X)	X	
	7XXX	Zn	X	(X)	X	
	8XXX	Diğer	X	(X)	X	
DÖKÜM ALAŞIMLAR* EN-AB- EN-AC- EN-AM-	1XXX0	%99 Al	*işaretili alaşımlardaki isimlendirmeler; EN :Avrupa standardı A :Alüminyum B :İngot C :Döküm alaşımı M :Master alaşım W :Dövülebilir alaşım			
	2XXX0	Cu				
	4XXX0	Si				
	5XXX0	Mg				
	7XXX0	Zn				
	8XXX0	Sn				
	9XXX0	Master alaşımlar.				

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanları Tablo 1.3' de gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanları (Mathers, 2002)

Alüminyum alaşım sınıfı	Ürün formu	Uygulama alanları
Saf alüminyum	Folyo, hadde levha, ekstrüzyon ürünleri.	Paket, ambalaj ve folyo, çatı kaplama, zırhlama, düşük mukavemetli korozyon dirençli kazan ve tanklar.

Tablo 1.3.(Devam) Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanları (Mathers, 2002)

2000 serisi (Al-Cu alaşımları)	Hadde levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Yüksek strese maruz kalan parçalar, uzay ve havacılıkta kullanılan yapısal elemanlar, ağır dövme parçalar, taşıt jantları, silindir kafaları ve pistonlar.
3000 serisi (Al-Mn alaşımları)	Hadde levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri ve dövme parçalar.	Paket, ambalaj, çatı kaplama ve zırhlama, kimyasal madde varilleri ve tankları. Kimyasal madde ve gıda taşıma ekipmanları.
4000 serisi (Al-Si alaşımları)	Tel ve döküm ürünleri.	Kaynak dolgu metalleri, silindir kafaları, motor blokları, supap gövdeleri, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
5000 serisi (Al-Mg alaşımları)	Hadde, levha ve sac. Ekstrüzyon ürünleri, dövme ürünleri. İçi boş elemanlar ve borular.	Zırhlama, 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)	Hadde, levha ve sac. Ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi boş elemanlar ve borular.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, otomobil, tren vagonu, deniz taşıtları ve deniz üstü yapı elemanları, mimari amaçla 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.

1.2.1. 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, haddeme veya ekstrüzyon ile biçimlendirilirler. Döküm yapısındaiken tane sınırlarında oluşan sürekli gevrek fazlar, şekillendirme sırasında parçalanır ve ana kütleyle dağılır. Böylece alaşım soğuk şekillendirmeye uygun duruma geçer (Taban, 2004).

Dövme alaşımlarının simgelenmesi ve standardizasyonu ilk olarak sistematik biçimde 1954 yılında Alüminyum Birliği tarafından gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesinde ilk dört rakam ana alaşım elementi bakımından alaşım grubunu belirtir.

Tablo 1.4. Alüminyum alaşım grupları
(Cobden ve Banbury, 1994)

Alüminyum Birliği No:	Alaşım Elementi
1xxx	%99,00 min. Saf alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan seri

1xxx serisi %99,00 ve daha yüksek saflık derecesindeki alüminyum ve alüminyum alaşımlarını kapsar. Son iki rakam minimum saflık değerini göstermektedir. Örneğin 1070 minimum %99,70 saflıkta alüminyum alaşımı olduğunu belirtmektedir. İkinci rakam ise empürite limiti veya alaşım elementini belirtmektedir. 1-9 arasındaki rakamlar ile gösterilir. Örneğin 1145, minimum %99,45 saflıkta olduğunu ve 1 ise demir ve silisyum elementlerini empürite olarak yapıda olduğunu belirtmektedir.

2xxx ile 8xxx gruplarında ise son iki rakam özel bir durumu belirtmemek ile birlikte seri içerisindeki farklı alaşımları göstermekte kullanılır. İkinci rakam ise alaşım modifikasyonunu belirtir, sıfır ise orijinal alaşım olduğu belirtilmiştir (Cobden ve Banbury, 1994).

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısı işlem uygulanamayan türlerdir ve bunlar yalnızca şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısı işleme tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısı işleme tutulabilir hem de ısı işleme tutulamaz alaşımlar içerir. Ark kaynağı uygulamalarının bu iki tür alaşım serisi üzerindeki etkileri göz önünde tutulduğunda bu fark özellikle önemlidir (Taban, 2004).

Tablo 1.5. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına TS 1321' e göre uygulanan temel sertleştirme işlemleri

M	Üretildiği biçimde		
F	İşlendiği biçimde		
O	Yumuşak tavlınmış		
H	Soğuk biçimlendirme ile sertleşmiş (H harfinden sonra temel işlem tipini belirten bir rakam ve soğuk biçimlendirmenin son durumunu gösteren ikinci bir harf kullanılır.)		
Temel işlem tipleri			
H1 H2 H3	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş. Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve kısmi tavlınmış. Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve stabilize edilmiş.		
Soğuk biçimlendirme sertleşmesinin son durumu X harfi 1,2 ve 3 ten uygun olanını ifade eder; ancak bazı uygulamalarda bu rakamlar kullanılmadan belirtme yapıldığı da görülür.			
HxH HxD HxB HxF HxJ	Tam sertleştirme işlemi. Çekme dayanımı yaklaşık O hali ile HxH değeri arasında. Çekme dayanımı yaklaşık O hali ile HxD değeri arasında. Çekme dayanımı yaklaşık HxD hali ile HxH değeri arasında. 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 çözeltili ısı işlemi uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış.		
TC	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş soğuk biçimlendirilmiş. Doğal yaşlandırılmış.		
TD	Katı çözeltili ısı işlemi uygulanmış, soğuk biçimlendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.		
TE	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra, soğutulmuş ve katı çözeltili ısı işlemi uygulanmış.		
TF	Katı çözeltili ısı işlemi uygulanmış ve katı çözeltili işlemi uygulanmış.		
TG	Yüksek sıcaklıkta biçimlendirmeden sonra soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş ve katı çözeltili işlemi görmüş.		
TH	Katı çözeltili işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve katı çözeltili işlemi uygulanmış.		
TL	Katı çözeltili ve katı çözeltili işlemi uygulanmış. Soğuk işlenmiş.		
TM	Çözeltili işlemi uygulanmış ve stabilize edilmiş (dengeleştirilmiş)		
TS 1321' deki gösterim	Alternatif gösterim	TS 1321' deki gösterim	Alternatif gösterim
M	H112	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, H28, H38	TH	T8
H1J, H2J, H3J	H19, H29, H39	TL	T9
TA	T1	TM	T7

1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları

Bu tür alaşımların büyük çoğunluğu silisyum içerir. %11,7 silisyum 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 alaşımlarında silisyumdan başka magnezyum katılarak çökeltme yolu ile sertleştirilebilen ve deniz suyunun korozif etkilerine karşı dirençli alaşımlar elde edilir. 2xxx, 3xxx, 4xxx ve 7xxx serisi döküm alaşımlar ise ısı işleme tabi tutulabilirler (Taban, 2004).

Tablo 1.6. Döküm alüminyum alaşımlarının simgelenmesi

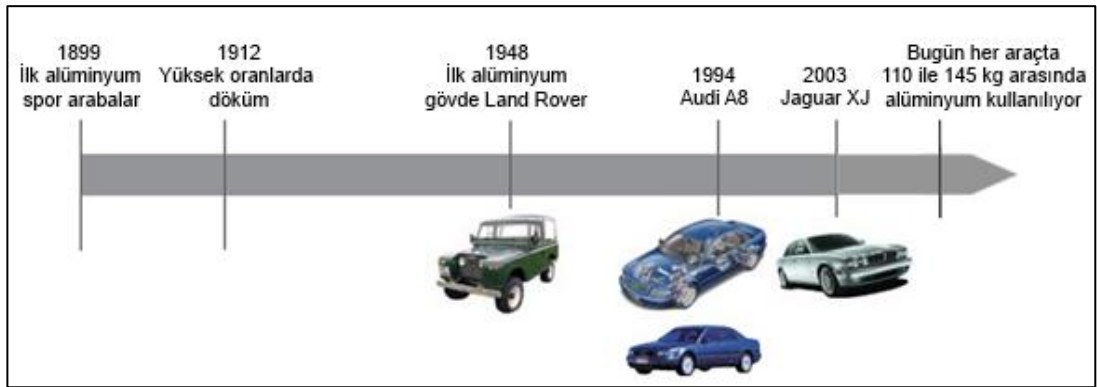
Alüminyum Birliği No:	Alaşım Elementi
1xxx	Saf alüminyum (%99.99'dan daha fazla)
2xxx	Bakır
3xxx	Silisyum+Bakır ve/veya Magnezyum
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Kullanılmayan seriler
7xxx	Çinko
8xxx	Kalay
9xxx	Diğer elementler

1.3. Alüminyumun Otomotiv Sektöründeki Yeri ve Önemi

Otomobil üreticileri alüminyum otomobillerde kullanmaya bundan 100 yıl kadar önce başlamışlardı. Alüminyum daha tam olarak keşfedilmemiş, yeni bir metaldi fakat hafifliği ve mükemmel korozyon dayanımı ile gelişen otomotiv sektörünün dikkatini çekmeyi başarmıştı. İlk alüminyum gövdeye sahip spor araç 1899 yılında Berlin' de otomobil fuarında tanıtıldı.

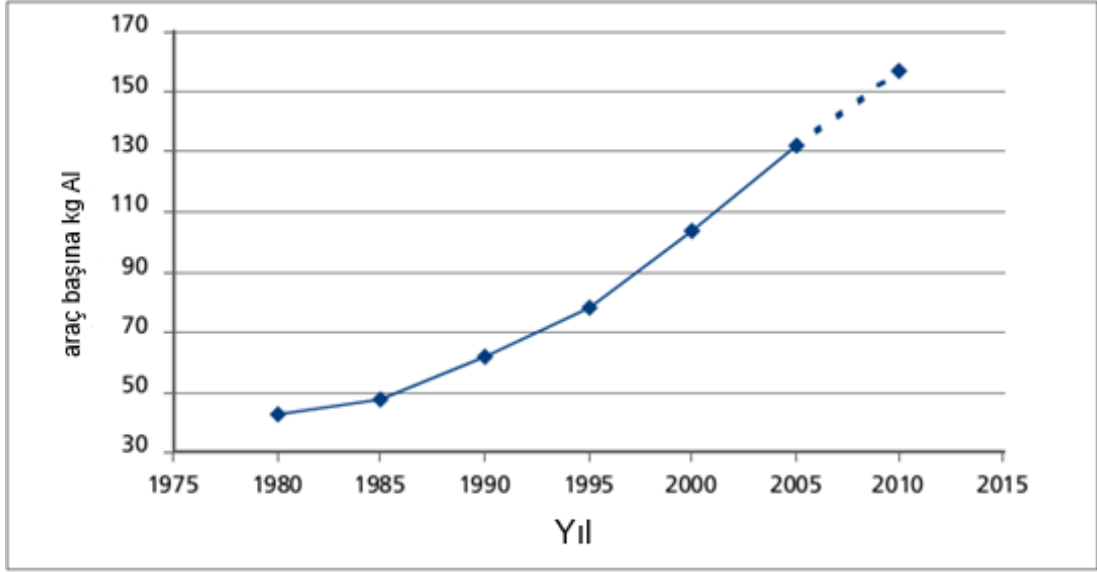
Savaş yıllarının ardından daha ulaşılabilir ve ucuz olan alüminyum İngiliz Land Rover'ın dikkatini çekmiştir ve araştırmalara hız veren firma 1948' de ilk alüminyum kasa Land Rover'ı tanıttı. Daha sonra Buick firması ilk V8 motorunu üreterek, ağırlığı sadece 144 kg olan bu motor ile gerçek bir dönüm noktası yakalamıştır. Yetmişli yıllarda petrol krizi ile otomobil üreticileri yakıt tüketimini azaltacak yeni yöntemler aramaya başlamış ve araçların ağırlıklarını azaltma yönünde bir adım atmışlardır. Yapılan hesaplamalar bir aracın ağırlığında yapılacak 100 kg ağırlık azalmasının aracın ömrü boyunca toplamda 700 litre yakıt tasarrufu sağladığını göstermiştir.

Böylece araçlarda birçok parçanın yerini alternatif alüminyum alaşımlı parçalar almaya başlamıştır. 1994 yılına gelindiğinde Audi mühendisleri geleneksel olarak kullanılan çeliğe meydan okuyan, geliştirilmiş yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarını kullanarak toplamda 239 kg ağırlık tasarrufu sağlayarak Audi A8' i baştan tasarlamışlardır, gövdesinin tümünü alüminyumdan üretmişlerdir. Mazda, Jaguar ve BMW gibi daha birçok otomobil üreticisi de alüminyumu otomobil parçalarında kullanmaktadır. Böylece alüminyum günümüzde çelikten sonra otomobilde en çok kullanılan ikinci malzeme olmuştur (Bertram ve diğ. 2007; Url-1; Url-2).

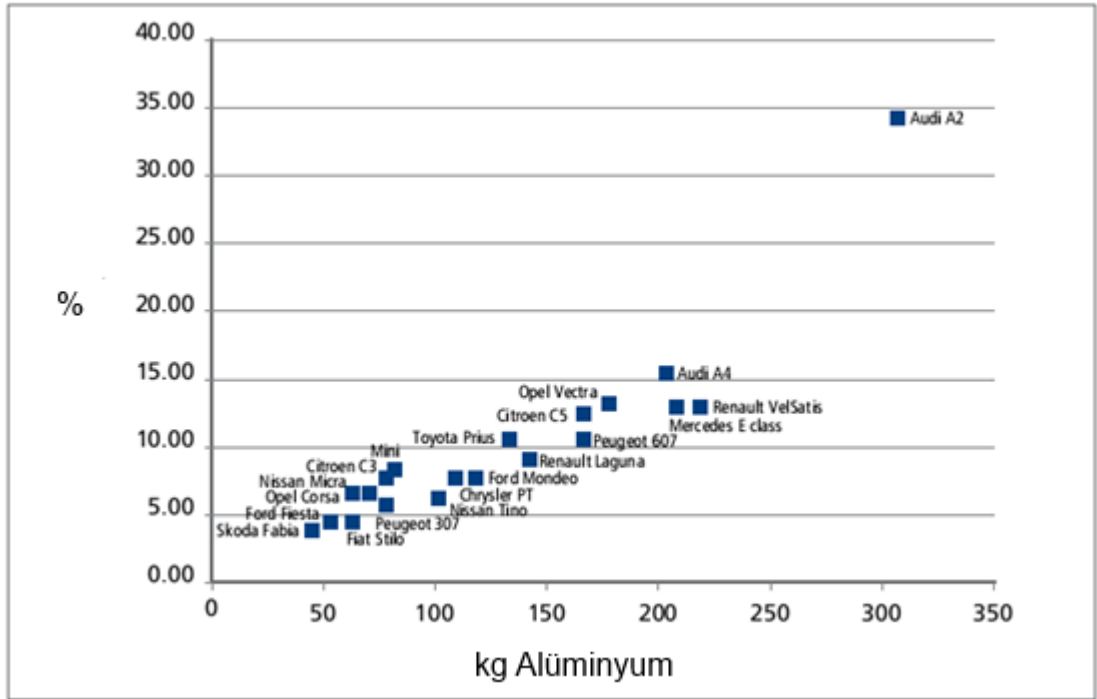


Şekil 1.9. Alüminyumun araçlarda kullanılması ve tarihsel gelişimi

Günümüzde Avrupa'da üretilen bir araçta ortalama 110-145 kg alüminyum kullanılmaktadır ve bu miktar her yıl artmaktadır (Şekil 1.10.). Bunun ile birlikte model bazında kullanılan % alüminyum miktarı Şekil 1.11.' de gösterilmiştir. Gormezano K. ve diğerlerinin yaptığı bir araştırmaya göre Avrupa'da üretilen araçlarda kullanılan alüminyum miktarı 1990 yılında 50 kg iken 2005 yılında 132 kg'a yükselmiştir ve 2015 yılına kadar 25 kg daha artacağı ve sonraki yıllarda da artmaya devam edeceği ön görülmüştür (Miller ve diğ., 2000).

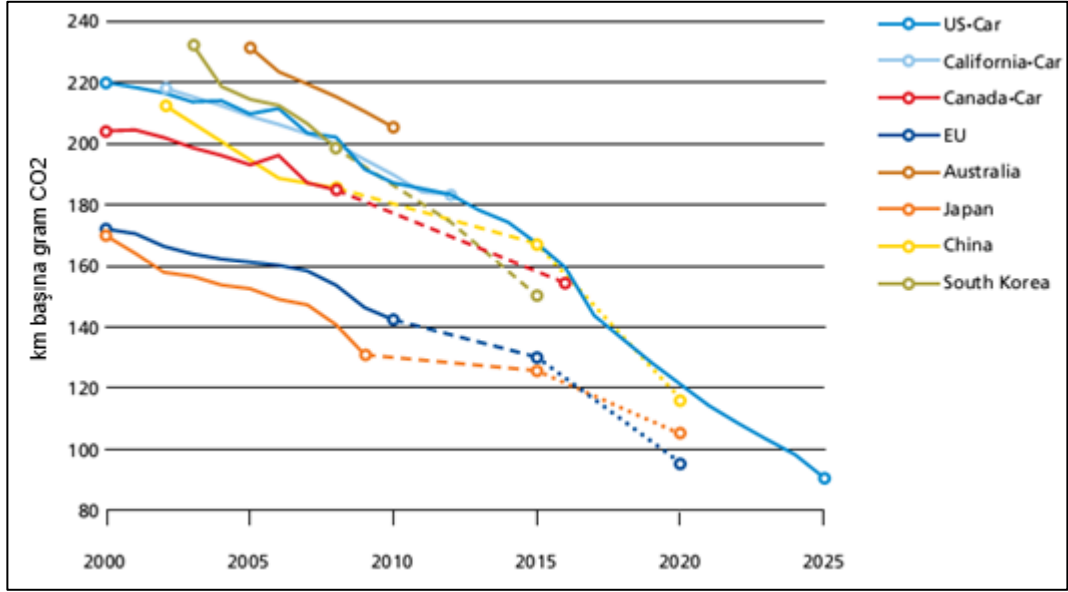


Şekil 1.10. Avrupa' da üretilen araçlarda kullanılan alüminyum miktarı (Url-2)



Şekil 1.11. Model bazında kullanılan % alüminyum miktarı

Dünya çapında devletler artık CO₂ emisyon standartlarını artırarak, her geçen gün CO₂ salınımını daha da düşürme gayreti içinde firmaları önlem almaya zorlamaktadır. Bu da otomotiv sektörünü, güvenlik ve konfordan ödün vermeden yeni nesil araçlar üretmeye teşvik etmiştir. Tüm dünyada CO₂ salınımındaki azalma ve hedefler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1.12.).



Şekil 1.12. Dünya genelinde CO₂ emisyonu hedefleri

Şekil 1.12.'de de görüldüğü gibi Avrupa' da üretilen araçların 2010 ile 2020 yılları arasında %3,9 luk bir düşüş ile 142 g/km den 95 g/km ye düşürülmesi hedeflenmiştir (Bertram ve diğ., 2007; Url-3).

Günümüzde üretilen bu araçların çok parçalı ve farklı metaller kullanılarak üretilmesi, bu parçaların birleştirilmesini gerektirmektedir ve kaynak teknolojisi otomotiv teknolojisi ihtiyaçlarına paralel olarak hızla gelişmektedir. Kullanılan yeni nesil alüminyum parçaların birbirleri ile ve farklı metaller ile özellikle galvanizli çelik saçlar ile birleştirilmesi için yeni kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Alüminyum ve çelik mekanik bağlama ve yapıştırma teknikleri ile başarılı bir şekilde birleştirilmektedir. Uygulandığı alanlarda beklentileri karşılansa da bu yöntemler ile birleştirmede düşük mukavemet değerleri ve genellikle bindirme birleştirmeleri ile kısıtlı olması birçok alanda kullanımını kısıtlamaktadır. Bundan dolayı alüminyum ile çeliğin yapısal birleştirmelerinde kaynak teknolojisi göz önüne alınmaktadır. Yüksek kapasitede ve geniş aralıklarda ürün üretilmesine imkân veren kaynak teknolojisi genellikle büyük yatırımlar gerektiren bir uygulamadır ve birçok farklı yöntem ve uygulamaya sahiptir ve farklı metaller kullanılarak üretilen otomobillerde iki farklı metali birleştirmek için en uygun birleştirme yöntemini seçmek en zor ve en önemli adımlardan biridir (Dost ve diğ., 2012).

Alüminyum ile çeliğin birleştirilmesinde katı hal ve ergitme esaslı kaynak yöntemleri üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Bunlar; direnç nokta (RSW), delta spot, sürtünme karıştırma (FSW), sürtünme karıştırma knead, sürtünme karıştırma nokta

(FSSW), difüzyon, manyetik puls, manyetik basınçlı dikiş kaynağı, elektromanyetik etki, patlamalı kaynak, gaz metal ark (GMA), soğuk metal transferi (CMT), laser, laser roll, laser destekli basınç kaynağı, laser hibrit gibi yöntemlerdir (Taban, 2010; Yang ve diğ., 2013).

Alüminyum ile çeliğin termo-fiziksel özelliklerinin farklı olması bu metallerin otomotiv gövdesinde bir araya getirilmesi sırasında birçok zorluk doğurmaktadır. Bunlardan en önemlisi yüksek sıcaklıklarda iki metal arasında oluşan ve kaynağın mekanik özelliklerini etkileyen gevrek intermetalik fazdır. Yapılan birçok araştırma sonucu ergitme kaynağı, direnç nokta (RSW) ve sürtünme karıştırma kaynağı vb uygulamaların hepsinde Fe-Al intermetalik oluşumunun kaçınılmaz olduğu gözlenmiştir. Uygun bir kaynak için bu intermetalik tabakanın kalınlığının oldukça kritik bir değer olduğu ve 10 µm den daha ince olması gerektiği bilgisi verilmiştir. Birçok metot arayüzeyde oluşan intermetalik tabaka kalınlığını azaltmak için önerilse de yüksek verimli ve düşük maliyetli birleştirme metodu için çalışmalar halen devam etmektedir (Cao diğ., 2014; Cao ve diğ., 2013; Zhang ve diğ., 2009; Yang ve diğ., 2013; Shao ve diğ., 2015).

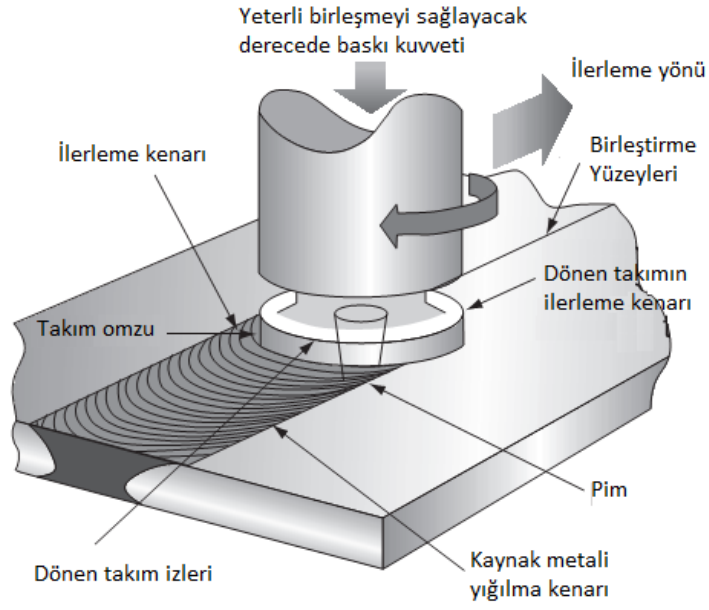
2. ALÜMİNYUM-ÇELİK KAYNAĞINDA KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı, katı hal birleştirme yöntemi olup sürünen eleman ile kaynak olarak da adlandırılır. Literatürde Friction Stir Welding (FSW) olarak tanımlanmıştır. FSW yöntemi 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsünde (TWI) bulunmuştur. Bulunmasının ardından günümüze kadar araştırmalarına devam edilmiştir ve daha yeni bir proses iken 1999 yılında uzay endüstrisinde Boeing Delta II roketinin yakıt tanklarının birleştirilmesinde kullanılmıştır (Mathers, 2002).

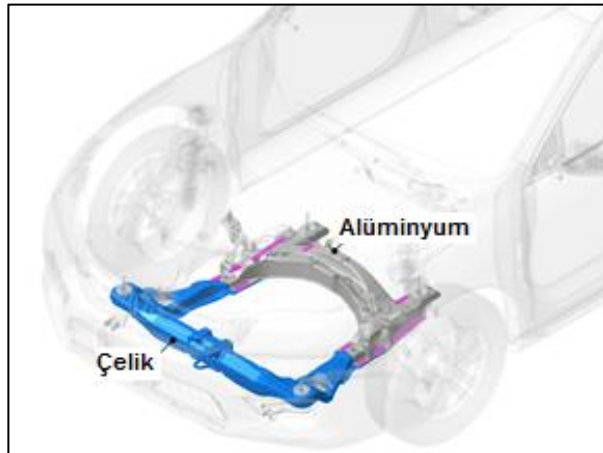
Yöntem öncelikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının dövme ve döküm türlerinin birleştirilmesinde kullanılmış ve elde edilen başarılı sonuçlara bağlı olarak bakır ve bakır alaşımları, magnezyum ve magnezyum alaşımları gibi metallerin kaynağında kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde karbonlu az alaşımlı çeliklerin ve bazı tür paslanmaz çeliklerin hatta karbonlu az alaşımlı çelik ile paslanmaz çelik, farklı metallerin kaynağında da kullanılır duruma gelmiştir (Taban, 2004).

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemini diğer ergitme esaslı kaynak yöntemlerinden ayıran en büyük fark; kaynak edilen parçaların ağızlarının kaynak sırasında ergimemeleri, yani katı fazda bulunmalarıdır. Sürtünme karıştırma kaynağının temel uygulandığı oldukça basittir. Tükenmeyen tipte dönen bir takımaya bağlı özel üretilmiş bir sürtünme aparatı (takım omzu) ve karıştırıcı uç, birleşecek sac veya levhaların birleşme köşesine daldırılır ve birleşme çizgisi boyunca, mil etrafında döndürülerek ilerletilir. Takım iki amaca hizmet eder; iş parçasının ısıtılması ve bağlantının oluşması için malzeme akışı. Şekil 2.1.' de sürtünme karıştırma kaynağı prensip şeması gösterilmektedir (Cebeci ve Şahin, 2010).



Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi (FSW) prensibi (Mathers, 2000)

Mazda 2006 yılında ürettiği MX-5 Miata modeli arka bagaj kapağında alüminyum-çelik bağlantılarını sürtünme karıştırma yöntemini kullanarak gerçekleştirmiştir. Honda ise 2013 yılında Kuzey Amerika için ürettiği Accord modelinin motoru ve bazı süspansiyon parçalarını taşıyan ön alt çerçevesinde alüminyum ve çeliği bir arada kullanarak bu iki metalin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirildiğini duyurdu. İki metal arasında oluşabilecek korozyonu engellemek için araya bariyer bir tabaka yerleştirildiği, bağlantı incelendiğinde arayüzeyde Fe_4Al_{13} intermetalikinin oluştuğu ve bağlantının en az geleneksel bağlantılar kadar mukavim olduğu bilgisi verilmiştir (Url-4).



Şekil 2.2. Sürtünme karıştırma yöntemi ile birleştirilen 2013 Honda Accord ön alt çerçeve (Url-4)

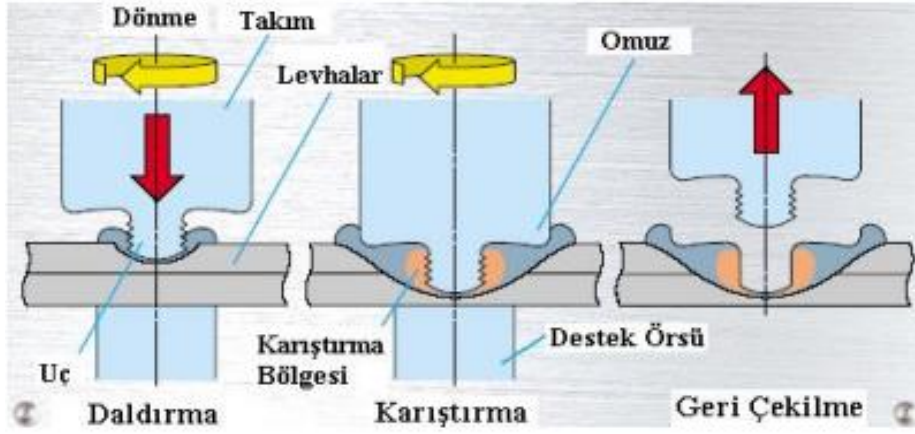
2.2. Sürtünme nokta karıştırma kaynağı (FSSW)

Son yıllarda alüminyum ve benzeri alaşımların kaynağında elektrik direnç nokta kaynağı yöntemine alternatif olarak ve FSW yönteminden yola çıkılarak geliştirilen sürtünme nokta karıştırma kaynağı (FSSW) yöntemi 1993 yılında Mazda ve Kawasaki Heavy Industries (KHI) tarafından geliştirilmiştir. Alternatif sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemi ilk olarak ise 2003 yılında Mazda RX-8 seri üretim otomobilinde yekpare alüminyum arka kapı birleştirmelerinde kullanılmıştır (Thompson, 2013).

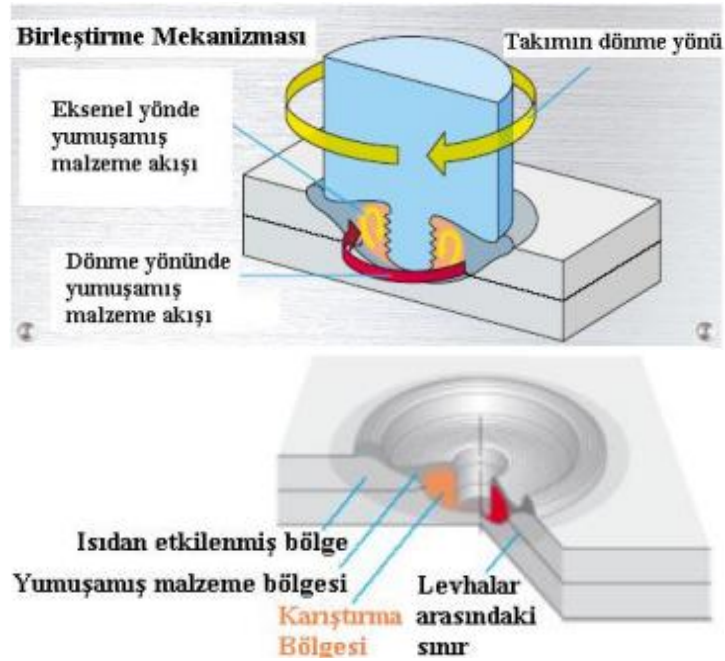
Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) yönteminden türetilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı son zamanlarda sadece otomobil sektöründe değil aynı zamanda diğer endüstri kollarında da oldukça dikkat çeken yeni bir kaynak yöntemidir. Yöntemin birleştirme mekanizması her iki yöntemde de aynıdır ancak aralarında uygulama farklılıkları bulunmaktadır. Katı hal kaynak yöntemi olması çarpılmaları minimuma indirir ve daha iyi özellikte bağlantılar sağlar. Yöntemin basit ve çevre dostu olması, uygulaması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz, tel veya elektroda ihtiyaç duyulmaması, yatırım maliyetinin düşük olması ve önemli derecede enerji tasarrufu sağlaması ayrıca otomasyona yatkınlığından dolayı Amerikan otomotiv endüstrisi için büyük ilgi konusu olmuştur. Bu konuyu daha da geliştirmek için Ford yoğun çalışmalar yapmaktadır. Bunun yanında FSSW yönteminde kaynak sonrası anahtar deliği oluşumu gibi ve anahtar deliğinde oluşan korozyon ile birlikte ark kaynağı kadar esnek olmayışı ve ince sacların birleştirilmesinde kısıtlı oluşu olumsuz özellikleri olarak belirtilebilir (Olantunji ve diğ., 2015; Mert Ş. ve Mert S., 2013).

Yöntem uygulandığında ortaya çıkan kaynağın görünüşü, otomotivde oldukça sık kullanılan direnç nokta kaynağına (RSW) benzemektedir. Direnç nokta kaynağı uygulamalarında alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ve ileri yüksek dayanımlı çeliklerin (AHSS) kaynağında problem oluşturabilmektedir. Bu yeni yöntem ile farklı metallerin kaynağı sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak takımına benzer bir takım, dalma, karıştırma ve geri çekilme olarak belirtilen üç kademeli son derece basit bir uygulaması vardır (Şekil 2.3.).

Sürtünme karıştırma nokta kaynağının birleştirme mekanizması Şekil 2.4.'de, birleştirilen metallerin kaynak sonrası kesit görüntüsü ise Şekil 2.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yönteminin prensibi (Mert Ş. ve Mert S., 2013)



Şekil 2.4. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı birleştirme mekanizması (Mert Ş. ve Mert S., 2013)



Şekil 2.5. FSSW yöntemi ile birleştirilmiş alüminyum ile çelik levha kesit görüntüsü (Chen ve diğ., 2012)



Şekil 2.6. Robotik FSSW uygulanan Mazda RX-8 arka kapısı ve dış panel görüntüsü (Lohwasser ve Chen, 2010)

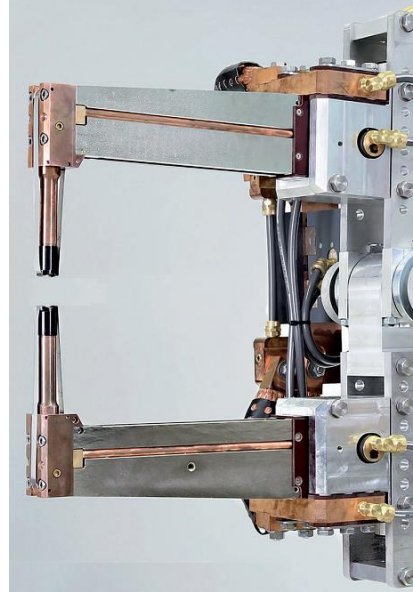
2.3. Deltaspot Kaynağı

Elektrik direnç kaynağı yüzyıllardır endüstride kullanılan ve günümüzde demir esaslı ve demir dışı metaller ve alaşımlarından üretilen ince saçların özellikle taşıt, mutfak, ev eşyaları ve mimari dekorasyonda yaygın biçimde kullanılmasının temelini oluşturan üstün özelliklere sahip bir kaynak yöntemidir.

Direnç nokta kaynak yöntemi üstün özellikleri ve düşük maliyetiyle uzun yıllardır özellikle çelik saçların birleştirilmesinde oldukça yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Ancak alüminyum saçların verimli biçimde birleştirilebilmesi içi de artan bir gereksinim vardır. Bu tür uygulamalarda, üreticiler genellikle daha pahalı olan perçin veya civatalı birleştirmeleri tercih etmek durumunda kalmaktadırlar. Bu durumda Deltaspot direnç kaynak yöntemi bu zorlukların üstesinden gelebilen alternatif bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır (Taban ve Gould, 2011).

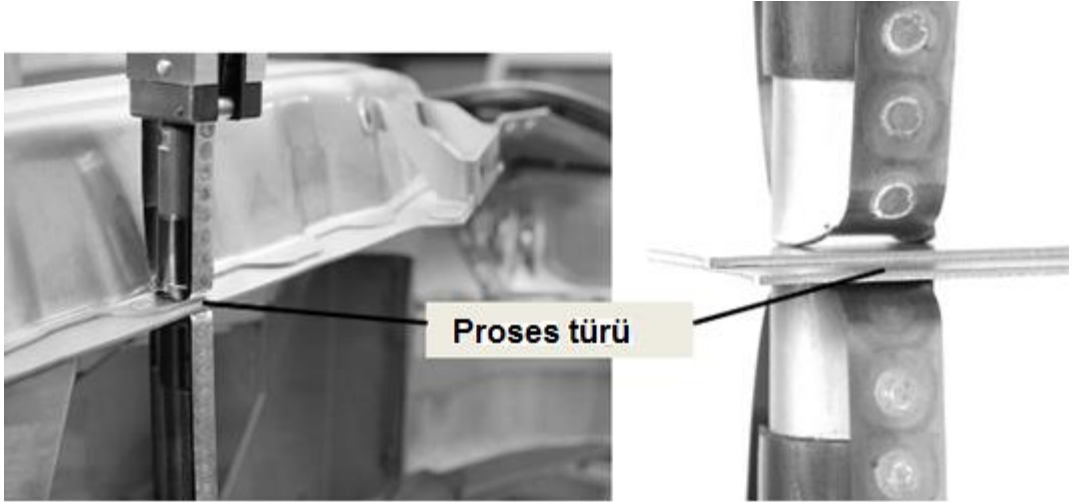
Deltaspot yönteminin karakteristiği elektrotlar ve birleştirilecek saçların arasından geçen hareketli proses bandı olan robot kaynak kollarıdır.

Yeni geliştirilen bu kaynak yöntemi ile yalnızca çelik-çelik veya alüminyum-alüminyum bağlantılar değil aynı zamanda alüminyum-çelik kaynaklı bağlantılar da oluşturulabilmektedir (Url-5; Kascak ve diğ., 2012; Taban ve Gould, 2011).



Şekil 2.7. Deltaspot kaynak yönteminde kullanılan kaynak tabancası (Url-5)

Proses bandının sürekli hareket etmesi, sabit kaliteli kesintisiz bir prosesi mümkün kılmaktadır. Böylece uzun elektrot ömrü, tam kalite kontrolü ve yüksek hassasiyet sağlar. Ayrıca proses bantları, elektrotları ve birleştirilen malzemeleri korumanın yanısıra, sıçrama oluşumunu da önlemektedir (Şekil 2.8.).



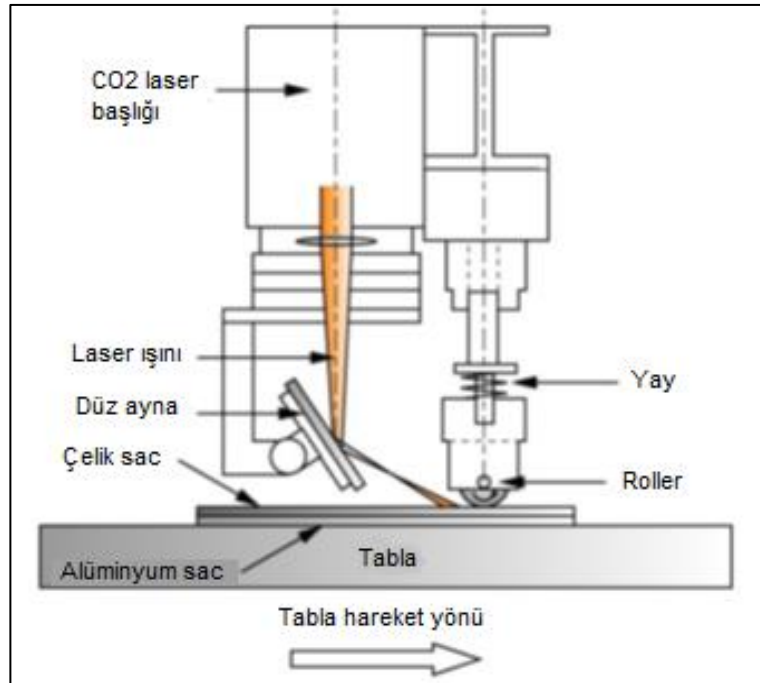
Şekil 2.8. Deltaspot kaynağı proses bandı (Kascak ve diğ., 2012)

Deltaspot yönteminde kullanılan proses bandı sayesinde kaynak sırasında ısı dengesinin kontrolü sağlanabilmektedir. Bu da daha düşük kaynak akımı, ısı girdisinin kontrollü olmasını sağlamakta ve kaynak noktalarının konum ve şeklini de kontrol etme olanağı tanımaktadır. Böylece enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Proses bandı aynı zamanda elektrot temas yüzeylerini, çinko, alüminyum veya organik kaplamalardan korumaktadır. Bu da elektrot ömrünü doğrudan etkilemekte ve uzun ömürlü elektrotlar sağlamaktadır. 5754 alaşımların bu yöntemle kaynak edilen bağlantılarında yaklaşık olarak 30000 kaynak noktası oluşturulabilen oldukça yüksek ömürlü elektrotlar kullanılabildiği belirtilmiştir (Taban ve Gould, 2011).

2.4. Laser Roll Kaynağı

Alüminyum ve çeliğin birleştirilmesindeki güçlük, 2002 yılında Japon, M.Kutsuna, M.Rathod ve A.Tsuboi tarafından hibrit kaynak yöntemi olan Laser Roll Kaynağının geliştirilmesini sağlamıştır. Bu yöntemde 2.4 kW CO₂ laser ile birleştirilecek olan çelik-alüminyum bindirme konfigürasyonunda tablaya sabitlendikten sonra, alüminyumun laser ile ısıtılırken paslanmaz çelik (AISI 304) bir roller tarafından alüminyum üzerine baskı yapılması ile gerçekleştirilmektedir. Laser ısıtma çok kısa süre içerisinde alüminyum alaşımının ergiyerek difüzyon olmasını sağlar. Bu etkileşim alüminyum ile çelik arasında bir ara tabaka oluşumunu ile sonuçlanır. Sıcaklık 1200°C'nin altında olduğunda demirce zengin (Fe-Rich) intermetalik bileşiklerin (FeAl ve Fe₃Al) oluşumu teşvik edilir. Roll baskı kuvveti 150 ile 202 MPa aralığında değişmektedir (Ozaki ve Kutsuna, 2012; Rathod ve Kutsuna, 2004).

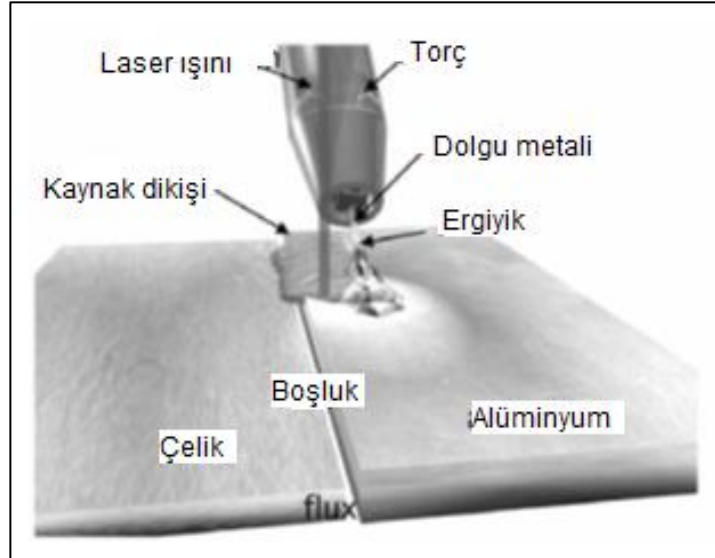


Şekil 2.9. Laser Roll Kaynak prosesinin şematik gösterimi (Ozaki ve Kutsuna, 2012)

2.5. Laser-MIG Hibrit Kaynağı

Laser ışını ve elektrik ark kombinasyonunun, laser kaynağına göre daha avantajlı kaynak birleştirmeleri oluşturduğu uzun yıllardır bilinmektedir. Bu proseste hem laser hem de ark aynı kaynak havuzunda görev almaktadır ve bu durum daha yüksek hız, hatta daha fazla nüfuziyet ve laser'e göre daha yüksek tolerans sağlamaktadır. Laser-MIG hibrit kaynağı aynı zamanda laser kaynağında göre daha düşük enerji gereksinimi olan, ucuz, yüksek tamamlanma oranına sahip bir yöntemdir. Hibrit Laser-MIG kaynağı bu iki yöntemin ayrı uygulamalarındaki güçlükleri de ortadan kaldırmaktadır. Laser kaynağında göre avantajları řu şekildedir;

- Düşük yatırım maliyeti, %30-40 daha düşük enerji gereksinimi.
- Yüksek kaynak hızı
- Kaynak öncesi ağız hazırlama gereksinimini ortadan kaldırması
- Kaynak dikiş kalınlığının kontrol edilebilir olması
- Dolgu metali ile birlikte metalürjik değişkenlerin kontrolü
- Düşük malzeme sertleşmesi
- Geliştirilmiş proses
- %50' ye varan enerji tasarrufu ile yüksek elektrik verimliliği (Thomy, 2007 ve 2013, Wouters 2005).



şekil 2.10. Hibrit Laser-MIG kaynak prosesi

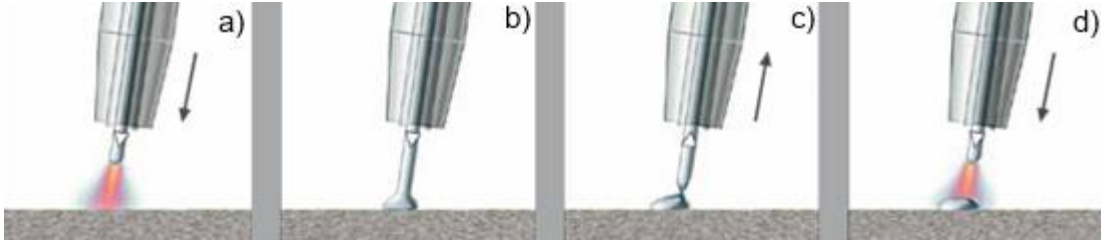
2.6. Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transferi) Yöntemi

Soğuk kaynak prosesi (CMT) 2004 yılında Fronius tarafından geliştirilen ve kaynak ekipmanı ve uygulaması anlamında kaynak teknolojisine yenilik getiren bir uygulamadır. Geleneksel MIG/MAG kaynağına göre soğuk olan proses ile düşük ısı girdisi sayesinde diğer yöntemler ile kaynak edilmesi zor olan demir dışı metallerin kaynağı mümkün olmaktadır. CMT prosesi bugüne kadar bilinmeyen ve tamamıyla yeni bir yöntem olmamak ile birlikte gaz tungsten ark kaynağı (GMAW)'nın limitlerini genişleten yeni bir uygulama alanı doğurmuştur. Alüminyumun çeliğe ark kaynağı ile birleştirilmesinde ilk defa tekrar edilebilir bir tutum kazandırmıştır. Bazı metallerin kaynağında uygulamada sürekli bir ısı girdisine karşı kaynak banyosunda çukurlaşma, sıçrantı ve yetersiz kaynak bağlantısı gibi hatalardan kaçınmak için düşük sıcaklıklar gerekmektedir. Buna karşın CMT yönteminin düşük ısı girdisi sağlaması ile bu tür sorunlardan kaçınmak mümkündür. MIG/MAG yöntemi ile karşılaştırıldığında yöntem halen soğuk bir yöntemdir (Rosado ve diğ., 2008).

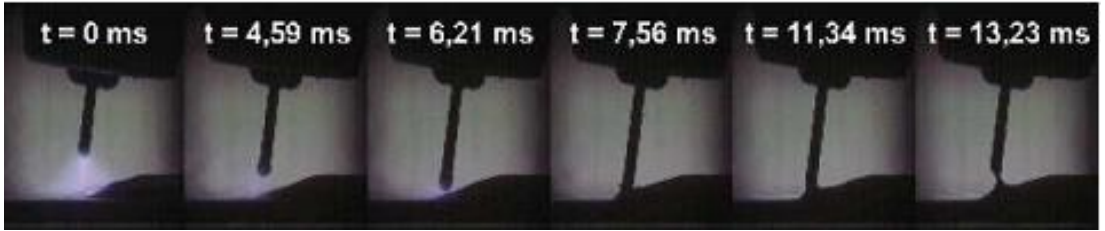
CMT yöntemi ısı girdisinin çok düşük olduğu bir gazaltı kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir. CMT kaynağı ile enerji girdisi %30 oranında azaltılmıştır. Bu da kaynakta düşük çarpılma ve yüksek hassasiyet kazandırır. Geleneksel yöntemlerde tel, kısa devre oluşturuncaya kadar ileri yönde hareket ettirilir, bu esnada kaynak akımı yükselir ve ark oluşumu için kısa devrenin tekrar açık devre olmasını sağlar. CMT yönteminde ise ergiyen elektrot damlasının elektrottan ayrılma prensibi tamamen yeni bir teknolojidir. Bu yöntemde 70 hertz lik bir osilasyon ile tel beslemesi yapılır ve bu şekilde tel iş parçasına doğru itilir ve geri çekilirken bir dizi sıcak-soğuk-sıcak-soğuk çevrim oluşur. Bu hareket sayesinde geleneksel yöntemlerde daha yüksek akım çekilmesi ve sürekli tel besleme sonucu oluşan yüksek ısı girdisi ve sıçrantı CMT yönteminde elimine edilmiştir (Url-7; Rosado ve diğ., 2008).

CMT yöntemi geleneksel MIG/MAG kaynağına göre daha kararlı ark sağlar ve eksiksiz proses regülasyonu sunar. Sıcak ve soğukun sürekli değişimi prensibi ile uygulanan bu teknikte ark yanma fazında dolgu malzemesi kaynak banyosuna hareket ettirilir (Şekil 2.11.a, sıcak yöntem). Dolgu malzemesinin kaynak banyosuna daldırılması ile ark söner ve kaynak akımı azalır (Şekil 2.11.b, soğuk yöntem). Telin saniyenin doksanda biri süresinde geriye doğru hareketi, kısa devre esnasında damlacık transferine yardımcı olur. (Şekil 2.11.c, soğuk yöntem). Telin hareket yönü

tersine çevirilir ve yönteme yeniden başlanır (Şekil 2.11.d, sıcak yöntem). Şekil 2.12.'de ise yöntemin akışı milisaniye zaman diliminde görülmektedir.



Şekil 2. 11. CMT yönteminin aşamaları (a-d) (Url-8)

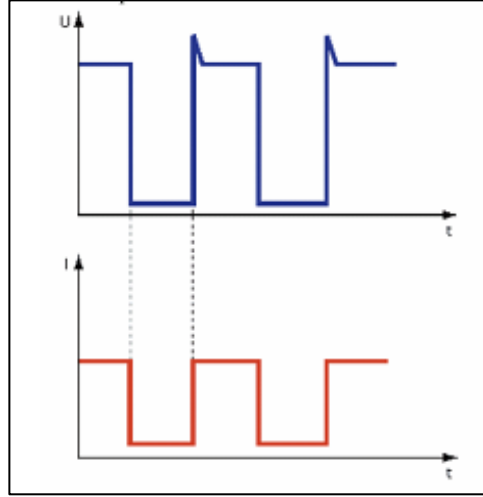


Şekil 2.12. CMT yönteminin milisaniye zaman diliminde akışı (Rosado ve diğ., 2008)

Geleneksel MIG/MAG yöntemi ile CMT yöntemini birbirinden ayıran üç temel özellik vardır. Bunlardan ilki, entegre tel hareketidir yani tel beslemesi doğrudan kaynak yönteminin içindedir. Dijital proses regülasyonu bir kısa devre algılar ve teli saniyede 90 defaya kadar geri çekerek damlacık transferine yardımcı olur. Geleneksel yöntemlerde tel besleme hızı sabittir ya da önceden belirlenen zaman cetveline göre değişmektedir. CMT yönteminde ise tel besleme hızı ve yönü kısa devrenin oluşumu ve açık hale gelmesi ile kontrol edilir. Tel hareketi için önceden ayarlanmış bir zaman çizelgesi bulunmamaktadır. Bu yöntemde tel hareketi ile kaynak havuzu arasında doğrudan bir etkileşim olduğu görülmektedir. Bundan dolayı tel hareketi tam olarak kısa devrenin oluşumuna bağlı olduğu için telin ortalama osilasyon frekansı üzerinde durulmaktadır. Yaklaşık olarak bu değer 70 Hertz civarındadır.

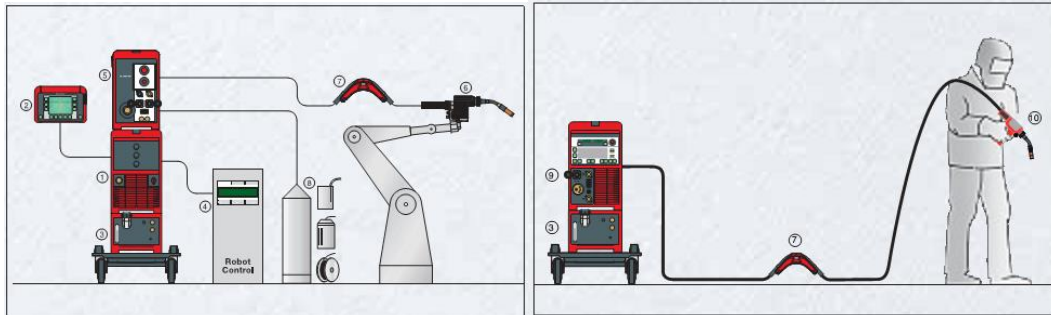
CMT yönteminin ikinci karakteristik özelliği ise, metal transferinin akımdan bağımsız olmasıdır. Bu durum geleneksel yöntemlerde akıma bağlıdır. CMT yönteminde akımın kısa devreyi açık hale getirmekle herhangi bir ilgisi bulunmamaktadır. Metal transferinin oluşması telin geri çekilmesi ve kaynak banyosunun yüzey gerilim ile gerçekleşir. Bundan dolayı kısa devre akımı çok düşük tutulur ve bunun beraberinde metale daha düşük ısı girdisi sağlanır. Son olarak tel hareketi metal transferini yukarıda anlatıldığı şekilde destekleyen CMT yönteminin karakteristik özelliğidir.

Ark boylarının algılanması ve ayarlanması mekanik olarak gerçekleştiğinden ark, iş parçasının yüzey kalitesinden ya da hangi hızda kaynak yapmak istediğinizden bağımsız olarak daima kararlı kalır. Bu sayede CMT her yerde ve her konumda uygulanabilir. Telin geriye doğru hareketin kısa devre esnasında damlacık transferine yardımcı olur. Kısa devre kontrol edilir ve akım düşük seviyede tutulur. Bunun sonucunda ise çapaksız metal geçişi gerçekleşir (Rosado ve diğ., 2008).



Şekil 2.13. CMT yönteminde akım ve voltajın zamanla ilişkisi

Şekil 2.14' de robotik ve manuel uygulamalarda CMT sistem konfigürasyonu gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Robotik ve manuel uygulamada CMT sistem konfigürasyonu. 1)TPS 3200/4000/5000 CMT güç kaynağı, 2)RCU 5000'i uzaktan kumanda ünitesi, 3)FK 4000 soğutma ünitesi, 4)Robot arayüzü, 5)VR 7000 CMT Tel besleyici, 6)Robot, 7)Tel tamponu, 8)Tel desteği, 9)TransPuls sinerjik 2700 CMT güç kaynağı, 10)Su soğutmalı CMT uygulaması için geliştirilmiş torç (Url-8)

2.6.1. CMT yönteminin genel üstünlükleri

2.6.1.1. Düşük ısı girdisi

Kaynak işlemi sırasında tel ileri doğru hareket ettiğinde kısa devre oluşur, kısa devre oluşur oluşmaz tel tekrar geriye doğru çekilir böylece yanma fazında ark çok kısa bir süre için ısı verir.

2.6.1.2. Çapaksız kaynak

Telin geriye doğru hareketi sonucu oluşan kısa devre esnasında bu geriye hareket damlacık transferine yardımcı olur. Kısa devre kontrol edilir ve akım düşük seviyede tutulur. Bu şekilde çapaksız bir metal transferi sağlanır.

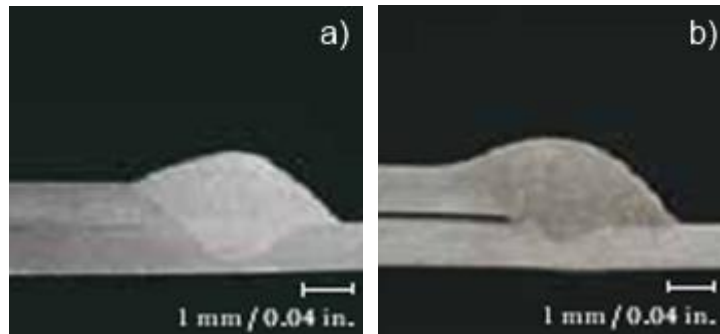
2.6.1.3. Kararlı ark

Ark boylarının algılanması ve ayarlanması mekanik olarak gerçekleşir. Ark iş parçasının yüzey kalitesinden ya da hangi hızda kaynak yapmak istediğinizden bağımsız olarak daima kararlı kalır. Bu sayede CMT her yerde ve her konumda uygulanabilir.

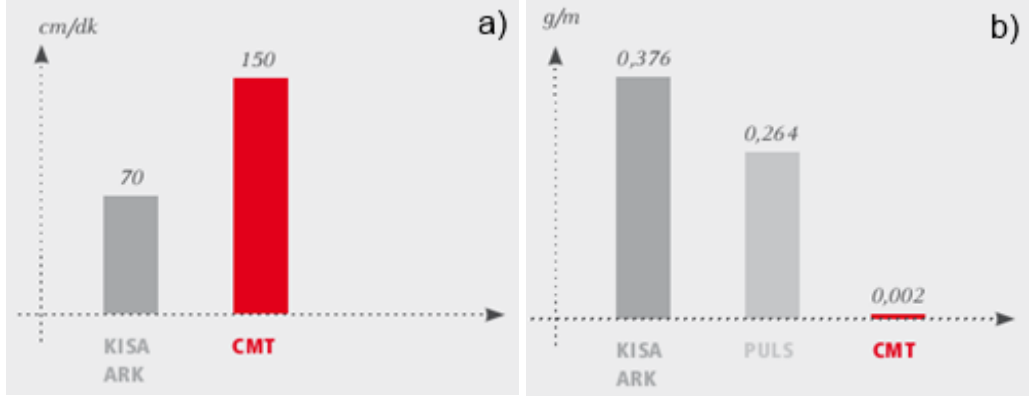
2.6.2. Kaynak bağlantılarında CMT yönteminin üstünlükleri

2.6.2.1. Çelik kaynaklı bağlantılarında

CMT yöntemi ile çelik sacların birleştirilmesinde yöntemin sağladığı üstünlüklere bakıldığında ilk olarak %50 ve daha yüksek kaynak hızlarına imkân sağladığı görülmektedir. Şekil 2.15.a Bunun yanında çok az çapak oluşumu görülmektedir. 1 metre kaynak dikiş uzunluğunda kısa ark ve puls yöntemlerine göre %99 daha az çapak oluşturduğu rapor edilmiştir (Şekil 2.15.)

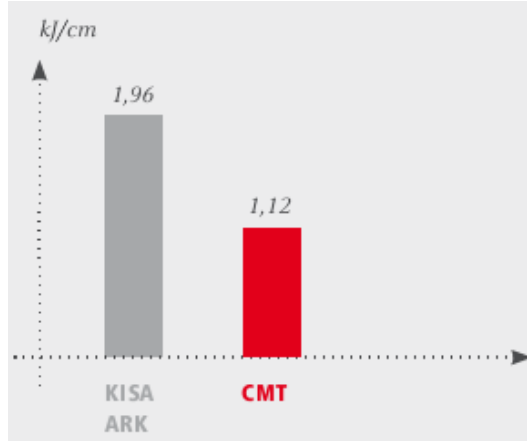


Şekil 2.15. Kısa devre arkı I:185 A, U:17,6 V (a) ve CMT I:200, U:16,2 V (b) (Url-8)

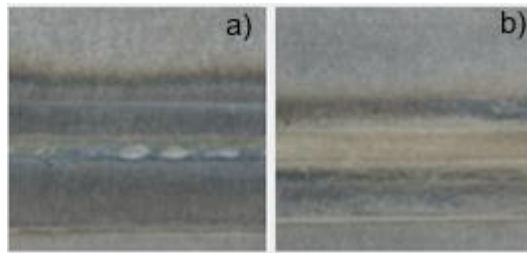


Şekil 2.16. Kısa ark ile CMT yöntemi kaynak hızlarının karşılaştırılması (a) ve 1m kaynak dikişinde oluşan çapak miktarı g/m (b) (Url-8)

M21 koruyucu karışım gazı altında 1mm kalınlıktaki çelik saca yapılan kaynakta kısa ark yöntemine göre %50 daha az ısı girdisi olduğu bilgisi verilmiştir (Şekil 2.17.). Verilen kaynak dikişi görüntülerine bakıldığında da ısı girdisinin kaynak dikişinde kısa devre arkına göre CMT yönteminde daha iyi olduğu net bir şekilde görülmektedir (Şekil 2.18. a-b ve Şekil 2.19.).



Şekil 2.17. 1mm Çelik kaynağında kısa ark ile CMT yöntemi ısı girdileri karşılaştırılması (Url-8)



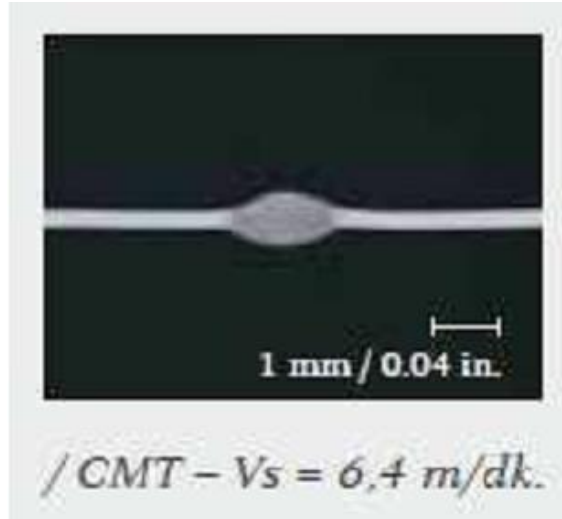
Şekil 2.18. (a) Kısa devre arkı ile I:97 A, U:18,1 V ve (b) CMT ile I:98, U:11,8 V 1mm çelik kaynağında kaynak dikişi görüntüleri (Url-8)



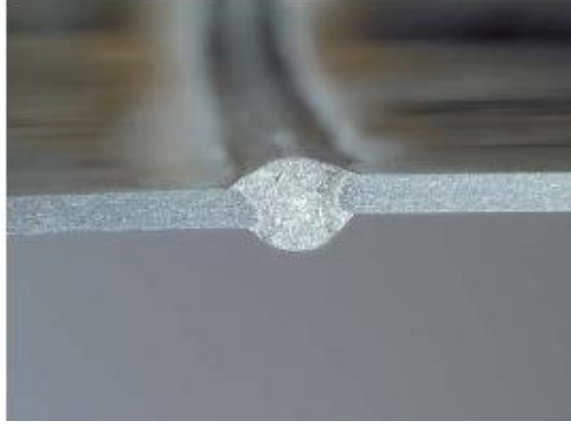
Şekil 2.19. Daldırma galvaniz ile kaplanmış çelik ile elektro galvaniz kaplanmış 1 mm kalınlığındaki çelik sacların CuSi3 dolgu metali ile CMT lehim görüntüsü

2.6.2.2. Alüminyum-alüminyum CMT kaynaklı bağlantılarında

CMT yöntemi diğer kaynak yöntemlerinin birçoğu ile kaynak edilemeyen çok ince alüminyum ve alüminyum alaşımların kaynağına imkân vermektedir. Şekil 2.20.' de 0,3 mm kalınlığında alüminyum levhaların kaynak kesiti gösterilmektedir.

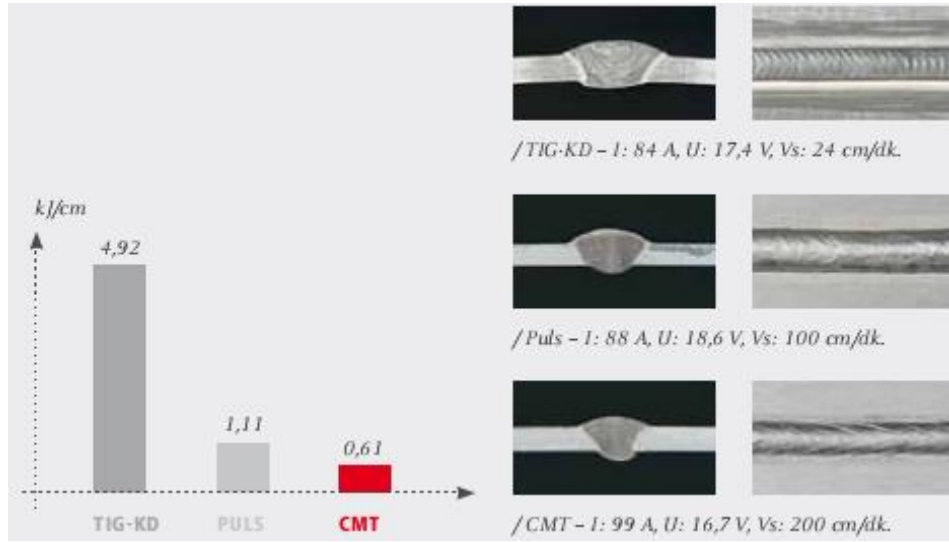


Şekil 2.20. 0,3 mm Alüminyum levhanın kaynağı Vs:6,4m/dak (Url-8)

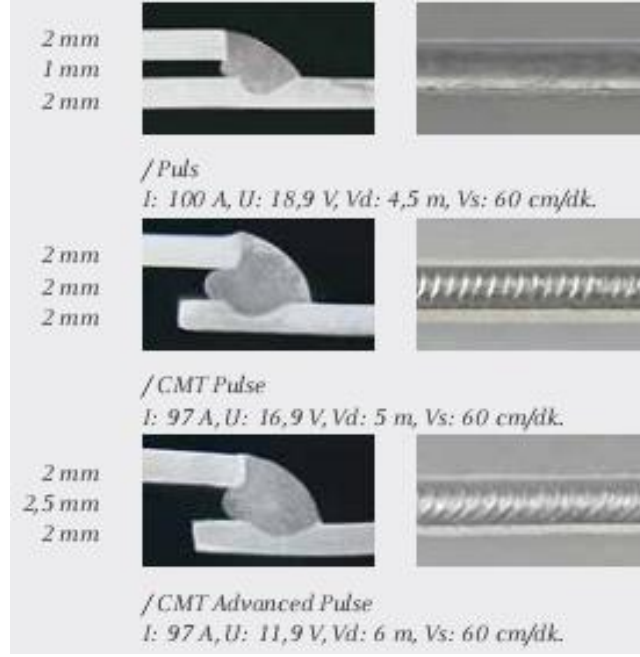


Şekil 2.21. 0,8 mm iki AlMg3 levhanın hiçbir bağlantı tertibatı kullanılmadan alın birleştirilmesi (Url-7)

Diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında %90'a kadar daha düşük ısı girdisi ve 10 kata kadar yüksek kaynak hızı elde edilebilir (Şekil 2.22.). Bunların yanında yöntem çok iyi boşluk doldurma kabiliyeti sağlar (Şekil 2.23.).



Şekil 2.22. Isı girdisi ve kaynak hızlarının karşılaştırılması (Url-8; Güngör, 2013)

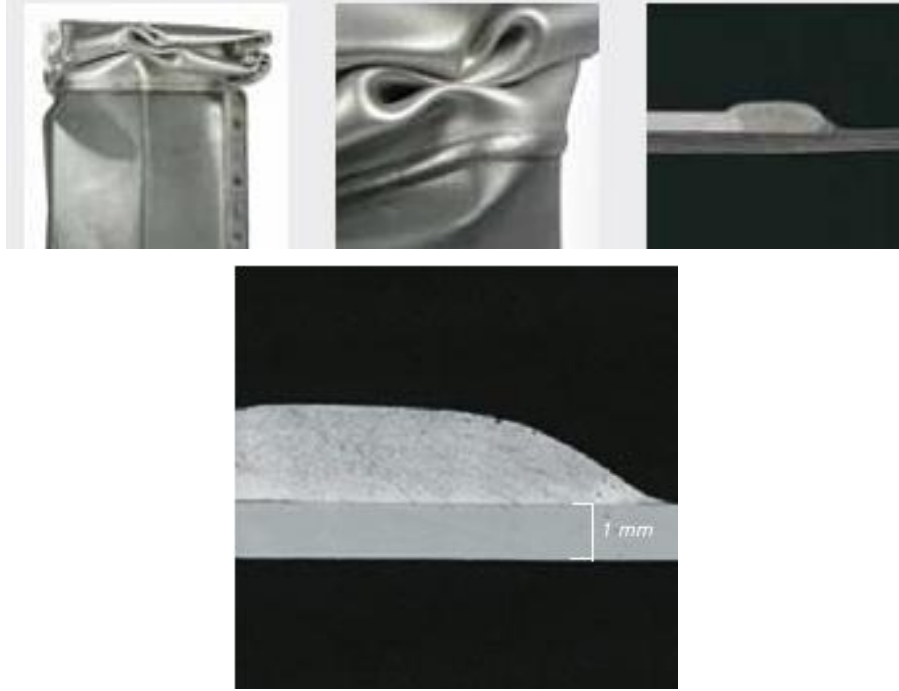


Şekil 2.23. 2mm kalınlığındaki levhanın bindirme kaynağında boşluk doldurma kabiliyeti (Url-8; Güngör, 2013)

2.6.2.3. Çelik-alüminyum CMT kaynaklı bağlantılarında

Farklı metallerin birleştirilmesi konusunda malzeme özelliklerinin çok iyi bilinmesini gerekir. Alüminyum öncelikle düşük özgül ağırlığı, optimal kullanım ve işleme özellikleri ile göz doldururken, çelik, sağlamlığı ve düşük maliyeti nedeniyle birçok alanda vazgeçilmez durumda yerini korumaktadır. Korozyon davranışı, ısı genleşme katsayısı ve atomik özelliklerin farklı metallerin kaynağında etkisi büyüktür. Çelik ve alüminyumun yoğun ısı altında birleştirilmesi sırasında her iki malzemenin birleşme sınırında intermetalik faz adı verilen bir faz oluşumu ortaya çıkmaktadır. Isı girdisi arttıkça intermetalik faz tabaka kalınlığı daha da büyümekte ve birleşimin mekanik-teknolojik özellikleri kötüleşmektedir. Örneğin her iki malzemenin sahip olduğu farklı ısı genleşme katsayısı birleştirme bölgesinde bir gerilim alanının oluşmasına neden olmaktadır. Oldukça artan korozyon eğilimi de göz ardı edilmemelidir. Bunu nedeni çeliğin alüminyum karşısındaki yüksek elektrokimyasal gerilim farkıdır. Şimdiye değin çelik ve alüminyumun birleştirilmesi ile ilgilenen teknolojiler belli geometriler için veya çok masraflı kontrol tekniği kullanımı ile gerçekleşmiştir. Çelik ve alüminyumun kaynak tekniği açısından uyumsuz oldukları çoğu metalürji uzmanı için geçerli kabul edilen görüş olmasına karşın, yapılan detaylı araştırma çalışmaları MIG/MAG kaynağının çelik ve alüminyumun ark kaynağı yoluyla birleştirilmesi konusunda başarılı olabileceğini göstermektedir.

MIG/MAG yönteminin çeliğin alüminyumla birleştirilmesi işleminin gereklilikleri ile daha iyi uyum sağlamasını amaçlayan çalışmaların sonunda CMT yöntemi ortaya çıkmıştır. CMT kontrollü ve neredeyse akımsız gerçekleşen bir metal geçişine izin vermektedir. Alüminyum, alüminyum dolgu malzemesi ile birlikte erir ve bu eriyik galvanize çelik yüzeyini ıslatır. Kaynak teli hızlı aralıklarla yüksek frekansta akış yönünün tersine doğru hareket eder. Kaynak telinin tam belirlenmiş şekilde geriye çekilmesi kontrollü bir damlacık transferinin ve temiz, cürufsuz bir metal geçişinin gerçekleşmesini sağlar. Tel hareketi çok yüksek frekansla gerçekleşir ve torç üzerinde, çabuk tepki veren bir tel tahriki gerektirir. Ana tel sürmenin bu hareketi takip edemeyeceği açıktır. Bu yüzden tel sürme hortumu, telin ek ileri-geri hareketini dengeleyecek bir tel tamponu ile donatılmıştır. Güç kaynağı kısa devreyi tespit ettiği an kaynak akımı düşer ve dolgu metali harekete başlar ve sürekli çevrim ile devam eder (Talalaev ve diğ., 2012).



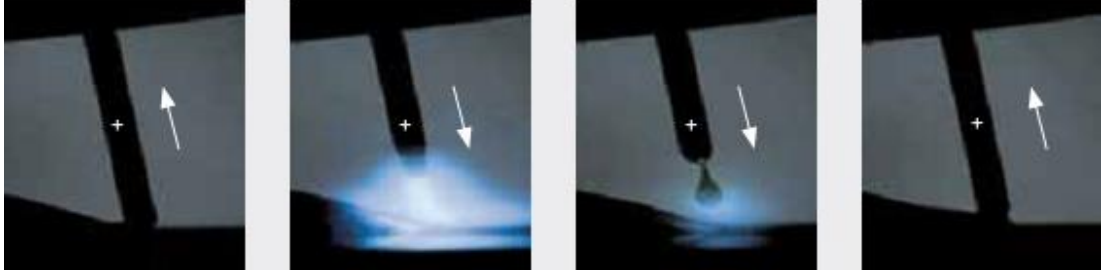
Şekil 2.24. Çelik/Alüminyum hibrit bağlantısı ve çarpışma testi görüntüleri

2.6.2. Yöntemin türevleri

Bu yöntem uygulamada düz CMT olarak uygulanabildiği gibi CMT Pulse, CMT Advanced ve CMT Advanced Pulse olarak da uygulanabilmektedir.

2.6.2.1. CMT pulse

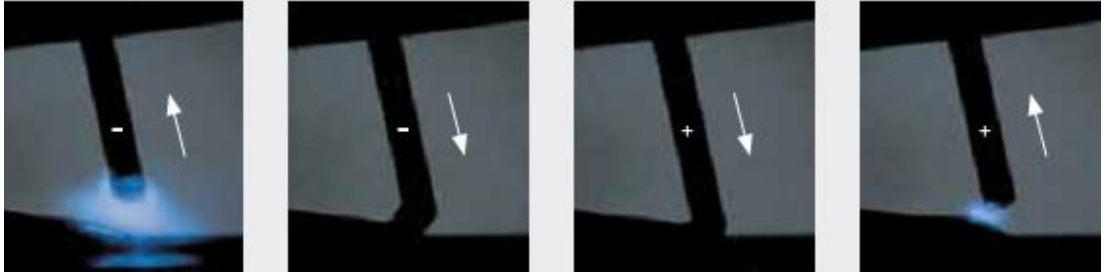
Bu proses bir darbe döngüsünü bir CMT döngüsü ile birleştirir ve bu nedenle daha yüksek ısı verir. Hedeflenen ayarlanabilir değişken darbe ilavesi çok büyük bir güç aralığı ve esneklik sağlar (Şekil 2.25.).



Şekil 2.25. CMT ve darbe döngülerinden oluşan kombinasyon (Url-8)

2.6.2.2. CMT advanced

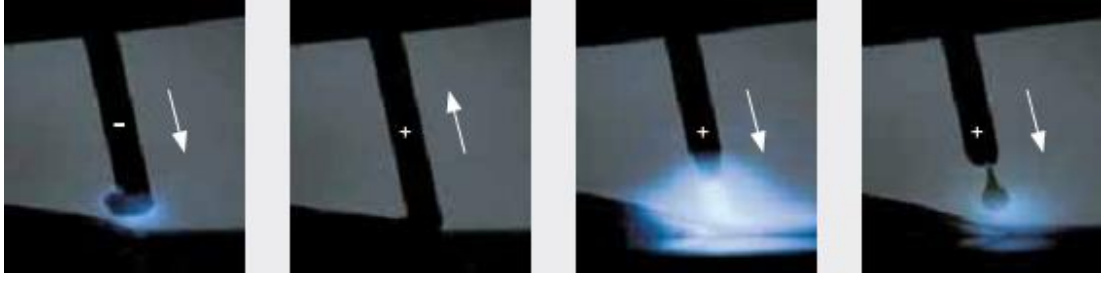
CMT advanced ile düz CMT yönteminden daha da soğuk bir uygulamaya ulaşılmıştır. Polarite değişimi kısa devre fazında gerçekleşir ve kaynak akımının polaritesi yöntem regülasyonuna entegredir. Böylelikle kanıtlanmış CMT yöntem kararlılığı kısa devre fazında emniyete alınmıştır. Bunun sonucunda hedeflenen ısı girdisi, çok yüksek boşluk doldurma kapasitesi ve %60'a kadar daha yüksek ergime gücüne ulaşılır. Negatif CMT ve pozitif CMT' nin kombinasyonu olarak adlandırılabilir (Şekil 2.26).



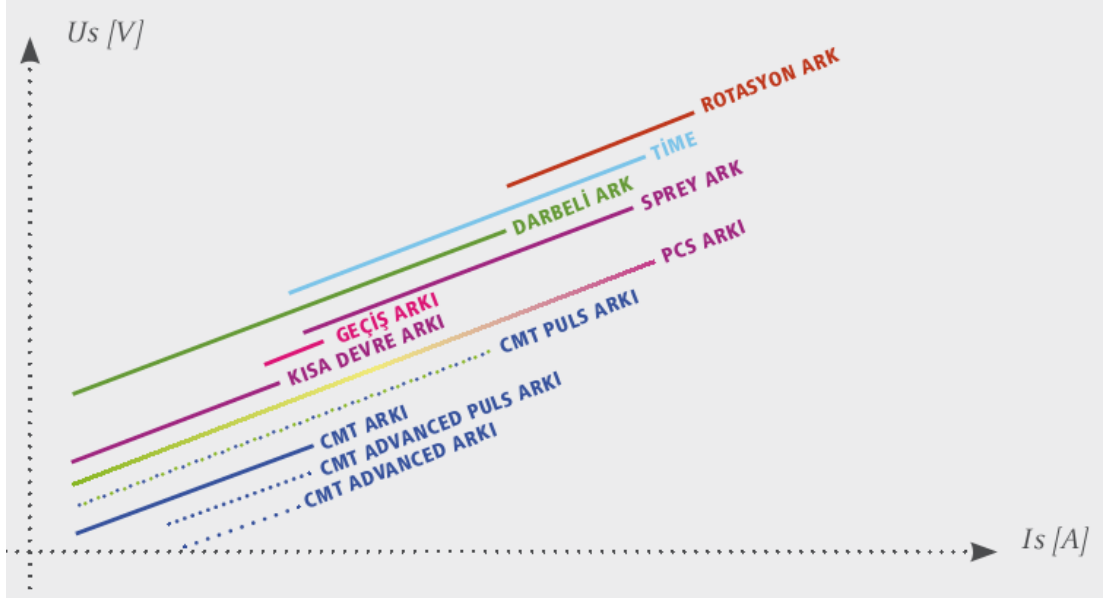
Şekil 2.26. Negatif CMT ve pozitif CMT' nin kombinasyonu (Url-8)

2.6.2.3. CMT advanced puls

Negatif kutuplu CMT döngüleri ve pozitif kutuplu darbe döngüleri kombinasyonu ile arkın kesin doğruluğu ve yüksek düzeyde ark hâkimiyeti hedeflenmiştir (Şekil 2.27.). CMT ark teknolojilerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.28.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Negatif CMT ve darbe döngülerinden oluşan kombinasyon (Url-8)

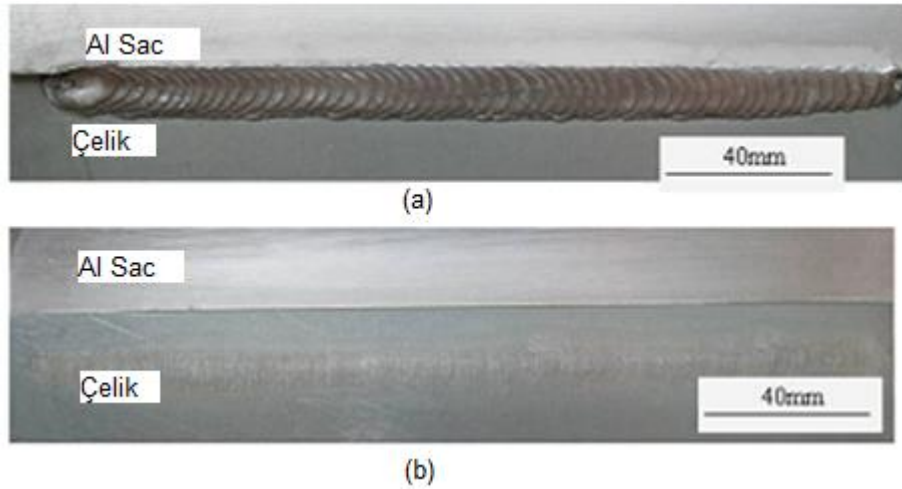


Şekil 2.28. Farklı CMT uygulamalarının diğer yöntemler ile karşılaştırılması (Url-8)

3. KONUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR VE BU ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI

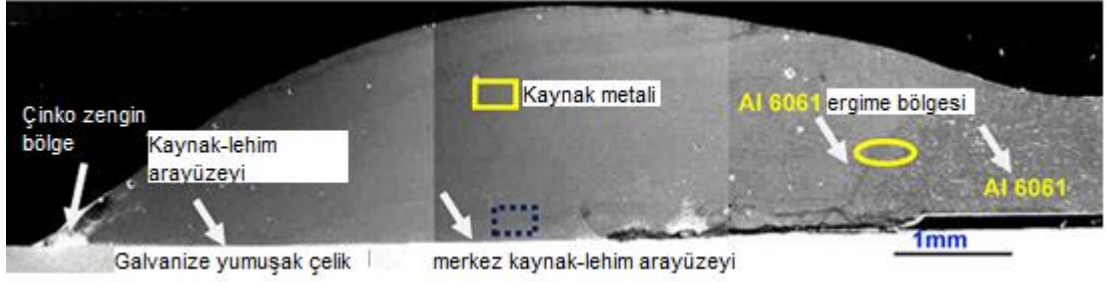
3.1. Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Cao R. ve diğerleri (2013) AA5183, AA6061, AA7075 alüminyum alaşımları ile Q235 galvanizli yumuşak çeliği farklı dolgu metalleri kullanarak birleştirmiş ve birleştirmede mikroyapı ve bağlantı performanslarını incelemişlerdir. 1,2 mm kalınlığındaki alüminyum alaşımları 1 mm kalınlıktaki Q235 galvanizli çelik sac, her biri 1,2 mm çapında ER4043, ER4047, ER5356 dolgu metalleri ile birleştirilerek çekme testi uygulanmıştır. Bu çalışmada ANOVA L27 taguchi dizaynı kullanılarak en mukavim kaynak bağlantısı için uygun parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan kaynaklar neticesinde oluşan kaynaklara ait görüntüler Şekil 3.1.' de gösterilmiştir (Cao ve diğ., 2013).



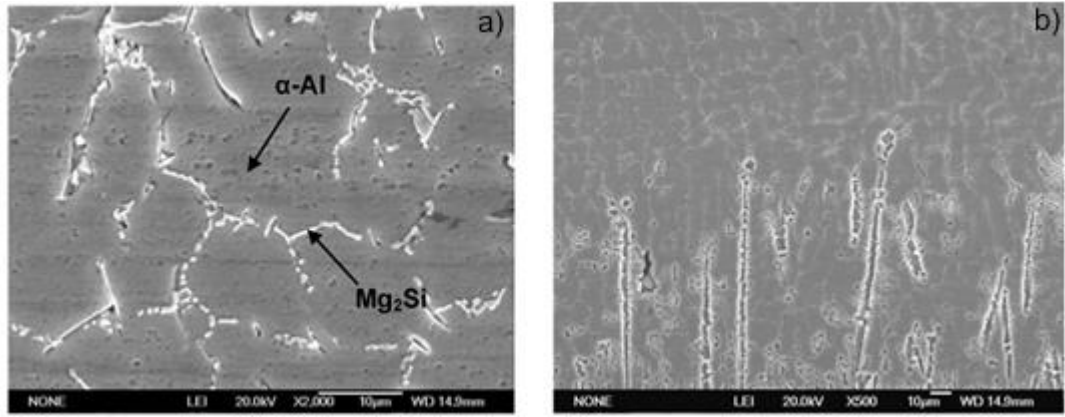
Şekil 3.1. 1mm AA6061T6-1mm Galvanizli yumuşak çelik: (a) ön yüz, (b) arka yüz

Şekil 3.1.' de CMT kaynak-lehimlenmiş AA6061T6-Galvanizli yumuşak çelik saclar için optimum kaynak bağlantı görüntüsü gösterilmiştir. Bu bağlantıdan alınan kesitler kaynağın kalitesini araştırmak üzere Şekil 3.2.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. CMT Kaynak-lehimlenmiş 1mm kalınlığındaki AA6061T6-1mm Galvanizli çelik mikroyapı görüntüsü (Cao ve diğ., 2013)

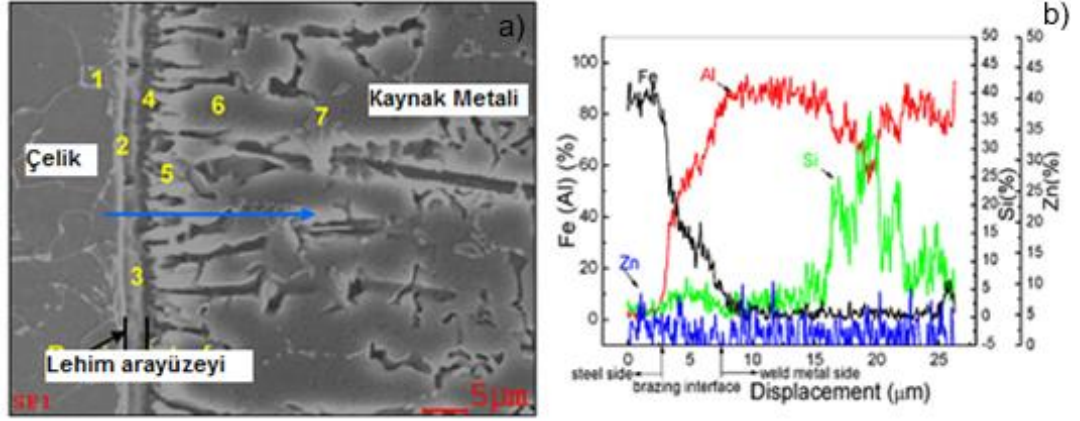
Mikroyapıda görüldüğü gibi alüminyum ile çeliğin birleşme noktası üç bölgeden oluşur ve bunlar kaynak metalini, zengin çinko bölgesi ve AA6061T6 ya yakın olan alüminyum ergimiş bölgesidir. Bunların dışında ergimiş dolgu metalinin galvanizli çelik üzerinde oluşturduğu süreksiz lehim arayüzeyi görülmektedir. Şekil 3.2.'de gösterilen bölgelere ait mikroyapılar ise Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. (a) kaynak metalinin ortasında işaretlenmiş bölgeden alınan mikroyapı (b) kaynak metalinin alt bölgesinde kesikli olarak işaretlenmiş bölgeden alınan mikroyapı

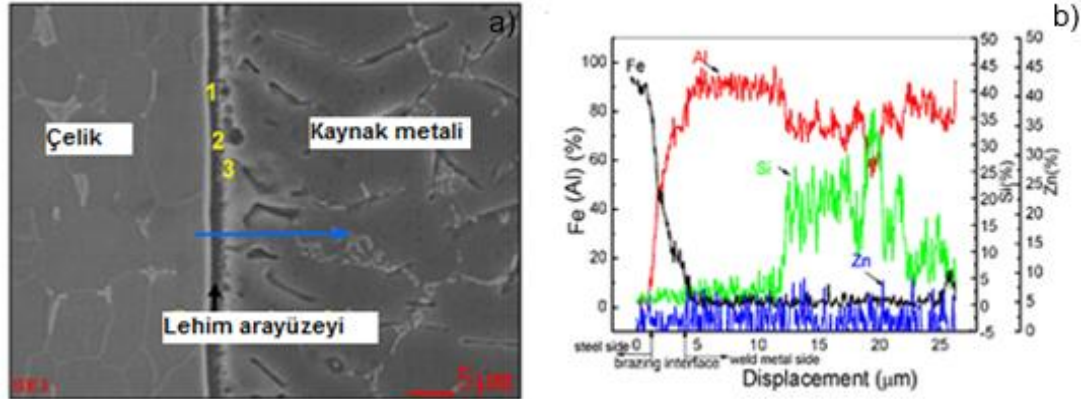
Şekil 3.3.a' da gri tonda eş eksenli pro-ötektik alfa-Al katı ergiyiği ve Al-Si ikincil fazların (açık beyaz) gözleendiği bilgisi verilmiştir. Şekil 3.3.b' de ise kaynak metalinin alt kısmından alınan mikroyapı da alfa-Al ve Al-Si ikincil fazının hızlı soğumadan dolayı stunsu şekilde görüldüğü bilgisi verilmiştir. Şekil 3.4.'de kaynak metalini ile çelik arayüzeyinde oluşan IMC tabakası gösterilmektedir. Bu bölgede delta-Fe katı çözültisi, Fe_3Al , Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ ve Fe_2Al_4 ile $FeAl_3$ intermetalik fazlarının oluştuğu yapılan çalışmalar sonucu tespit edilmiştir.

Şekil 3.5.'de geçiş bölgesine ait mikroyapı gösterilmektedir. Bu arayüzeyde oluşan intermetalik fazın kalınlığının 2-3 μm olduğu bilgisi verilmiştir.



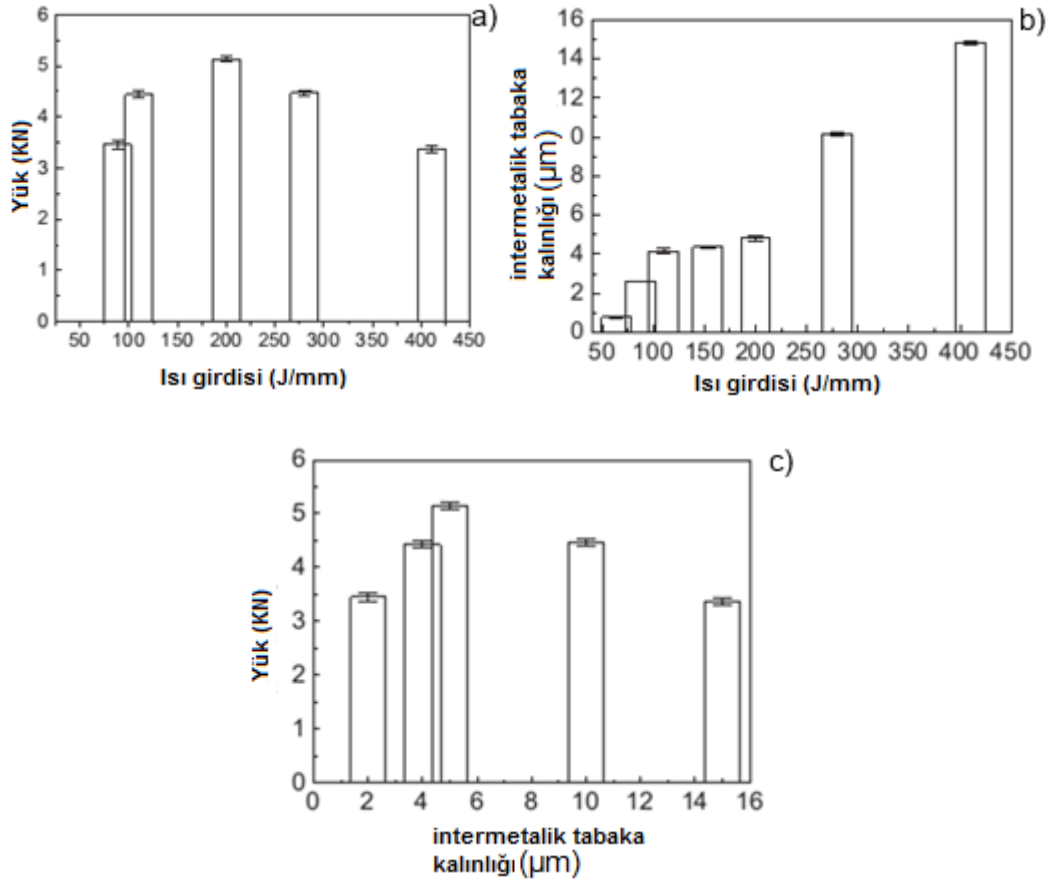
Şekil 3.4. Arayüzey mikroyapısı (a) ve çizgi analizi sonucu (b)

Şekil 3.6.a' da gösterildiği gibi 200 J/mm ısı girdisi değerine kadar bağlantı mukavemetinde bir artış varken, bu değer üzerine çıkıldığında mukavemet değerleri azalmaktadır. Bunun ile beraber Şekil 3.6.b' de ise arayüzeyde oluşan intermetalik tabaka kalınlığının farklı ısı girdisi değerlerindeki değişimi verilmiştir. Alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesinden kopan numuneler incelendiğinde arayüzeydeki intermetalik tabaka kalınlığının 5 µm ve altında olduğu, bu değer üzerine çıkıldığında bağlantının Al-Fe arayüzeyinden kopma gösterdiği bilgisi verilmiştir. Şekil 3.6.c' de ise intermetalik tabaka kalınlığına bağlı olarak kopma mukavemet değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Geçiş bölgesine ait mikroyapı (a) ve mavi ok boyunca alınan çizgi analiz sonucu (b)

İstatistiksel analiz sonuçlarına bakıldığında ise prosesi en çok etkileyen parametrelerin sırası ile %48,92 ile dolgu metali ve %23,82 ile tel besleme hızı ile kaynak hızı arasındaki etkileşimin olduğu bilgisi verilmiştir. Tel besleme hızı (%19,35) ve kaynak hızı (%13,13) prosesi etkileyen üçüncü ve dördüncü parametrelerdir (Cao ve diğ., 2013).



Şekil 3.6. Lehim arayüzeyinde bağlantı mukavemeti, ısı girdisi ve IMC tabaka kalınlığının etkileşim. (a) Isı girdisinin bağlantı mukavemetine etkisi. (b) Isı girdisi – IMC kalınlık değişimi. (c) IMC kalınlığının bağlantı mukavemetine etkisi

Cao R. ve diğ. (2013) bu çalışmanın sonucunda;

- 1.0mm kalınlıktaki AA6061T6 ile 1.0mm galvanizli yumuşak çeliğin CMT yöntemi ile birleştirilmesinin uygun olduğunu,
- Yapılan ANOVA deneysel çalışma sonucunda CMT yöntemi ile bu bağlantı için en uygun parametrelerin; ER4043 dolgu metali, %100 Argon koruyucu gaz, 12-14 V kaynak voltajı, 2-3,5 mm birleştirme mesafesi, 6-8 mm/s kaynak hızı ile 4-6 m/dak tel besleme hızının en olduğu bilgisi verilmiştir.
- CMT Kaynak-lehimlenmiş bağlantının mukavemet değerinin arayüzeyde oluşan intermetalik faz tabakasının kalınlığına ve alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesine bağlı olduğu,
- Isı girdisinin kontrol edilerek (100-200 J/mm) intermetalik fazın kalınlığını ve alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesindeki zayıflamanın azaltılabileceği bilgileri verilmiştir.

- CMT Kaynak-lehimlenmiş 1.0mm kalınlığındaki AA6061T6-1mm galvanize çeliğin bağlantı mukavemeti intermetalik tabaka kalınlığına ve alüminyumun ısıdan etkilenen bölgesindeki mukavemet azalmasına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

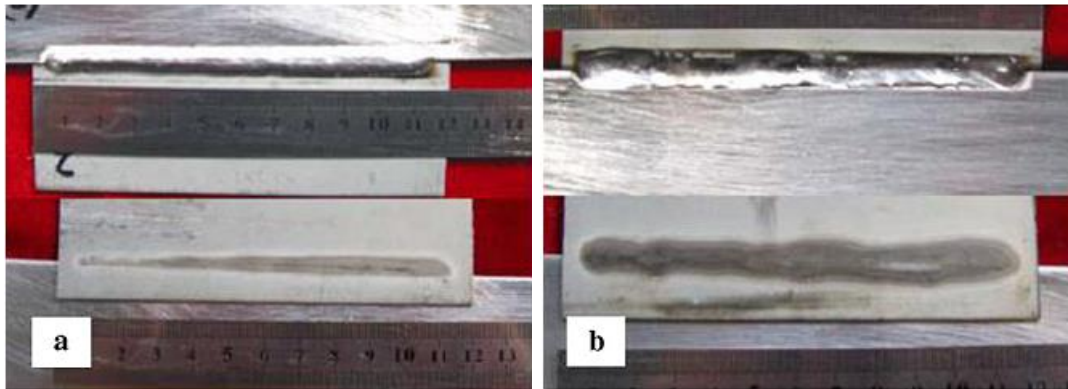
Zhang ve diğ. (2007) alüminyum ile galvanizli çeliği CMT yöntemi ile birleştirerek arayüzey mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini araştırmışlar.

Yaptıkları araştırmada 1mm kalınlığındaki saf 1060 sac ile 1mm galvanizli çelik birleştirilerek bu bağlantının mukavemet değerleri ve arayüzeyde oluşan intermetalik tabaka ile olan etkileşimi incelenmiştir. Deneyler 1,2 mm AISi dolgu metali kullanılarak 15L/dak saf argon gazı altında gerçekleştirilmiştir. İki farklı kaynak parametresi seçilmiş ve kaynaklar bu parametreler ışığında tamamlanmıştır.

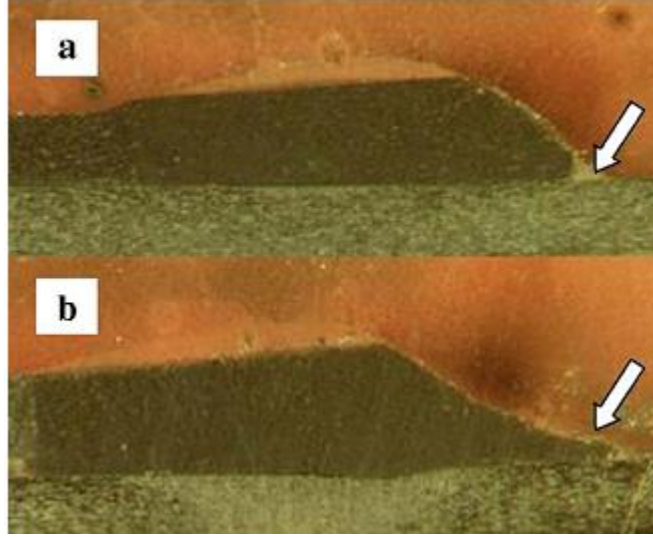
Tablo 3.1. 1060 Al alaşımı ve Galvanizli çeliğin birleştirilmesinde kullanılan CMT kaynak parametreleri

Örnek No	Kaynak akımı (A)	Kaynak Voltajı (V)	Tel besleme hızı (m/dak)	Kaynak hızı (mm/dak)	Kaynak Isı girdisi (J/cm)
Örnek A	66	11,8	3,9	762	613,2
Örnek B	110	13,3	5,4	913	961,5

CMT ile birleştirilmiş metallerin ön ve arka yüzey görüntüleri Şekil 3.7.' de gösterilmektedir. Farklı ısı girdileri ile yapılan denemede, daha düşük ısı girdisi kullanılarak yapılan denemede ergimiş alüminyumun galvanizli çeliği daha iyi ıslattığı ve bu durumun galvanizli çeliğin yüzeyinden işlem sırasında buharlaşan çinko buharı miktarına bağlı olabileceği bilgisi verilmiştir. Isı girdisinin aynı zamanda bağlantının kaynak metali ile galvanizli çelik bağlantı bölgesindeki birleşme açısında azalma meydana getirdiği gözlenmiştir (Şekil 3.8.).

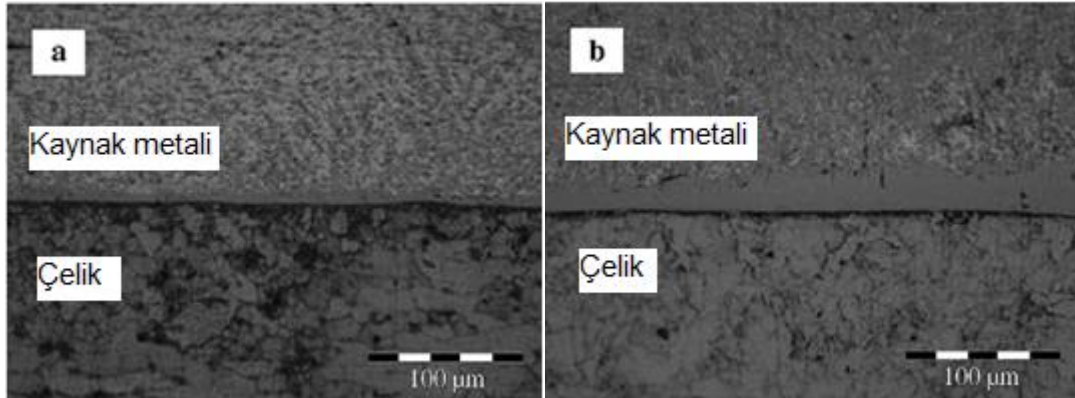


Şekil 3.7. Örnek A ve B nin görüntüleri. (a) ön ve (b) arka



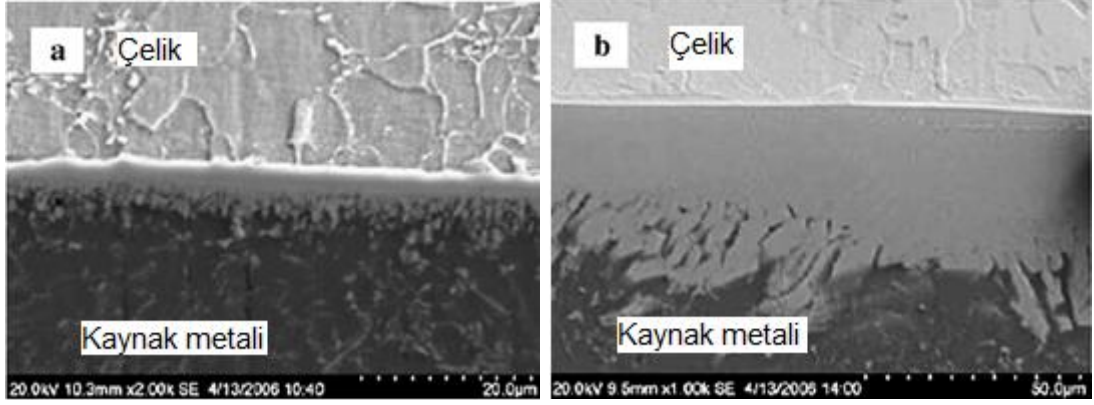
Şekil 3.8. Artan ısı girdisi ile bağlantı açısında meydana gelen değişim

Şekil 3.9.' da ki SEM görüntülerine verilen kaynak bağlantılarına bakıldığında ise intermetalik tabaka kalınlığının sadece bölgesel olarak değil aynı zamanda farklı ısı girdisi ile değiştiği bilgisi verilmiştir. Örnek A da maksimum intermetalik tabaka kalınlığı 10 μm iken örnek B de ise bu tabakanın kalınlığı 40-50 μm değerlerinde olduğu rapor edilmiştir.



Şekil 3.9. Çelik ile alüminyum arayüzünün SEM görüntüsü

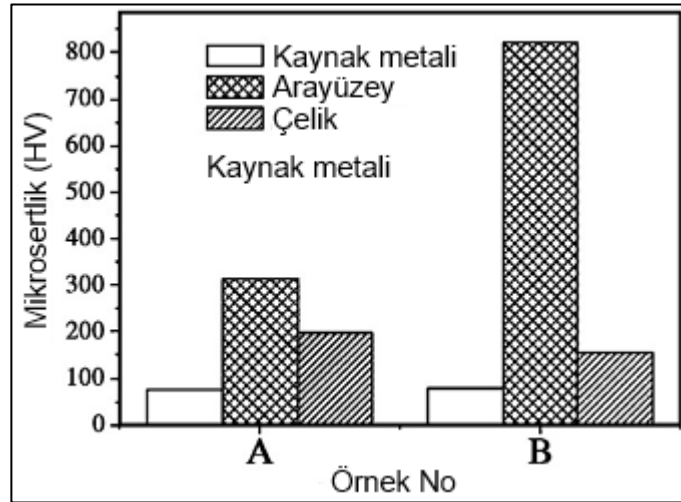
Daha detaylı incelendiğinde ise kaynak metali ile çelik arasında oluşan intermetalik tabakanın düşük ısı girdisinde testere dişi şeklinde kaynak metaline doğru uzanırken daha yüksek ısı girdisi değerlerinde ise bu tabakanın kaynak metaline (tongue-like) şeklinde ve daha kalın şekilde penetre olduğu bilgisi verilmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Çelik ile kaynak metali arayüzeyi SEM görüntüsü

EDX analizi sonuçlarına bakıldığında ise, düşük ısı girdisi değerlerinde arayüzeyde tamamiyle Fe_2Al_5 intermetalik fazının bulunduğu fakat artan ısı girdisi ile çeliğe yakın yüzeylerde $FeAl_2$ fazına ve kaynak metaline penetre olmuş şekilde $FeAl_3$ intermetalik fazların oluştuğu gözlemlendiği bilgisi verilmiştir. Şekil 3.8.' de beyaz ok ile gösterilen bölge incelendiğinde ise dentritik yapının oluştuğu ve bu tür bir oluşumun EDX analizi sonucuna göre artık çinko içeren alüminyumca zengin a-katı ergiyiği ile meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Sertlik testleri ise arayüzeyde oluşan intermetalik tabaka sertliğinin ana metalin sertliğinden fazla olduğunu göstermiştir ve fazın türüne göre sertlik değerlerinin değiştiği bilgisi verilmiştir (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Farklı ısı girdisi değerlerinde arayüzeyde oluşan intermetalik tabakaların mikrosertlik değerleri

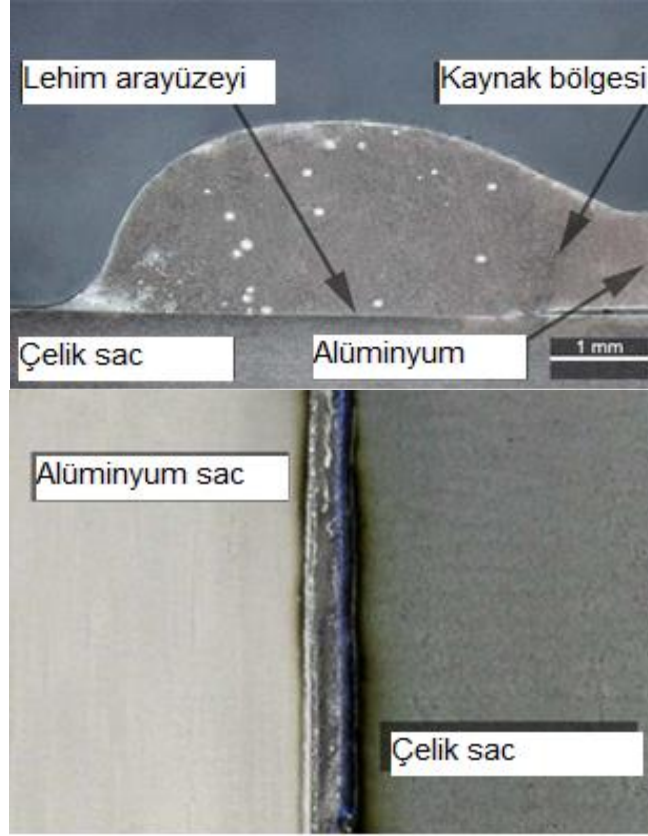
Zhang ve diğ. (2007) bu çalışmanın sonucunda;

- Alüminyum ile galvanizli çeliğin herhangi bir çatlak oluşumu olmaksızın birleştirilebileceği,
- İki metal arasında intermetalik faz oluşumu gözleendiği ve bu fazın kalınlığının değişen ısı girdisi ile değiştiiği,
- İntermetalik tabaka oluşumuna rağmen bu bağlantı bölgesinin metalin en zayıf noktası olmadığı, çekme testi sonuçlarına göre intermetalik tabaka kalınlığı 40µm' yi geçtiğinde dahi kopmanın alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesinden gerçekleştiği bilgisi verilmiştir.

Zhang ve diğ. (2009) yaptıkları bir diğ. çalışmada 1 mm 1060 alüminyum sac ile 1 mm galvanizli çeliğin CMT yöntemi ile birleştirilmesinde ark karakteristiğini ve metal transfer davranışını incelemiş ve bu çalışmanın sonucunda;

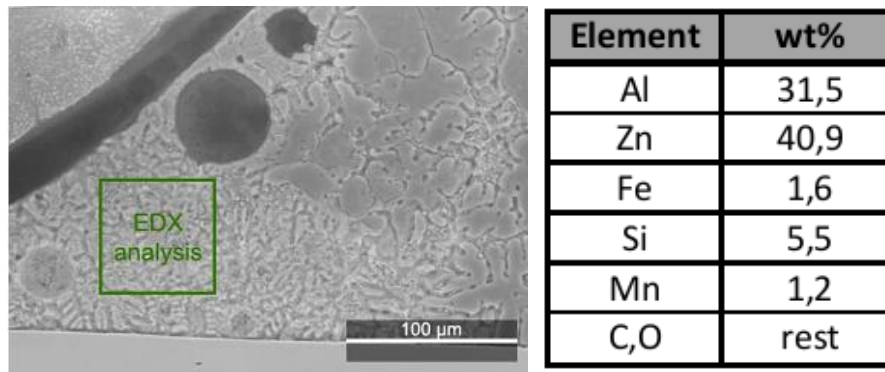
- CMT yönteminde metal transfer prosesinin oldukça stabil olduğunu ve özel dalga kontrol özellikleri ile tel geri çekme kuvvetine bağlı olarak ark ısıtma davranışının değiştiiği bilgisi verilmiştir.
- İntermetalik tabaka kalınlığının ise kontrol edilerek 5 µm' nin altına düşürülebileceği, bu sayede bağlantı mukavemetinin yüksek değerlerde tutulabileceği ve çekme mukavemet değerlerinin 83 MPa değerlerine ulaşabildiği bilgisi verilmiştir.

Franc (2010) Yapmış olduğu araştırmada 1 mm kalınlığındaki 6082 alüminyum alaşımı ile 1 mm galvanizli yumuşak çeliği CMT yöntemi ile 10 mm/s kaynak hızında AISi5 (ER4043) dolgu metali kullanılarak inert argon gazı ortamında I:68 ve U:12V parametreleri kullanılarak birleştirme işleminin gerçekleştirmiştir. Şekil 3.12. de bağlantının makro görüntüsü gösterilmiştir. Çelik dolgu metali ile lehimlenirken alüminyumun kaynak edildiği gösterilmektedir. Makro görüntülerde dolgu metalinde beyaz noktalar şeklinde bir miktar porozite oluşumu gözleendiği bilgisi verilmiştir.



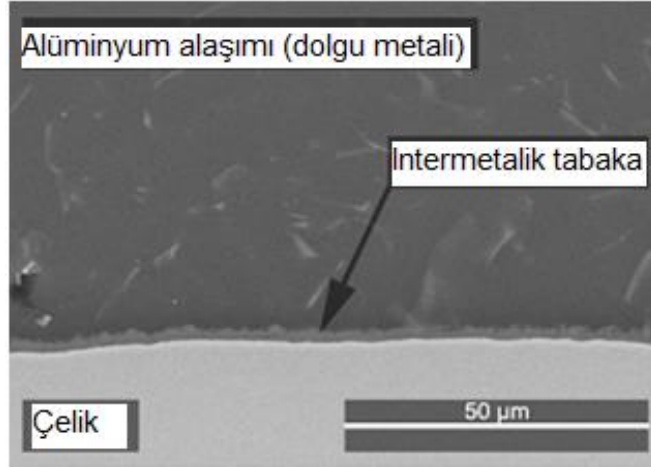
Şekil 3.12. Alüminyum çelik bağlantısının makro görüntüsü ve kaynak dikişi

Şekil 3.12.' de belirtilen alüminyum çelik bağlantısından alınan SEM görüntüsü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.13.). SEM görüntüsünde bu bölgede dentritik yapı oluşumu dikkat çekmektedir. EDX analizi sonucunda ise bu bölgede çinko zenginleşmesi olduğu net bir biçimde görülmüştür. Çelik kaplamadan gelen çinko birleşme sonrası çelik-alüminyum arayüzeyinde dolgu metali içerisinde çözündüğü ve bir kısmının ise buharlaşarak kaynak dikişinde poroziteye sebep olduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 3.13. Kaynak dikişi SEM görüntüsü ve EDX analizi bölgesi ile EDX analiz sonuçları

Alüminyum-çelik arayüzeyinden alınan bir başka SEM görüntüsünde ise Şekil 3.14. intermetalik tabaka kalınlığının 2.11 µm olduğu bilgisi verilmiştir. Farklı morfolojilerde intermetalik tabakalara rastlandığı ve alüminyuma yakın bölgede süreksiz olan tabakanın çeliğe daha yakın bölgelerde daha yumuşak olduğu bilgisi verilmiştir.



Şekil 3.14. Çelik ile alüminyum arayüzeyinde oluşan intermetalik tabaka

İyi bir alüminyum-çelik bağlantısı için alüminyumun çeliği ıslatmasındaki rolünden ötürü çinko kaplamanın önemli olduğu, çinko kaplama olmaksızın farklı torç açılarında ve pozisyonlarda dahi istenilen ıslatmanın sağlanamadığı bilgisi verilmiştir.

Franc (2010), bu çalışmanın sonucunda CMT prosesinin çelik-alüminyum bağlantılarının AlSi5 gibi sık kullanılan dolgu metalleri ile uygun bir şekilde oluşturulabileceği kanısına varmıştır.

Medgyesi ve diğ. (2011) yaptıkları araştırmada farklı metallerin kaynağında karşılaşılan sorunların soğuk metal transferi yöntemi kullanıldığında yöntemin sağladığı avantajları göz önünde bulundurarak araştırmışlar. Farklı kalınlıktaki çelik ve alüminyum alaşımlarını sinerjik TPS 2700 CMT ekipmanı ile farklı parametrelerde AlMg3 dolgu metali birleştirerek aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır.







- İnce saçların birleştirilmesinde karşılaşılan deformasyon, fazla penetrasyon gibi istenmeyen oluşumların CMT yöntemi ile elimine edilebildiği,
- Kaynakta %1 ile 1,5 Si içerikli dolgu metalinin kullanılması ile terner ötektik oluşumunun gözlemlendiği, bunda akışkanlık ve ıslatabilirliği geliştirdiği,
- Mikroskopik analiz sonucunda mikroyapının alfa fazı dentritleri ve tane sınırlarına yakın bölgelerde kaba Al_3Mg_2 partiküllerinden oluştuğunu,

- Tane sınırlarına çökelen Al₃Mg₂ fazının ise alüminyum magnezyum alaşımının gevrekliğini artırdığı bilgisi verilmiştir.







Klasik yöntemin aksine CMT yönteminde galvaniz tabakasının kaynak öncesinde giderilmesi gerekmekte bu durumda büyük avantaj sağlamaktadır (Medgyesi ve diğ., 2011).

Muncut ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada 1 mm 1200 serisi saf alüminyum ile 1 mm galvanizli ve galvanizsiz düşük karbonlu çeliği CMT yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak bölgelerinden alınan makro ve mikroyapı görüntülerini inceleyerek farklı parametrelerde oluşan intermetalik tabaka kalınlıklarını ve galvaniz tabakasının kaynağa olan etkisini incelemiştirler.

Kullanılan metaller DX51D + Z150-NAC 1 mm ve 1 mm EN AW 1200 150x250x1mm boyutlarında kesildikten sonra 1,2 mm kalınlığındaki AISi5 dolgu metali ile %100 argon koruyucu gaz atmosferi altında bindirme birleştirme yöntemi kullanılarak deneyleri gerçekleştirmişler bu deneyler sonucunda elde edilen makroskobik ve mikroskobik görüntüler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.15.).

Nr. of test	CMT Makro örnek	CMT Mikro örnek
Kaynak-lehim ver. 0 [Atac Nital]		
Kaynak-lehim ver. 1 [Atac Nital %10]		
Kaynak-lehim ver. 4a [Atac Nital %10]		

Şekil 3.15. Mikro ve makroyapı örnekleri (Muncut ve diğ., 2011)

Kaynak-lehim ver. 4 b [Atac Nital %10]		
Kaynak-lehim ver. 8 a [Atac Nital %10]		
Kaynak-lehim ver. 8 b [Atac Nital %10]		

Şekil 3.15.(Devam) Mikro ve makroyapı örnekleri (Muncut ve diğ., 2011)

Makroskobik çalışmanın farklı parametrelerle yapılan çalışma sonrası iyi ve kötüyü ayırt etmede oldukça faydalı olduğu bilgisi verilmiştir.

CMT prosesi ile dentritik bölgeler ile yumuşak (smooth) bölgeler arası değişim olduğu ve kaynak dikişi ile alüminyum arayüzeyinin çok daha fazla karmaşık olduğu gözlenmiştir. Şekil 3.15.' de 4a da alüminyuma doğru çinko akışı gözleendiği ve bu oluşumun çatlak ve boşluklara yol açtığı rapor edilmiştir (Muncut ve diğ., 2011).

Muncut ve diğ., (2013) yapmış oldukları bir diğer çalışmada birleştirilen bu metallerin difüzyon tabakalarını incelemişler. Bu çalışmada 1200 alüminyum alaşımı ile galvanizli çeliğin CMT kaynağı ve CMTP (Cold Metal Transfer Pulse) kaynağı sonrası arayüzeyde oluşan intermetalik tabakaları incelemiş ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Üç parametre ve iki düzey kullanarak deney tasarımı yapılmıştır. Kaynak hızı, dinamik düzeltme faktörü, CMT ve CMTP parametreleri ile iki düzeyde deneyler gerçekleştirilmiştir. Muncut ve diğ. (2013) yaptıkları bu çalışmanın sonucunda; kaynak dikiş yüksekliğinin CMTP' ye göre CMT yöntemi kullanıldığında %10-30 daha yüksek olduğunu, bunun CMTP prosesindeki fazla akımdan kaynaklandığı bilgisi verilmiştir.

Polak ve Dostal (2013) yaptıkları araştırmada $AlMg_3$ ile DX51D + AZ 150 AC metalleri CMT yöntemi ile birleştirmişlerdir. Birleştirmede 1.2 mm AISi5 dolgu metali ile %100 argon koruyucu gaz ortamında kaynakları gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 3.16. Farklı parametreler ile birleştirilmiş metallerin kaynak dikiş görüntüleri ve örnek birleştirme

Şekil 3.16.' da farklı parametreler ile birleştirilmiş metallerin kaynak dikişlerine bakıldığında örnek 3' ün tatmin edici olduğunu örnek 7' nin ise görsel iyi bir kaynak dikişi olmadığı bilgisi verilmiştir. Örnek 7 de tamamen uygun olmayan SynchronPuls modu kullanılmıştır, bundan dolayı alüminyum sac galvanize çelik ile birleştirildiğinde sürekli kaynak dikişi elde edilmemiştir ve yüzeyde birçok hata bulunduğu bilgisi verilmiştir. Örnek 10 da oldukça iyi bir kaynak dikişi elde edildiği ve bu birleştirmenin osilasyon hareketi yapan torç ile oluşturulduğu bilgisi verilmiştir. Uygulanan parametreler Tablo 3.2.' de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. $AlMg_3$ ve DX51D kaynağında kullanılan parametreler

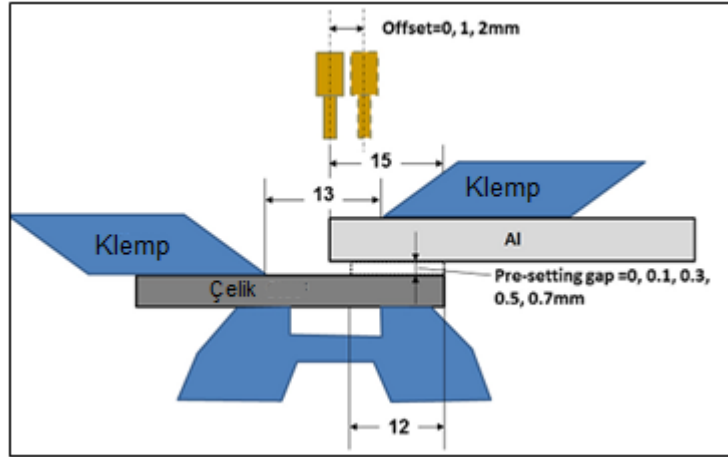
Örnek	Kaynak hızı V (mm/sn)	Kaynak Modu	Kaynak Akımı I (A)	Koruyucu gaz debisi (L/dak)
1	10	CMT	59	10
2	14	CMT	59	16
3	13	CMT	59	16
4	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	CMT	59	16
5	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	CMT	59	16
6	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	CMT	68	16
7	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	SynchroPuls	75	16
8	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	CMT	75	16
9	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	SynchroPuls	75	16
10	11 ⁽¹⁾ -13 ⁽²⁾	CMT ^(*)	78	16

(1)Kaynakların yarı uzunluğu (2)Diğer yarı (3)Osilasyon hareketi

Yang ve diğ. (2013-a) yaptıkları araştırmada 2 mm 6061-T6 alüminyum alaşımı ile 1,2 mm galvanizli karbon çeliğini CMT yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çalışmada 1,2 mm AISi5 dolgu metali kullanarak 16L/dak debi ile %100 argon koruyucu gazı altında

birleştirildiği ve kaynakların 60° torç açısı kullanılarak gerçekleştirildiği bilgisi verilmiştir. Farklı bindirme mesafelerinin' de göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen birleştirmeler sonrası elde edilen mikro ve makroyapılar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.18.).

Kaynak işleminde torç bindirme mesafesi alüminyumun üzerinde 0,1 ve 2 mm olarak ayarlanmış ve metaller arası boşluk seviyeleri 0-0,1-0,3-0,5 ve 0,7 mm olarak değiştirilerek birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

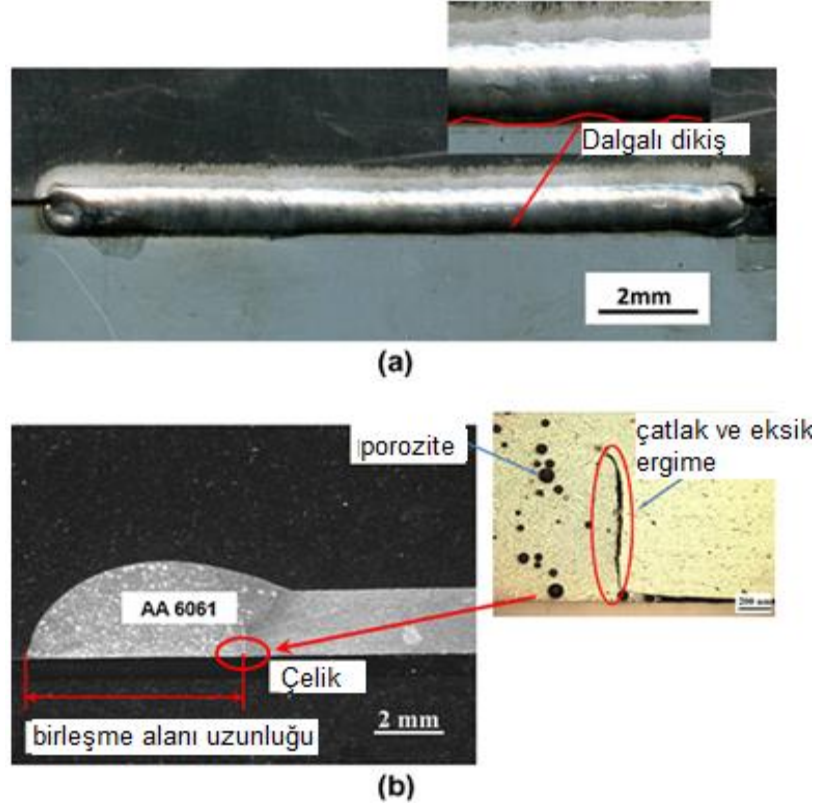


Şekil 3.17. Kaynak konfigürasyonu (Yang ve diğ., 2013-a)

Şekil 3.18.a' da CMT yöntemi kullanıldığı için düzgün bir kaynak dikişi elde edildiği, kaynak sonrası çarpılma gözlenmediği gibi birleştirilen metallerin arka yüzeyinde çinko tabakasının varlığını sürdürdüğü bilgisi verilmiştir. Kaynak dikişinde gözlenen dalgalı yapının ise çinko buharı ile ergiyik dolgu metali damlacıklarının kararlı olmayan etkileşimi sonucu oluşmuş olabileceği öne sürülmüştür. Çinkonun oldukça düşük olan buharlaşma noktası sonucunda (906°C) kaynak işlemi sırasında kısa devre oluşmadan ilk olarak çelik üzerindeki çinko tabakasının buharlaşması sonrasında dolgu metalinden ayrılan damlacık çelik üzerine yüzey gerilimi etkisi ile yayılır. Çinko buharı oldukça kararsızdır ve ortamdan hızlıca uzaklaşmadığından ark' a ve dolgu metalinden gelen damlacığa karşı koyar, bu nedenle ark stabil olmaktan çıkar ve kararsızlaşır. Bu koşullarda ergiyik damlacığın ıslatma davranışı farklıdır bu durum dalgalı kaynak dikişine sebep olur.

Buna ek olarak kaynaklarda genellikle porozite ve çatlaklar ile karşılaşıldığı bilgisi verilmiştir. Şekil 3.18.b' de kırmızı halka ile çevrilen bölgede iki metalin birleşme noktasındaki yetersiz ergime gösterilmiştir. Kaynak bölgesinde oluşan poroziteler ise

alüminyum oksit içinde bulunan katı ve sıvı alüminyum da farklı çözünürlük gösteren hidrojenin kaynaklanabileceği bunun hidrojenin sıvı alüminyum içerisindeki çözünürlüğünün katı alüminyuma göre daha fazla olmasından dolayı gerçekleşebileceği bilgisi verilmiştir (Yang ve diğ., 2013-a).



Şekil 3.18. CMT kaynağının makro ve mikroyapıları (a) üst görünüş ve (b) kesit (kaynak hızı:0,5m/dak, tel besleme hızı:4,4 m/dak, metaller arası boşluk:0 ve torç bindirme mesafesi:0)

Porozite oluşumunun bir diğer sebebinin ise kaynak havuzu içerisinde sıkışabilecek koruyucu gaz veya çinko buharı olabileceği raporlanmıştır. Metallerin birleştiği noktada oluşan yetersiz ergime metaller arasında boşluk bırakılmadan üst üste bindirme sonucu çelik üzerinden buharlaşan çinkonun alüminyum ile birleştirildiği yüzeyden kaçış yeri bulamaması ile açıklanabilir. Çinko buharının bazı durumlarda serbest yüzeyden dahi tamamen uzaklaşmadığı ve kaynak dikişinin çelik tarafında olan birleşim noktasında çinkoca zengin bölgeler oluşturduğu gözlenmiştir (Şekil 3.19.).

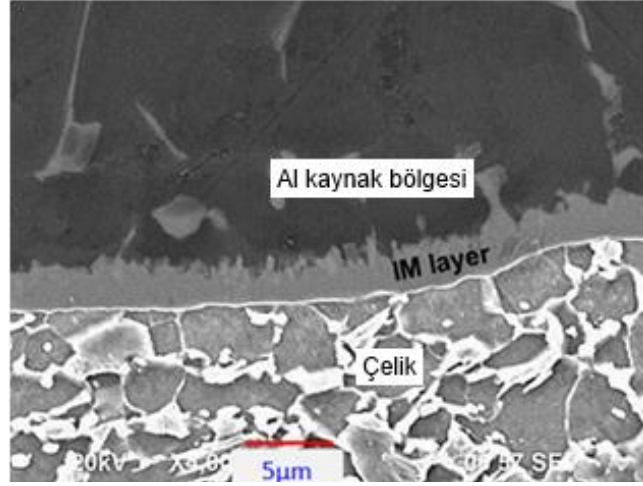


Şekil 3.19. Kaynak metalindeki çinko-zengin bölge

Alüminyum ile galvanizli çeliğin kaynağında genellikle iki farklı sert ve kırılgan çinko-zengin bölge bulunur. Birincisi kaynak dikişinin galvanizli çelik üzerinde kalan kısmında diğeri ise kaynak dikişinin kök kısmındadır (Yang ve diğ., 2013-a; Zhang ve diğ., 2009).

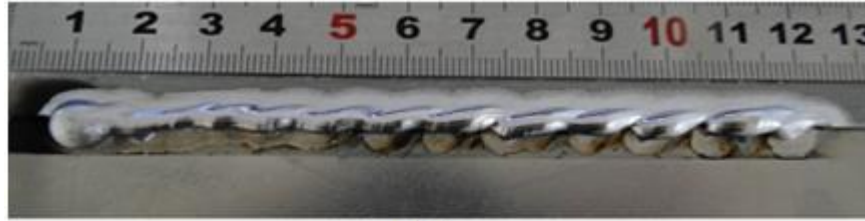
Şekil 3.20.' de görüldüğü gibi intermetalik faz tabakası alüminyum içerisine doğru girintili çıkıntılı bir yapıda oluşmuştur. Arayüzeyde oluşan intermetalik tabaka kalınlığının ortalama 5 μm olarak görünmektedir. CMT yöntemi ile oldukça ince intermetalik tabaka kalınlıklarının elde edilmesi ergiyik dolgu metalinin silisyum içeriği ile sadece alüminyumun intermetalik tabakaya doğru difüzyonunun engellemekle kalmaması aynı zamanda dolgu metalindeki silisyumun intermetalik tabakayı çözmesinden kaynaklandığı bilgisi verilmiştir. 10 μm ' nin altında elde edilen intermetalik tabaka kalınlıkları ile yüksek kaynak dikiş mukavemeti sağlanabildiği yapılan çalışma sonucu raporlanmıştır (Yang ve diğ., 2013-a).

Alüminyumun çeliğe CMT kaynağı sırasında kaynak bölgesinde kalan çinko buharının ve dolgu metalindeki silisyum içeriğinin dolgu metalinin ıslatma kapasitesini artırdığı bilinmektedir (Medgyesi ve diğ., 2011). Şekil 3.21.' de galvaniz tabakası kaldırılmış çelik üzerine CMT yöntemi ile kaynak edilmiş alüminyum 6061-T6 görülmektedir. Resimde de görüldüğü gibi zayıf bir kaynak görülmektedir ve 175° gibi geniş bir ıslatma açısı gözlenmiştir.

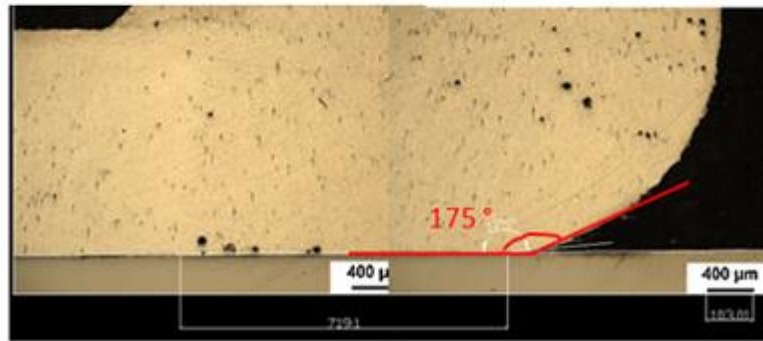


Şekil 3.20. İntermetalik tabakanın SEM görüntüsü

Bu durum da çinkonun ortamda bulunmaması ile kötü bir kaynak dikişi oluştuğu ve düşük ıslatabilirlik nedeniyle dolgu metali ve çelik arasında zayıf bir bağ oluştuğu söylenebilir (Yang ve diğ., 2013-a).



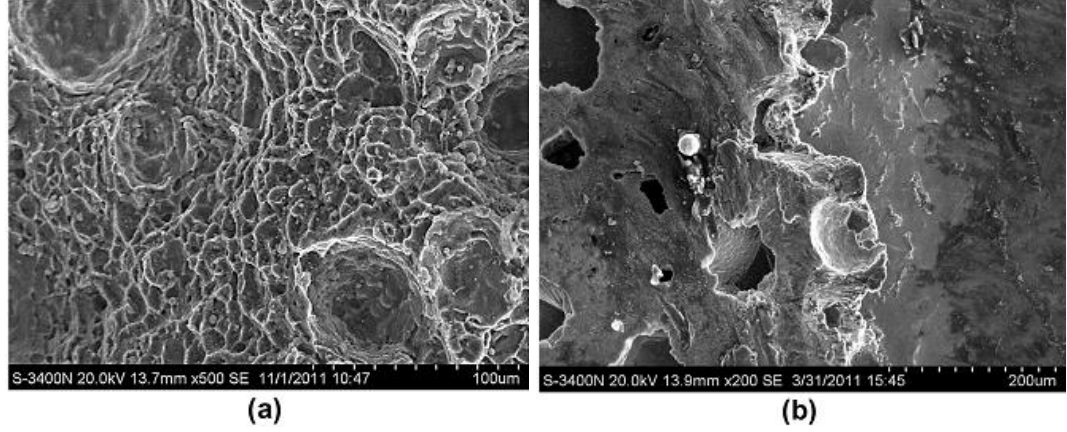
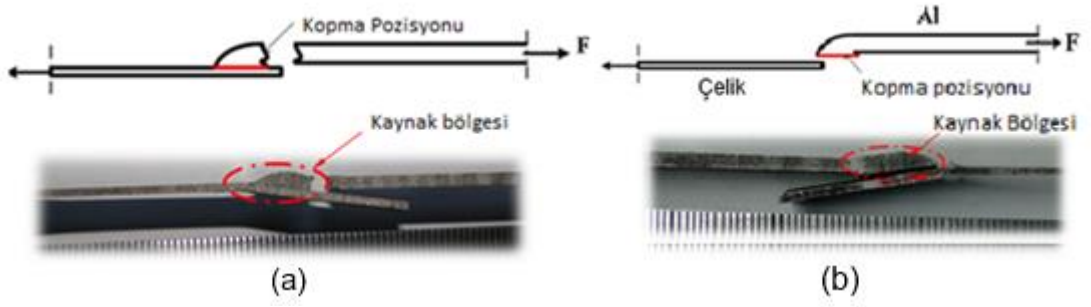
(a)



(b)

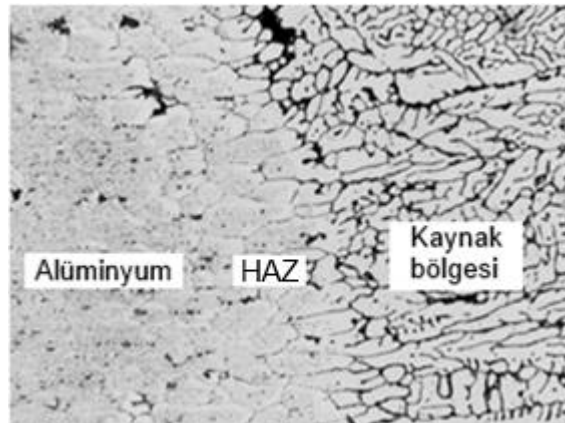
Şekil 3.21. CMT kaynak edilmiş alüminyum ile galvanizsiz karbon çeliği makro ve kesit görüntüsü (a) üst görünüş ve (b) kesit görüntüsü

CMT kaynak edilmiş metallerin hata türlerine bakıldığında ise iki farklı tür ile karşılaşıldığı, bunlardan ilkinin alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesine yakın bölgeden kırılma olduğu ve diğerinin ise alüminyum ile metal arayüzeyinden kırılmanın gerçekleştiği bilgisi verilmiştir (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Hata türleri ve kırılma yüzeyleri. Alüminyum HAZ bölgesinden kırılma (a) ve Alüminyum çelik arayüzeyinden kırılma (b)

Şekil 3.22.a' da görülen ısıdan etkilenmiş bölgeden kırılma, CMT yönteminde karşılaşılabilen eksik ergime veya kaynak kök bölgesinde oluşan poroziteden dolayı çekme kuvveti uygulandığında kaynak dikişinin kökünden başlayarak HAZ (Isıdan etkilenmiş bölge) bölgesine doğru gerçekleşen bir kırılma türüdür. Isıdan etkilenmiş bölgede CMT prosesi sırasında oluşan ısıl çevrimden ötürü kabalaşan taneler ve farklı çökeltilerin çözünerek yok olması bu bölgeyi daha zayıf kılmaktadır. Şekil 3.23.' de ısıdan etkilenmiş bölgedeki tane kabalaşması net bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Isıdan etkilenmiş bölge şematik görünüm

İkinci hata türünün oluşmasını teşvik eden durum alüminyum ile çelik arayüzeyinde oluşan kesme gerilmesidir. İntermetalik tabakanın mukavemeti arttıkça bu hata türünün oluşması bir o kadar azalacaktır (Yang ve diğ., 2013).

Yang ve diğ. (2013) bu çalışmanın sonucunda;

- Proses sırasında oluşan çinko buharının CMT kaynak dikişine olan etkisinin avantaj ve dezavantajlar oluşturduğunu,
- Metaller arasında boşluk bırakarak kaynak işlemi gerçekleştirildiğinde çinko buharından gelen dezavantajların ortadan kaldırılabilceği,
- Mekanik test sonrası iki tür hata oluşumu gözlemlendiği ve bunların alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesindeki yumuşamadan kaynaklanan kopma ve alüminyum çelik arayüzeyinde çinko buharının getirdiği dezavantajlar sonucu oluşan eksik ergime ve porozite gibi hatalardan kaynaklanan kopma olduğu sonuçlarına ulaşmışlar.

Milani ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada 2 mm kalınlığındaki galvanize çelik ile 3 mm kalınlığındaki 5754 alüminyum alaşımı CMT yöntemi ile birleştirmiş, arayüzeyde oluşan intermetalik tabakaları ve çekme testi sonrası kopma yüzeylerini incelemişlerdir. Birleştirme işlemlerini gerçekleştirirken üç farklı dolgu metali ile (AlSi3Mn, AlSi5, AlSi12) ve üç farklı tel besleme hızını birleştirecek metallere uygulayarak deneysel çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. 15 mm bindirme mesafesinde torç normaline 5° lik açı ile yapılan kaynak işlemleri 17 litre/dak argon gazı altında gerçekleştirilmiştir.

Milani ve diğ. (2015) bu çalışmanın sonucunda;

- Dolgu metalindeki silisyum miktarının artırılması ile bağlantının mekanik ve metalürjik özelliklerinin değiştiğini,
- Tel besleme hızının kaynaklı bağlantılarının elde edilmesinde çok önemli bir faktör olduğunu,
- Arayüzeyde oluşan IMC tabakanın kalınlığının hem tel besleme hızına hem de dolgu metaline bağlı olarak değiştiğini ve
- Elde edilen kopma yüzeylerinin iki farklı kırılma modunda gerçekleştiği ve bunların ısıdan etkilenmiş bölgeye yakın bölgeden kopma ve IMC tabakasına yakın bölgeden kopma olduğunu
- En iyi çekme mukavemetinin AlSi3Mn dolgu metali ile elde edildiğini ve bu değerın 188 N/m² olduğu bilgisini vermişlerdir.

3.2. Çalışmanın Amacı ve Planlanması

Alüminyum ve alaşımları ile galvanizli CMT yöntemi ile kaynağında literatürde 1060, 1200, 5183, 6061-T6, 6082 alaşımları düşük karbonlu galvanize ve galvanizsiz çelikler ile farklı yöntem parametreleri ve dolgu metalleri ile çalışılmıştır. Bunun ile birlikte alüminyum-alüminyum, alüminyum-magnezyum, magnezyum-çelik gibi metal çiftleri de CMT yöntemi ile birleştirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Günümüzde otomotiv endüstrisinde gövde de bu alaşımların yapı malzemesi olarak çeliğin yerini alması ile araç gövdeleri hafifletilmeye çalışılmaktadır. AW-5754 alüminyum alaşımı da bu alaşım türlerinden biridir ve özellikle kapı ve direk güçlendirme braketleri olarak otomotiv uygulamaları mevcuttur. Literatür çalışması sonucu bu tür çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Kimyasal birleşimleri ve ısı özellikleri farklı olan bu iki metalin, CMT kaynağı yöntemi ile birleştirilerek ve istatistiksel olarak Taguchi analizi yardımı ile en mukavemetli ve kaliteli kaynak bağlantılarının elde edilmesi için gerekli proses parametrelerinin elde edilmesi, metalürjik analizler ile desteklenerek literatürde bulunan açığın doldurulması amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvar koşullarında uygulanan CMT kaynağının ardından elde edilen alüminyum-çelik bağlantılarının, mekanik özelliklerinin ve bağlantı performanslarının incelenmesi için çekme deneyine tabi tutulması ve çalışma koşullarında maruz kalabilecekleri tekrarlı yüklerin etkisinin incelenmesi için yorulma deneyine tabi tutulması planlanmıştır. Sonrasında kopan yüzeylerden, kırılma yüzeyi incelenmesi, iki metalin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı kaynağı sırasında arayüzeyde oluşan ve bağlantı performansını doğrudan etkileyen intermetalik faz' ın incelenmesi ön planda tutulmuştur. Son olarak kaynak bölge kesitinde Vickers sertlik taraması yapılması planlanmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Genel

Bu çalışmada deney malzemesi olarak EN AW 5754-H111 serisi alüminyum alaşımı ile DX54D+Z galvanize çelik kullanılmıştır. İlk kez gerçekleştirilecek bu kaynak işlemi için iki metalin kaynaklı birleştirilme işlemi Taguchi deney tasarımı yardımı ile belirlenen parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar sonucu L16 deney deseni kullanılarak, daha önce yapılan benzer kaynak işlemlerine ait parametreler yardımı ile kaynaklı birleştirilmelerin yapılması kararlaştırılmıştır. Bu metaller uygun boyutlara getirildikten sonra robotik soğuk metal transferi (Cold Metal Transfer-CMT) yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilmiştir. Toplamda 16 adet deney gerçekleştirilmiş olup, kaynak işleminden sonra elde edilen tüm bağlantılar görsel incelemeye tabi tutulmuş ve bağlantıların mukavemet değerlerini saptamak, aynı zamanda Taguchi analizini gerçekleştirmek amacı ile standarda uygun çıkarılan numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Kaynak bağlantıları ve kopma yüzeyleri optik mikroskop ve SEM ile incelenmiş, EDX analizi yapılmıştır. Bağlantıların yorulma performansını incelemek amacı ile eğmeli yorulma testi gerçekleştirilmiş, son olarak kaynak bölgesinin mikro yapısal ve sertlik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

4.2. Deney Malzemesi

Bu çalışmada 1 mm kalınlığında EN AW 5754-H111 serisi alüminyum alaşımı ve 0,75 mm kalınlığında DX54D+Z galvanize çelik kullanılmıştır. Bu iki metalin kimyasal bileşimi Tablo 4.1.' de ve mekanik özellikleri Tablo 4.2.' de gösterilmiştir.

4.3. Deney Parçalarının Boyutları ve Deney Düzeneği

Belirlenen L16 deney düzeneği doğrultusunda 16 adet farklı parametre kombinasyonunda kaynak edilecek parçalar EN 288-4 standardına göre saptanmıştır. Şekil 4.1. 1 mm kalınlığında EN-AW 5754-H111 ve 0,75 mm kalınlığındaki DX54D+Z galvanizli çelik 150x480 mm en boy oranında kesilmiştir.

Tablo 4.1. Deneyde malzemelerine ait kimyasal kompozisyonlar

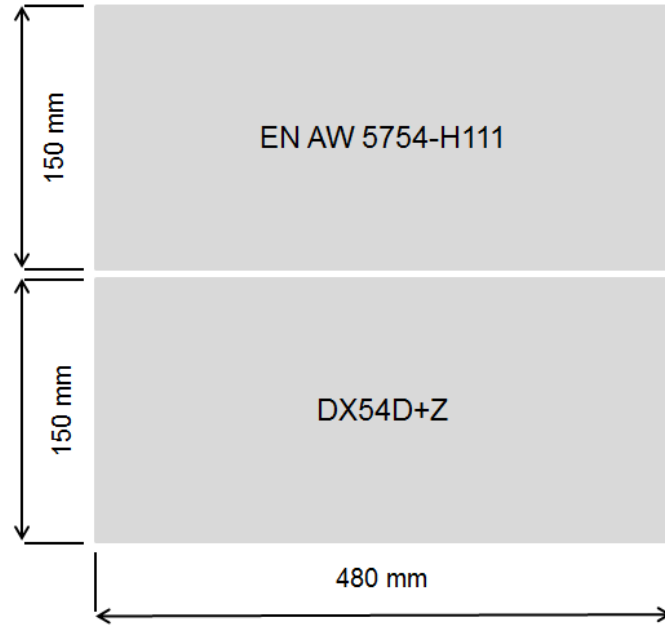
Alaşım	Alüminyum Kimyasal Bileşim (Analiz Sonucu)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V
EN AW 5754	0,16	0,28	0,034	0,15	3,53	0,01	0,008	0,10	0,016	0,01	0,016
Çelik Kimyasal Bileşim (Analiz Sonucu)											
	C	Si	Mn	P	S	Ti					
DX54D+Z	0,05	0,005	0,116	0,01	0,01	0,07					

*Kimyasal analizler OES ile yapılmıştır.

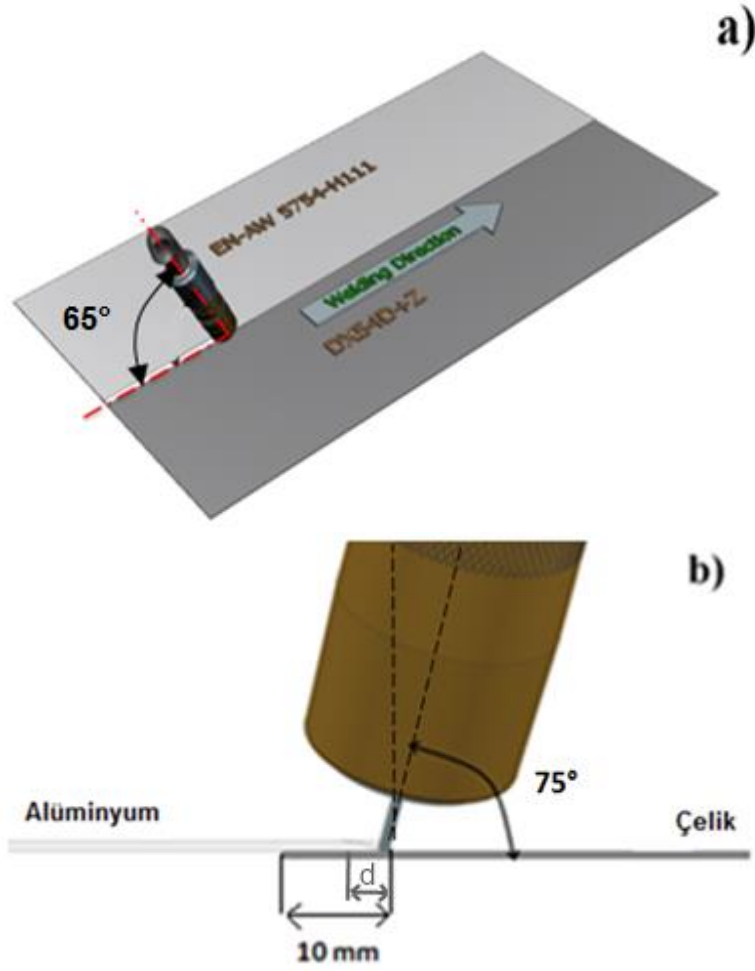
Tablo 4.2. Deney malzemelerinin mekanik özellikleri

EN AW 5754	Akma Mukavemeti (min-max) (Rp0.2) MPa	Çekme Mukavemeti (Rm) MPa	Uzama %50 (min)	Sertlik HV
Standart	80-100	190-215	24	-
Analiz sonucu	90	210	21	82
DX54D+Z				
Standart	120-220	260-350	>34	-
Analiz sonucu	144	270	36	118

Kaynak yapılacak sac parçalara kaynak öncesinde yüzeyinde bulunan ve kaynak işlemini etkileyecek yağ ve kir tabakasını gidermek için aseton ile temizlenmiş, 10 mm bindirme mesafesinde birbiri üzerine yerleştirilerek fikstür üzerine sıkıca sabitlenmiştir. Deney düzeneği, kaynak yönü ve işlem sırasında kullanılan torç açıları ile birlikte Şekil 4.2.' de gösterilmiştir. Yapılan denemeler sonucu ve literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda torç, kaynak dikişi ile 65°, torç normali ile 15° açu yapacak konumda kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Kaynak edilecek parçaların boyutları



Şekil 4.2. Deney düzeneği ve kaynak torç açıları şematik gösterimi

4.4. Robotik CMT Kaynak İşleminin Yapılışı

Standartlara göre hazırlanan levhalar, Fronius İstanbul Elektronik Ticaret ve Servis Ltd. Şti.' de Şekil 4.2. de gösterilen şekilde ve ön hazırlıklar yapılarak 15L/dak gaz debisinde 99.99 ticari saflıkta argon koruyucu gaz atmosferi altında 1.2 mm AISi3Mn (CMT yöntemi için geliştirilmiş özel modifiye tel) dolgu metali kullanılarak robotik soğuk metal transferi yöntemi ile bindirme kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 4.3. Kaynak sonrası elde örnek grubundan 3 no' lu sacların kaynaklı görüntüsü Şekil 4.4.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Sinerjik robotik CMT kaynağının uygulanması



Şekil 4.4. Robotik CMT kaynağı sonrası kaynak dikişinin görünüşü

4.5. Robotik CMT Kaynak Yönteminde Kullanılan Parametreler

Yapılan literatür araştırmaları ve denemeler sonucu üç farklı değişken belirlenmiş olup, bu değişkenler elektrot tel besleme hızı, kaynak hızı ve elektrot besleme mesafesidir. Elektrot tel besleme mesafesi (torch deviation distance), Şekil 4.2.' de "d" ile gösterilmiş olup, torç' un alüminyum üzerindeki konumunu belirtmektedir. Tablo 4.3.' te bu üç faktör (değişkenler) ve dört farklı seviyenin bulunduğu L16 deney tasarımı gösterilmiştir. Bu tasarım ile düz soğuk metal transferi (CMT) yöntemi için toplamda 16 kaynaklı birleştirme yapılmıştır. Bu robotik kaynak birleştirmeleri ile ilgili araştırma ve denemeler sonrası teknolojik sınırlar içerisinde belirlenen parametreler Tablo 4.4.' de gösterilmiştir. Her kolonda yer alan 1,2,3,4 için karşılığına belirlenen değerler yerleştirilerek gerçekteştirilmesi hedeflenen deney koşulları oluşturulmuştur.

Oluşturulan plan dâhilinde yapılan kaynaklı bağlantıların kopma mukavemet değerleri temel alınarak Taguchi analizi ile parametre optimizasyonu minitab programı kullanılarak gerçekteştirilmiştir. Bu çalışmada Taguchi deney tasarımının kullanılmasının amacı daha az deney sayısı ve düşük maliyet ile zaman kaybını minimuma indirerek optimum sonuca ulaşılmasına imkan sağlamasıdır.

Tablo 4.3. L16 Deney deseni

	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

Tablo 4.4. Robotik CMT kaynak yönteminde kullanılan parametreler

	1	2	3	4
A-Tel Besleme Hızı (m/dak)	3	4	5	5,5
B-Kaynak Hızı (mm/s)	8	10	13	16
C-Elektrod Besleme Mesafesi (mm)	0	0,5	1	2

4.6. Deney Numunelerinin Hazırlanma Esasları

Kaynak edilmiş saclardan çıkarılacak çekme, yorulma ve metalografik inceleme, sertlik numuneleri belirli sistematik dâhilinde kodlanmıştır. Bu kodlama sistemi aşağıdaki gibidir.

T- Çekme Numunesi

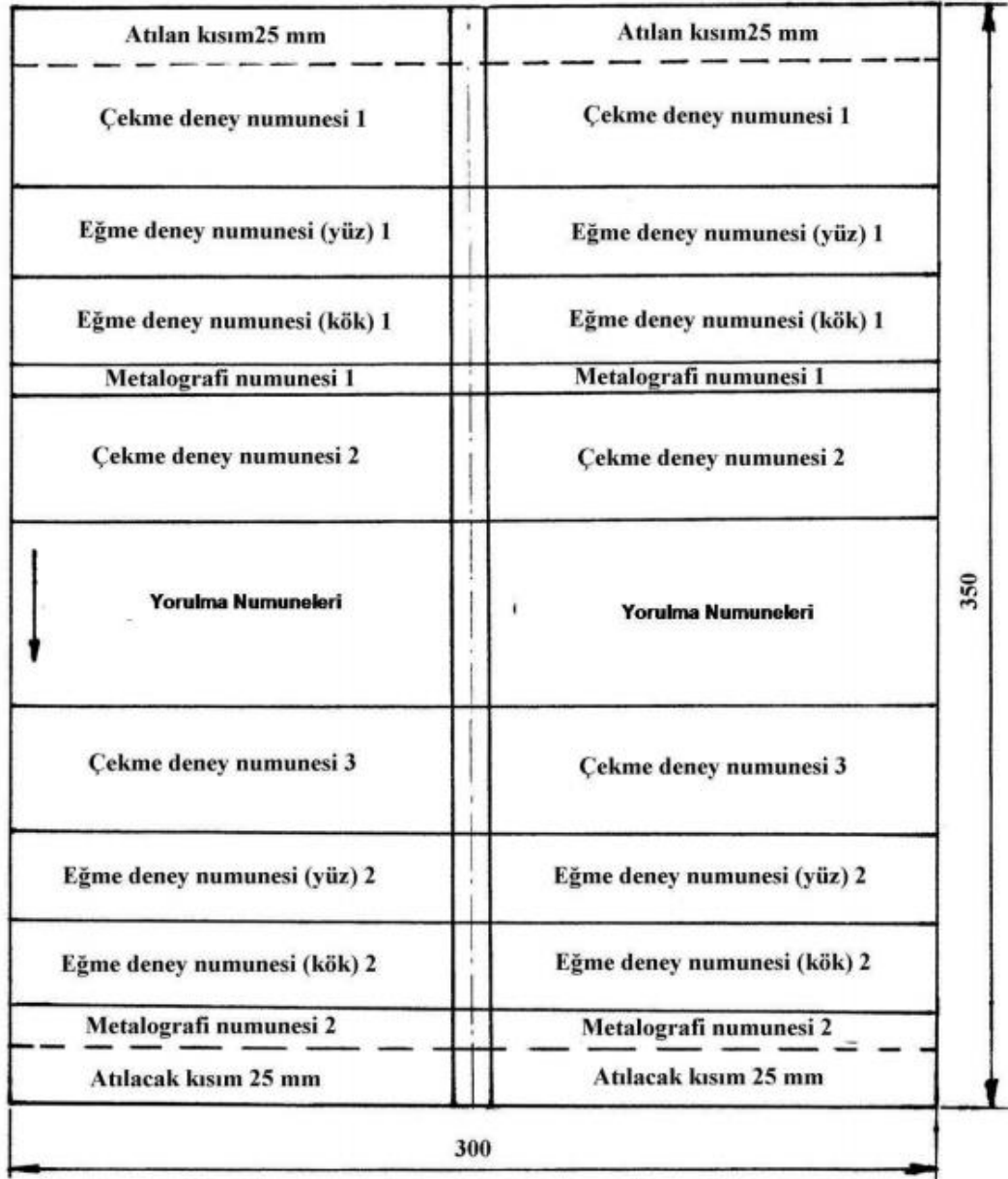
F- Yorulma Deneyi

Met: Metalografik inceleme

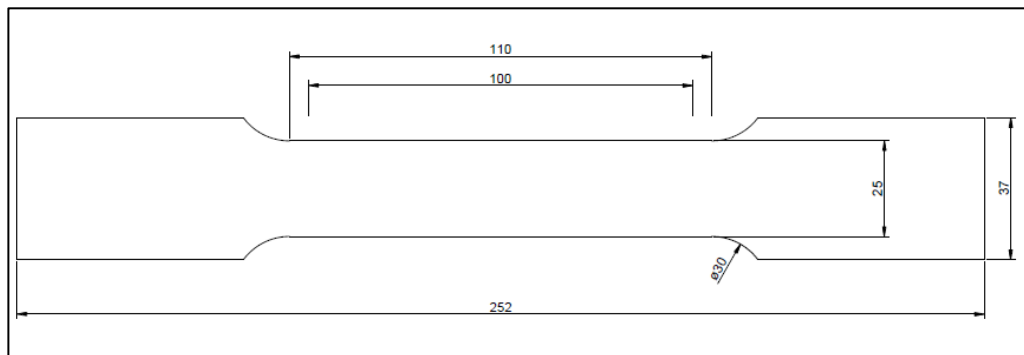
Metalografi incelemesi için her örnekten 2 şer adet, çekme testi için her örnekten 3 adet olmak üzere toplamda 48 çekme çubuğu ve yorulma deneyi için her örnekten 8 adet olmak üzere toplamda 128 adet numune çıkarılması planlanmıştır.

4.6.1. Çekme deney numunelerinin çıkarılması

Deney numuneleri, kaynaklı saclardan EN288-4 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 Şekil 4.4.' de de açık bir biçimde görüldüğü gibi kaynak işlemi sırasında uygun olmayan kaynak dikişi oluşumu gözlemlendiği için ve standart gereği kesilerek atılmış, böylece başlangıç ve bitişteki kaynak hataları ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Şekil 4.5. Sac parçalardan çekme numuneleri hidrolik makas yardımı ile kesilerek çıkartılmış ve Şekil 4.6. da gösterilen EN ISO 4136:2012 standart ölçülere göre freze tezgahı ile son haline getirilmiştir.



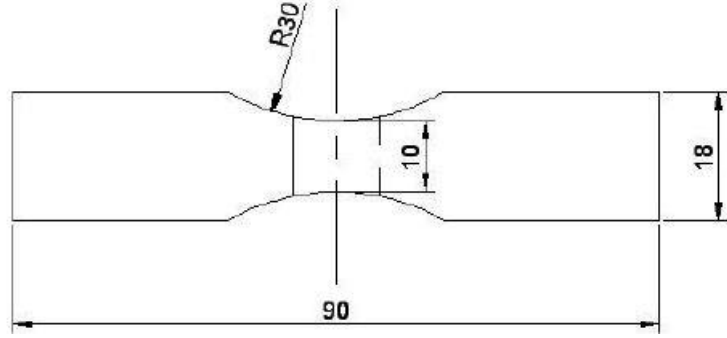
Şekil 4.5. TS EN 288-4' e göre kaynaklı levhalardaki numune dağılım planı



Şekil 4.6. EN ISO 4126:2012 standart test numunesi boyutları

4.6.2. Yorulma deney numunelerinin çıkarılması

Kaynaklı saclardan, belirlenen plana göre kaynak yöntemi ve test makinesi karakterine uyacak şekilde, esas metaller DIN 50 142' ye uygun olarak hidrolik makas ile kesilerek çıkarılmıştır. Sonrasında freze ile Şekil 4.7.' deki ölçülerde işlenerek numuneler hazırlanmıştır. Otomotiv alalında kullanıldığı varsayılarak ve sac kalınlıklarının 1 mm ve altında olduğu için dikiş taşkınlıkları taşlanmadan eğmeli yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Yorulma deney numune ölçüleri

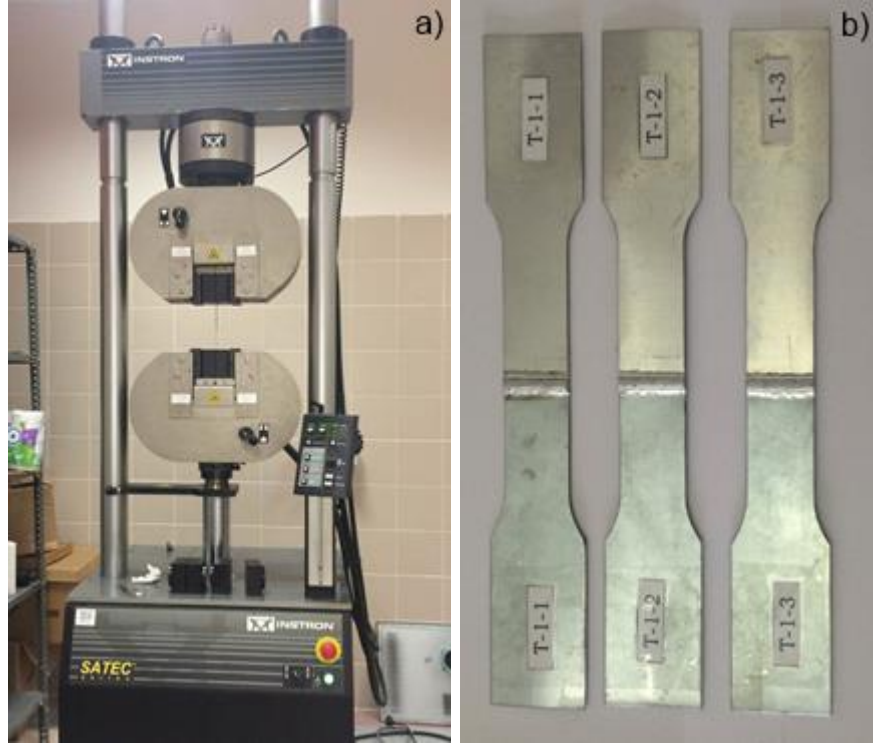
4.6.3. Metalografi incelemeleri ve sertlik taraması için numune hazırlanması

Kaynaklı saclardan belirlenen plan doğrultusunda çıkarılan parçalar proje kapsamında Tübitak MAM, Metalografi ve Hasar Analizi Laboratuvarından alınan hizmet ile özel aparat ve yöntemlerle 10x60 mm boyutlarında mekanik olarak kesilerek çıkarılan metalografik inceleme numuneleri, daha sonra metalografik görüntüleme için bakalit içine alınarak zımpara ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur.

4.7. Deneylerin Yapılışı

4.7.1. Çekme deneyleri

Çekme deneyleri proje kapsamında Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde INSTRON çekme deneyi cihazı ile 3 mm/dak çekme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve tüm sonuçlar bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. (Şekil 4.8.)



Şekil 4.8. (a) INSTRON çekme test makinası, (b) çekme test numuneleri

4.7.2. Yorulma deneyleri

Yorulma deneyleri, proje kapsamında Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi laboratuvarlarında eğmeli yorulma cihazında malzemelerin akma mukavemetine göre saptanan yorulma değerleri uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 4.9. (a) Eğmeli yorulma makinası ve (b) yorulma numunesi



Şekil 4.10.(Devam) (a) Eğmeli yorulma makinası ve (b) yorulma numunesi

4.7.3. Metalografik inceleme

Tüm kaynaklı çelik-alüminyum sac bağlantılarından en gerçekçi sonuçları almak amacı ile metalografik deney numuneleri genel yapıyı temsil edebilecek şekilde seçilmiştir. Kesilerek hazırlanan numuneler sıcak bakalıte alma cihazında bakalıte alınmıştır. Alüminyum' un metalografik olarak hazırlanmasının güç olması ve özel aparatlar gerektirmesi nedeni ile işlemler proje kapsamında TÜBİTAK MAM Metalografi ve Hasar Analizi Laboratuvarından alınan hizmet ile özel aparat ve yöntemlerle hazırlanmıştır. Daha sonra numunelere kademeli olarak zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmış ve Keller ayracı ile dağlanmış. Daha sonra makro ve mikro yapı incelemeleri ile alüminyum-çelik arayüzeyinde oluşan intermetalik tabakaya ait incelemeler ve ölçümler TÜBİTAK MAM' da optik mikroskop ve yine proje kapsamında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde' SEM (Scanning Electron Microscope) cihazı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

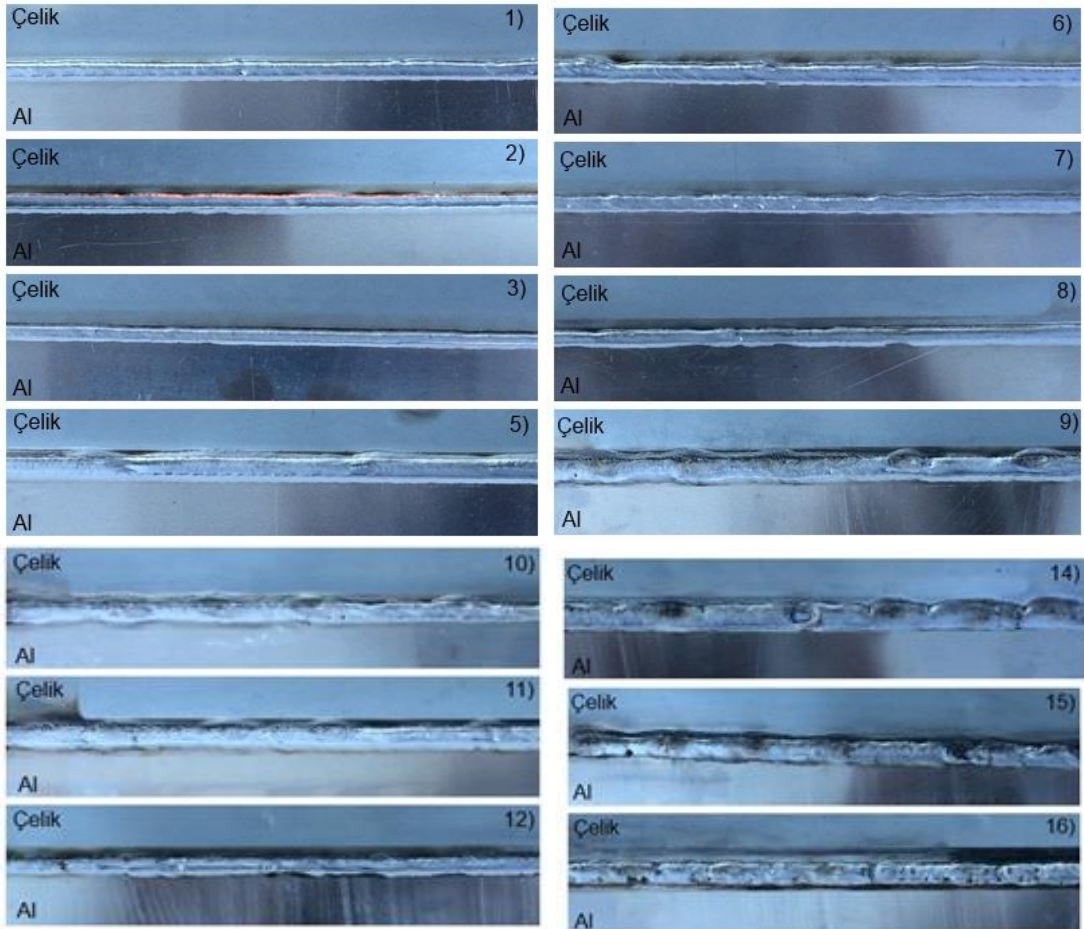
4.7.4. Vickers sertlik taraması

Tüm bağlantılardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Malzemesi Laboratuvarında mikrosertlik ölçüm test cihazı kullanılarak 0,5 kg yük altında 15 süre ile her bir numune üzerinden toplam 7 adet olmak üzere sertlik taraması gerçekleştirilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ

5.1. Görsel İnceleme Sonuçları

Deneysel olarak kullanılacak olan numunelerin, kaliteli kaynak bölgelerinden seçilmesini amaçlayan ve tüm kaynaklı saclar üzerinde kaynak sonrası görsel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Değişken olarak kullanılan parametrelere bağlı olarak her bir deneyde elde edilen kaynak dikişi kalitesi, görüntüsü farklılık göstermiştir. Sürekli, düzgün ve sıçrantsız kaynak dikişlerinin yanı sıra, süreksiz dalgalı yüksek kaynak akımından kaynaklanan hataların olduğu kaynak dikişine sahip parçalar da elde edilmiştir. Ayrıca 4 ve 13 numaralı sac parçaları belirlenen parametreler ile birleştirilememiştir. Şekil 5.1.' de tüm örnek gruplarına ait kaynak dikişi görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.1. CMT kaynaklı 14 numuneye ait kaynak dikişi görüntüleri

5.2. Çekme Deneyi Sonuçları

Esas metallerin çekme deneyi kopma biçimleri Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.' te gösterilmiştir. Çekme testleri sonucu elde edilen ortalama kopma mukavemet değerleri (kN), kaynak parametreleri ve ısı girdisi değerleri Tablo 5.1.' de gösterilmiştir. Isı girdisi, $J=(60 \times UI)/v$ formülü kullanılarak hesaplanmış olup, U=ortalama kaynak voltajı, I ortalama kaynak akımı, v (cm/dak) ise kaynak hızını temsil etmektedir.



Şekil 5.2. EN AW 5754-H111 çekme testi numunesi



Şekil 5.3. DX54D+Z Galvanize çelik çekme testi numunesi

Ana metallere ait çekme testi sonuçları 0,7 mm DX54D+Z galvanize çelik için 270 MPa iken 1 mm 5754-H111 alüminyum alaşımı için bu değer 210 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.1. Çekme testi sonrası L16 deney deseni üzerindeki kaynak parametreler, elde edilen ortalama yük değeri ve ısı girdisi

	A (m/dak)	B (mm/s)	C (mm)	Voltaj	Amper	Yük (kN)	kJ cm^{-1}
T1	3	8	0	11,1	47	3,72	0,65
T2	3	10	0,5	11,1	47	4,17	0,52
T3	3	13	1	11,1	47	4,35	0,40
T4	3	16	2	11,1	47	0*	0,33
T5	4	8	0,5	12	69	4,07	1,04
T6	4	10	0	12	69	3,07	0,83

Tablo 5.1.(Devam) Çekme testi sonrası L16 deney deseni üzerindeki kaynak parametreler, elde edilen ortalama yük değeri ve ısı girdisi

T7	4	13	2	12	69	2,69	0,64
T8	4	16	1	12	69	3,52	0,52
T9	5	8	1	12,6	85	2,87	1,34
T10	5	10	2	12,6	85	2,68	1,07
T11	5	13	0	12,6	85	2,20	0,82
T12	5	16	0,5	12,6	85	3,26	0,67
T13	5,5	8	2	13,6	113	0*	1,92
T14	5,5	10	1	13,6	113	2,96	1,54
T15	5,5	13	0,5	13,6	113	0,00	1,18
T16	5,5	16	0	13,6	113	2,06	0,96

Bu tabloda Tablo 4.5.' te gösterildiği gibi A: Tel besleme hızı, B:Kaynak hızı ve C: elektrot besleme mesafesi olarak gösterilmektedir. Tablo 4.4.' te bulunan L16 deney tasarımına yerleştirilen parametreler ile oluşturulmuş kaynaklı bağlantılardan elde edilen çekme test numuneleri teste tabi tutularak ortalama yük (kN) değerleri hesaplanmış bununla birlikte kaynak işlemi sırasında oluşan teorik ısı girdisi değeri kJ cm^{-1} değeri ile gösterilmiştir. Elde edilen ortalama yük değerleri göz önüne alındığında en yüksek kopma mukavemeti değeri T3 numaralı metal çiftinde 4,35 kN değeri ile elde edilmiştir. Elde edilen en düşük kopma mukavemeti değeri ise T16 numaralı metal çiftinde olup 2,06 kN olarak hesaplanmıştır. Kaynaklı sacların performansı incelendiğinde bağlantı çekme mukavemetinin çelik numunenin çekme mukavemetine oranının %85, alüminyumun çekme mukavemetine oranının ise %76 olduğu gözlenmiştir. Bu da elde edilen bağlantının ana metallerin mukavemetine oranla oldukça iyi değerlere çıkabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte T4 ve T13 örnek grubunun uygun bir şekilde birleştirilememesi, tel besleme hızı ve kaynak hızı arasındaki ilişkiden kaynaklandığı rahatlıkla söylenebilir. Örneğin 4 numaralı numunede 3 m/dak tel besleme hızı 13 mm/s kaynak hızı için yavaş kalmakta ve hızla ilerleyen torç ile birleşme yüzeyine yeterli elektrot transferinin sağlanmadığı gözlenmiştir. 13 numaralı örnekte bu durumun tam tersi görülmüş olup, kaynak hızı 8 mm/s, tel besleme hızına 5,5 m/dak oranla yavaş olduğu için birim alana transfer edilen elektrot miktarı fazla olduğundan uygun birleştirme oluşmamıştır.

5.3. Parametre Optimizasyonu ve Elde Edilen Sonuçlar

Gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerdeki kopma mukavemet değeri temel alınarak Minitab programı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.2.' de proses parametrelerine ait dereceler gösterilmektedir. Minitab programı önyüz görüntüsü

Şekil 5.4.' de gösterilmektedir. Delta değeri, farklı parametrelerdeki maksimum ve minimum pik yükü olarak hesaplanmıştır. Parametrenin derecesi, elde edilen çıktıya olan etkisini göstermektedir. Görüldüğü üzere, kullanılan parametreler arasında en etkili olanının; tel besleme hızı ikinci olarak elektrot besleme mesafesi ve son olarak kaynak hızı olduğu analiz sonrasında elde edilmiştir (Tablo 5.2.) Proses parametrelerinin istatistiksel önemini belirlemek için, varyans' ın istatistiksel analizi de gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.3.' de görüldüğü gibi tel besleme hızı %59,7 ile en etkili proses parametresi olarak belirlenmiştir. Sonrasında %20,6 ile elektrot besleme mesafesi ve son olarak parametreler arasında diğerlerine oranla en az etkiyi % 6,5 ile kaynak hızı değeri göstermektedir.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Kaynak Hızı (mm/s)	Elektrod Besleme Mesafesi (mm)					
1	3,0	8	0,0	4049,19	3539,52	3566,99		
2	3,0	10	0,5	3453,71	4252,16	4812,18		
3	3,0	13	1,0	3934,62	4544,82	4572,12		
4	3,0	16	2,0	0,00	0,00	0,00		
5	4,0	8	0,5	3518,47	3932,63	4767,14		
6	4,0	10	0,0	2472,61	3018,68	3724,80		
7	4,0	13	2,0	0,00	4011,96	4065,96		
8	4,0	16	1,0	3421,72	3197,18	3950,98		
9	5,0	8	1,0	2934,18	0,00	2797,54		
10	5,0	10	2,0	2776,47	0,00	2586,54		
11	5,0	13	0,0	0,00	2554,40	1854,36		
12	5,0	16	0,5	2622,68	0,00	3905,12		
13	5,5	8	2,0	0,00	0,00	0,00		
14	5,5	10	1,0	0,00	0,00	2955,47		
15	5,5	13	0,5	0,00	0,00	0,00		
16	5,5	16	0,0	2546,00	1567,63	0,00		
17								

Şekil 5.4. Minitab programı önyüz görüntüsü

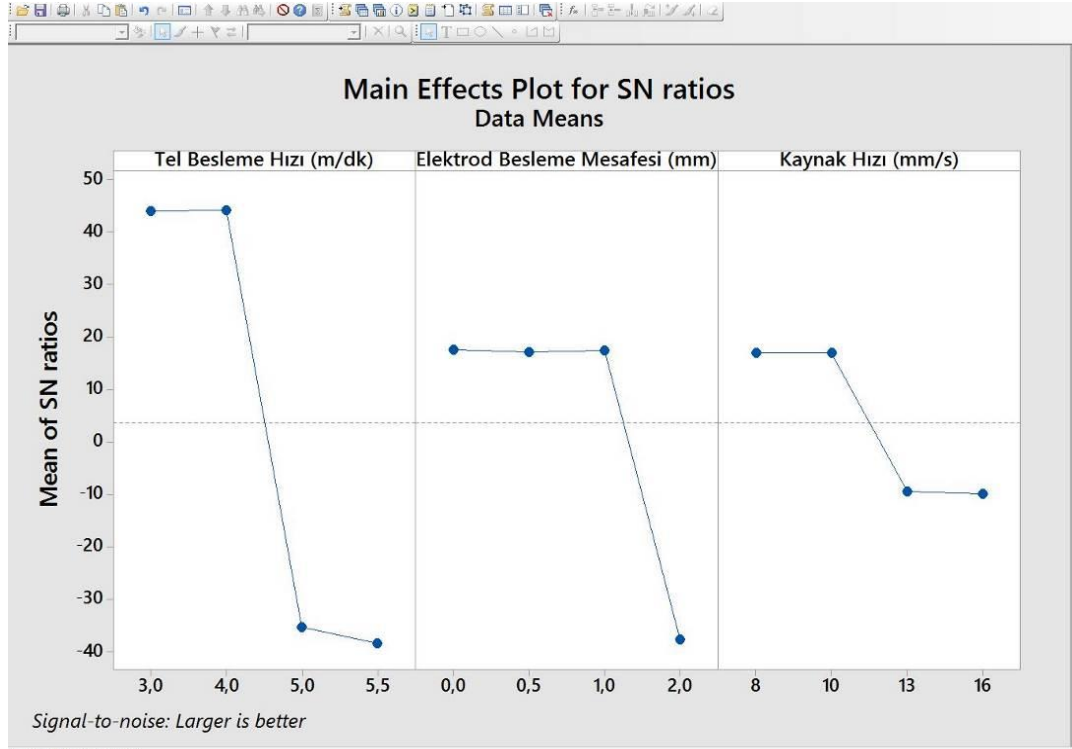
Tablo 5.2. Parametrelere ait dereceler

No	Tel Besleme Hızı (m/dk)	Elektrod Besl. Mes. (mm)	Kaynak hızı (mm/s)
Delta	82,616	55,187	26,936
Derece	1	2	3

Tablo 5.3.Sinyal gürültü oranı için varyans analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	%
Tel besleme hızı(m/dak)	3	26323	26232	8744	8,87	0,013	59,7
Elektrod besleme mesafesi (mm)	3	9094	9094	3031,2	3,07	0,112	20,6
Kaynak hızı (mm/s)	3	2851	2851	950,5	0,96	0,469	6,5
Artık hatası	6	5917	5917	986,2			
Toplam	15	44094					

Taguchi analizi sonucu bulunan sinyal/gürültü oranı için daha büyük-daha iyi kalite karakteristiği baz alınarak yapılan analizde sinyal gürültü oranı faktör etkilerinin grafik gösterimi Şekil 5.5.' te yer almaktadır. Buradan tel besleme hızındaki 3-4 m/dak aralığında en yüksek sinyal gürültü oranının elde edildiği açık şekilde görülmektedir. Elektrot besleme mesafesinde 0 ile 1 mm arasında S/N oranında kayda değer bir değişim gözlenmezken 2 mm elektrot besleme mesafesinde ise en düşük S/N oranı göze çarpmaktadır. Kaynak hızı için ise 8 ve 10 mm/s değerlerinde yüksek S/N oranı elde edildiği gözlenmiştir.

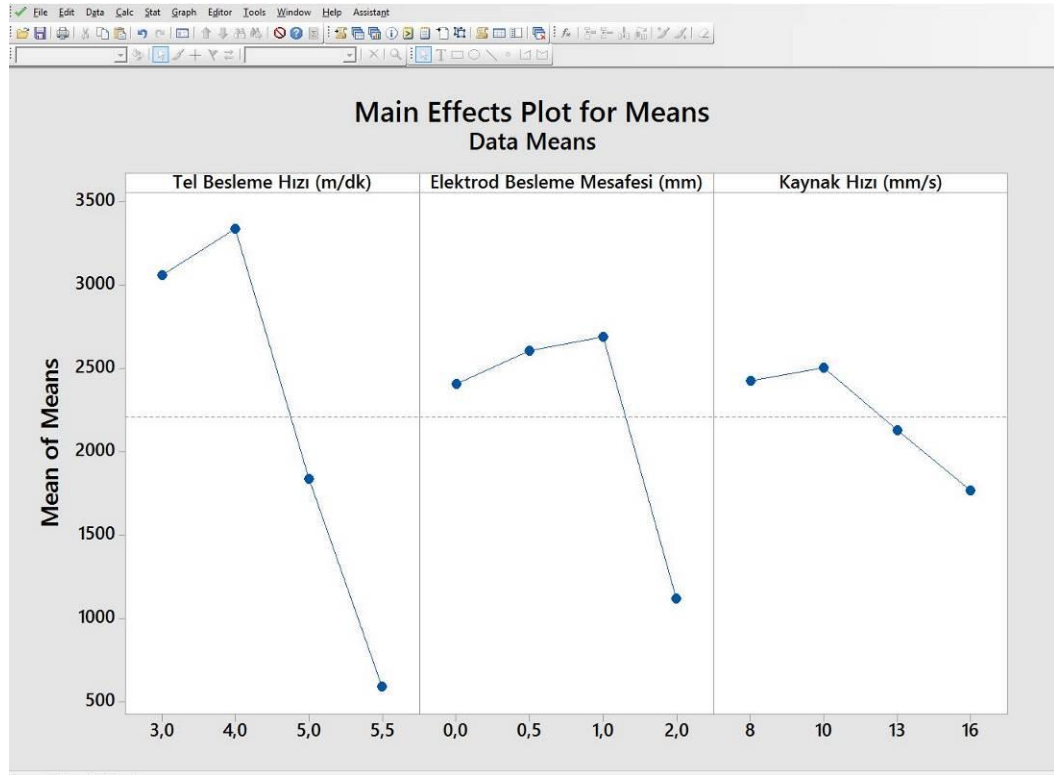


Şekil 5.5. S/N için faktör eğrilerinin grafiksel gösterimi

Aynı zamanda faktör etkilerinin ortalamaya göre analizi de yapılmıştır. Ortalama için faktör etkilerinin grafiksel gösterimi' de Şekil 5.6.' da gösterilmiştir. Tel besleme

hızındaki artış 4m/dak ya ulaşana kadar olumlu etki gösterirken, 4m/dak dan sonra eğri keskin bir şekilde düşüş göstermektedir. Elektrot besleme mesafesinde de bu durum 1 mm' ye kadar aynı şekilde gözlenmektedir. Kaynak hızında 10 mm/s den sonra düşüş gözlenmektedir.

Taguchi analizi sonucunda 3-4 m/dak tel besleme hızı aralığında, 0-1mm elektrot besleme mesafesi ve 8-10 mm/s kaynak hızında en iyi kaynak bağlantılarının elde edildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu aşamanın ardından kaynak bağlantıları arasından seçilen numuneler ilk olarak optik ışık mikroskobu (LOM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir. Isı girdisine bağlı olarak iki metal arasında oluşan ortalama intermetalik faz tabaka kalınlığı ölçülmüş olup, EDX analizi ile oluşan faz ve geçiş bölgeleri incelenmiştir. Eğmeli yorulma ve mikrosertlik analizleri gerçekleştirilerek Taguchi analizi sonucu elde edilen değerler arasındaki ilişki yorumlanmıştır.

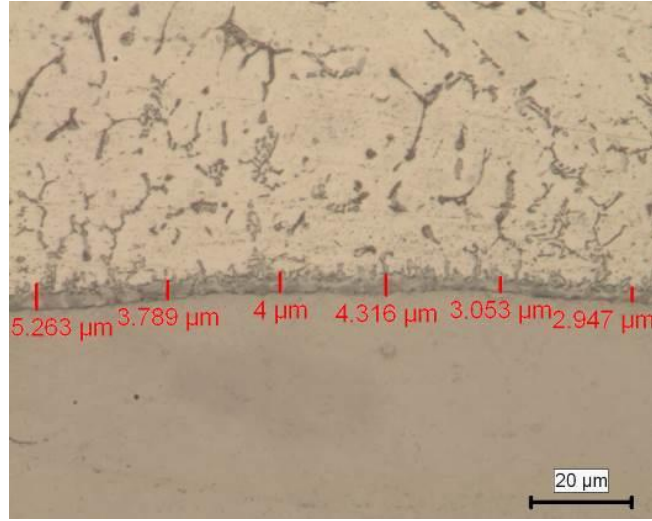


Şekil 5.6. Ortalamalar için faktör etkilerinin grafiksel gösterimi

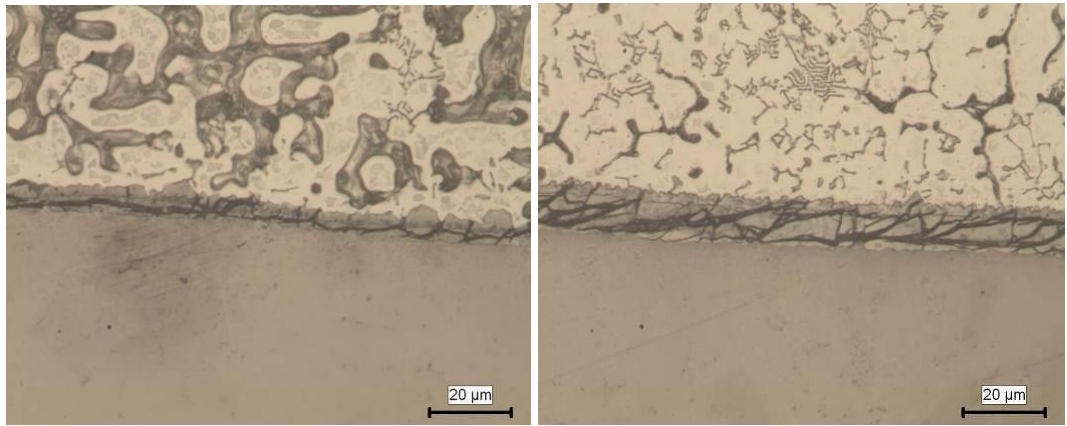
5.4. Metalografik İnceleme Sonuçları

Dağlama sonrası optik ışık mikroskobu yardımı ile 500x büyütmede alüminyum ile çelik arayüzeyinde oluşan intermetalik faz (IMC) kalınlığı, ölçüm yazılımı kullanılarak ve her numuneden ortalama altı adet ölçüm alınarak tamamlanmıştır. Şekil 5.7.' de

1 no'lu numune çelik-alüminyum arayüzeyinden alınan görüntü ve IMC kalınlık değerleri gösterilmektedir. Ortalama 3,89 μm kalınlığında intermetalik tabakanın arayüzeyde alüminyum kaynak metaline doğru olacak şekilde oluştuğu gözlenmiştir. Bu numuneye ait ısı girdisi değeri $0,65 \text{ kJ cm}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Isı girdisinin diğer örnek gruplarına göre yüksek ve $1,34 \text{ kJ cm}^{-1}$ olduğu 9 no' lu numune arayüzeyinde oluşan kalın ve gevrek intermetalik faz üzerinde çatlaklar gözlenmiş olup Şekil 5.8. de gösterilmektedir. 9 no'lu bu numune 1 no'lu numune ile karşılaştırıldığında iki numune arasında yaklaşık olarak iki katı değerinde yüksek ısı girdisine sahip olduğu görülmektedir. EDX analizi sonucu arayüzeyde oluşan çatlağın ısı girdisine bağlı olarak iki metal arayüzeyinde oluşan ağırlıkça alüminyumca zengin (%66 Al) gevrek faz oluşumu ile açıklanabilir.



Şekil 5.7. 1 no'lu numune arayüzeyi 500x. Ortalama $3,89\mu\text{m}$ IMC. Isı girdisi $0,65 \text{ kJ cm}^{-1}$

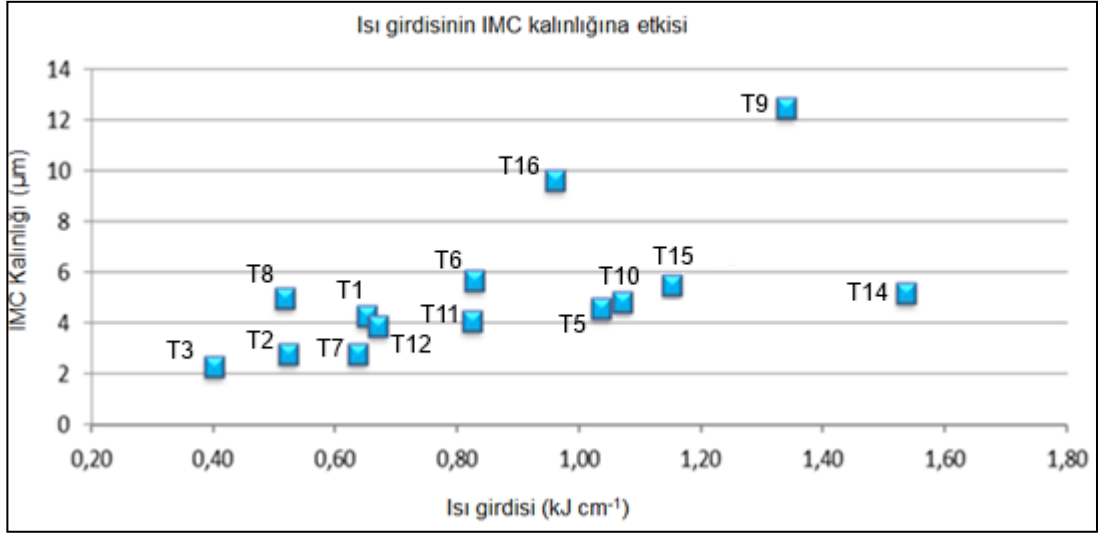


Şekil 5.8. 9 no'lu numune arayüzey görüntüsü 500x. Isı girdisi $1,34 \text{ kJ cm}^{-1}$

Tablo 5.4.' de elde edilen tüm kaynak bağlantıları için hesaplanan ortalama intermetalik faz tabaka kalınlığı ve ilgili numunelere ait ısı girdisi değerleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi artan ısı girdisi değeri ile alüminyum ile çelik arayüzeyinde oluşan intermetalik faz ortalama kalınlığı kısmen artış göstermektedir. 9 numaralı numunede elde edilen ortalama kalınlık değeri, çatlak oluşumundan dolayı gerçekte elde edilen değerden bir miktar sapma göstermektedir. Isı girdisine bağlı olarak elde edilen kaynaklı bağlantı arayüzeylerinde oluşan IMC tabaka kalınlığı Şekil 5.9.' da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu duruma bağlı olarak oluşan IMC tabakasının ise bağlantı mukavemetine olan etkisi Şekil 5.10.' da gösterilmiştir.

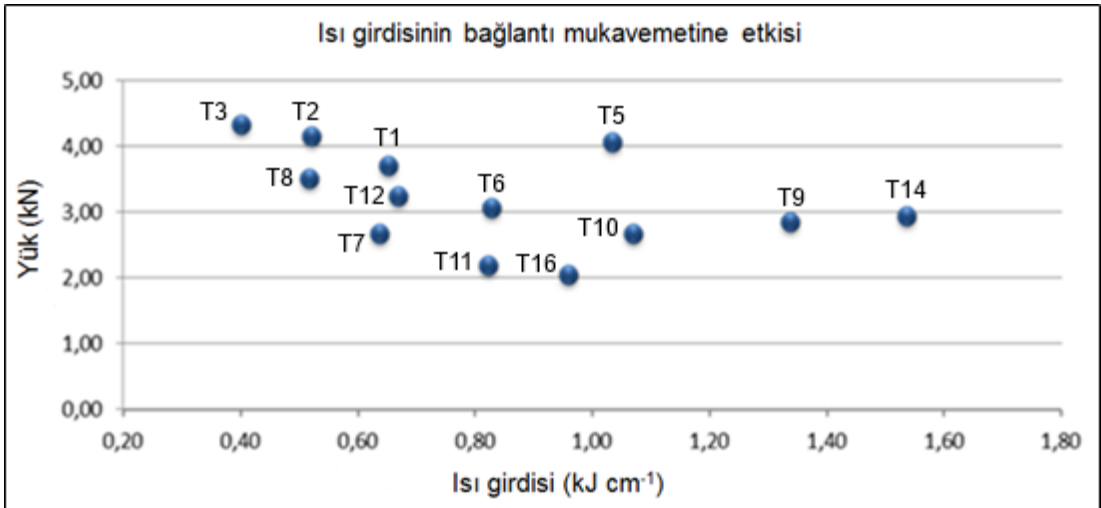
Tablo 5.4. Numunelere ait mukavemet, ısı girdisi ve intermetalik faz kalınlığı değerleri

	Yük (kN)	kJ cm^{-1}	IMC (μm)
T1	3,72	0,65	4,3
T2	4,17	0,52	2,805
T3	4,35	0,40	2,295
T4	0*	0,33	0
T5	4,07	1,04	4,63
T6	3,07	0,83	5,695
T7	2,69	0,64	2,815
T8	3,52	0,52	5,035
T9	2,87	1,34	12,5
T10	2,68	1,07	4,87
T11	2,20	0,82	4,1
T12	3,26	0,67	3,915
T13	0*	1,92	0
T14	2,96	1,54	5,19
T15	0,00	1,18	5,79
T16	2,06	0,96	9,665



Şekil 5.9. Isı girdisinin IMC kalınlığına etkisi

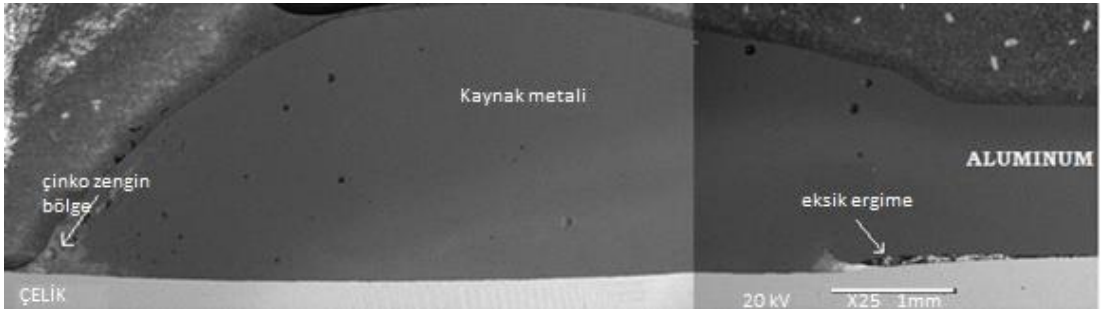
Tablo 5.5. ve Şekil 5.10. incelendiğinde örneklerin %85 inin teknolojik üst sınır olarak literatürde yer alan 10 µm nin altında olduğu gözlenmiştir. Fakat farklı ısı girdisi değerlerinin IMC' kalınlığını doğrudan etkilediği sonucu çıkarılabilir. Bunun yanında en yüksek ve en düşük ısı girdisi değerlerinde uygun kaynaklı birleştirmelerin gerçekleştirilmediği açıkça görülmüştür ve bu örnek grupları daha önce de bahsedildiği gibi 4 ve 13 numaralı deney numuneleridir.



Şekil 5.10. Isı girdisinin bağlantı mukavemetine etkisi

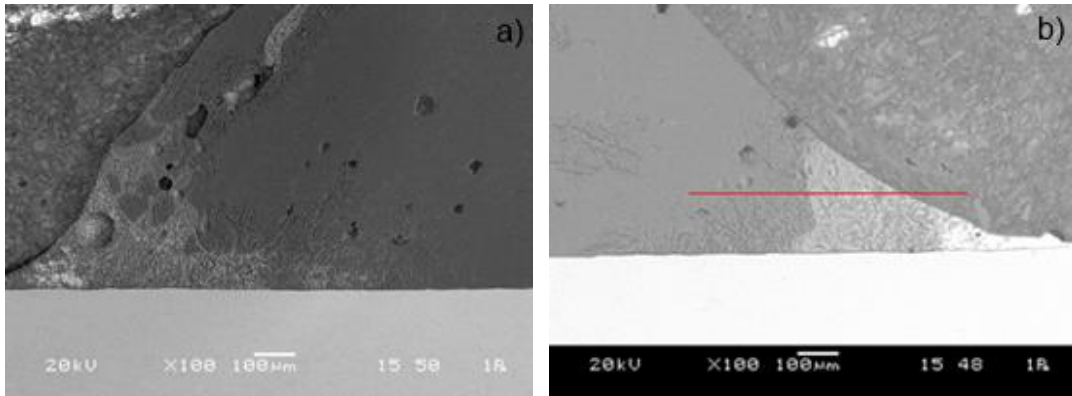
Şekil 5.10. incelendiğinde 1,2,3,5,6,8,12 örnek gruplarının 3 kN ile 4,35 kN aralığında çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğunu ve bu örnek gruplarının ısı girdisi değerlerinin 1 kJ cm⁻¹ 'in altında olduğu gözlemlenmiştir.

Numune hazırlama sonrası dağlanan metaller SEM ile görüntülenmiştir. İlk olarak elde edilen kaynak dikişi genel görüntüsü incelendiğinde, alüminyum ile çelik kaynak bağlantısında 3 farklı yapı gözlenmiştir. Bunlar kaynak metalinde bulunan poroziteler, çinkoca zengin bölge ve ergimemiş bölgedir. Şekil 5.11.' de 7 no' lu numuneye ait kaynak metalini gösteren SEM görüntüsü gösterilmiştir. Metallerin birleşim bölgesinde veya kenar bölgede eksik ergime (lack of fusion) bölgesi gözlenmiştir. Eksik ergime, sıkıca birbirine bağlanmış alüminyum ve çelik levhaların kaynağı sırasında oluşan kararsız çinko buharının kök bölgesinden uzaklaşmaması ile açıklanabilir. Sonuç olarak oluşan çinko buharı ark' in kararlılığını etkilemekte ve ısının alüminyumun yan duvarına etkisini düşürmektedir. Buna ek olarak soğuma esnasında çinko buharı kaynak metalinden tam olarak uzaklaşmamaktadır ve kaynak metalinde büyük boşluklar meydana getirir (Yang vd. 2013; Lin vd. 2013, Cao vd 2013; Milani ve diğ., 2015) (Şekil 5.11.)

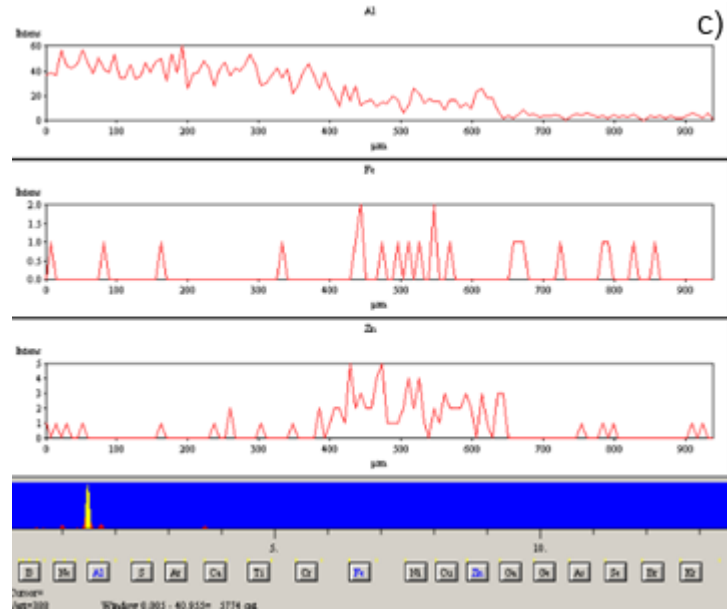


Şekil 5.11. 7 Numaralı örnek grubu kaynak metalini SEM görüntüsü

Buna ek olarak çinko buharının kaynak metalinin sol tarafındaki bölgeden de uzaklaşmadığı, katılaşma ile birlikte çinkonun kısmen kaynak metalinde kaldığı EDX analizi sonucu ile birlikte açıkça görülmektedir. (Şekil. 5.13.)

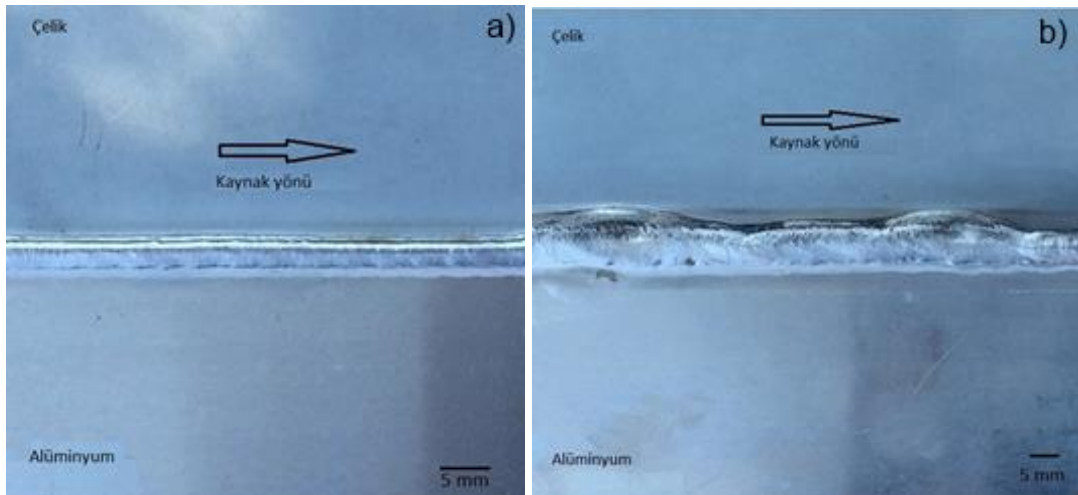


Şekil 5.12. Çinkoca zengin bölge (a) örnek 7, (b) örnek 2



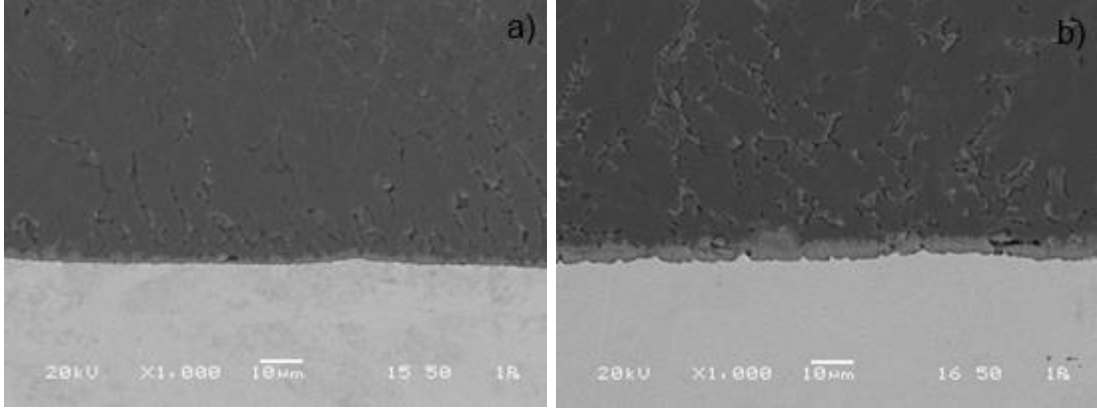
Şekil 5.13. EDX çizgi analiz sonucu

Çinko buharı oldukça kararsızdır ve ortamdan hızlıca uzaklaşmadığından ark' a ve dolgu metalinden gelen damlacığa karşı koyar, bu nedenle ark stabil olmaktan çıkar ve kararsızlaşabilir. Bu durumda ergiyik damlacığın ıslatma davranışı farklıdır ve dalgalı kaynak dikişi ortaya çıkar. Şekil 5.14.' de 1 ve 10 numaralı numuneler incelendiğinde 1 numaralı numuneye ait kaynak düzgün ve sıçrantsız bir kaynak dikişine sahip iken 10 numaralı numunede dalgalı kaynak dikişi gözlenmiştir (Yang ve diğ., 2013; Cao ve diğ., 2013). (Şekil 5.14.)



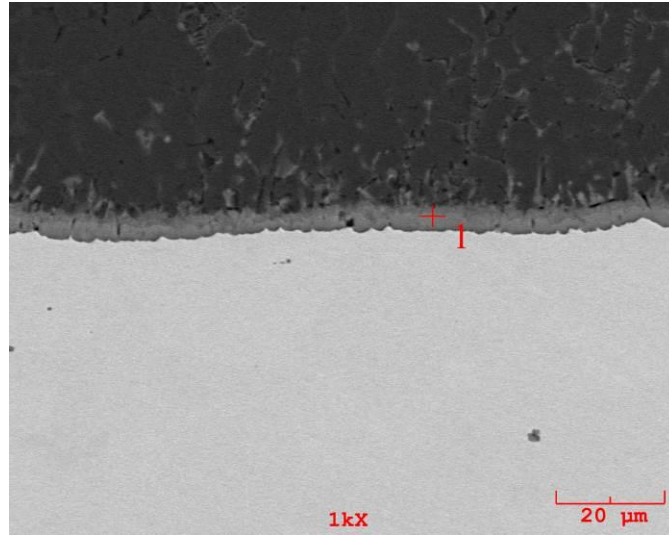
Şekil 5.14. 1 no' lu numune (a) ve 10 no' lu numune (b) ye ait makro görüntüler

Şekil 5.15.'de 3 ve 5 numaralı numunelere ait ortalama IMC kalınlıkları gösterilmektedir. Bu iki numune için ısı girdileri sırası ile $0,40 \text{ kJ cm}^{-1}$ ve $1,04 \text{ kJ cm}^{-1}$ dir.



Şekil 5.15. Alüminyum ile çelik arayüzeyinde oluşan IMC tabakası SEM görüntüsü. (a) numune 3, ortalama IMC kalınlık 2,30. (b) numune 5, ortalama IMC kalınlık 4,63

1 no'lu numune üzerinde yapılan EDX analizi sonucu elde edilen veriler Şekil 5.16 da gösterilmektedir. Yüzde ağırlıkça oran göz önünde bulundurulduğunda metallerin ağırlıkça % oranına göre faz diyagramından IMC türünün 1 no' lu numune için intermetalik fazın $FeAl_3$ olabileceği söylenebilir.



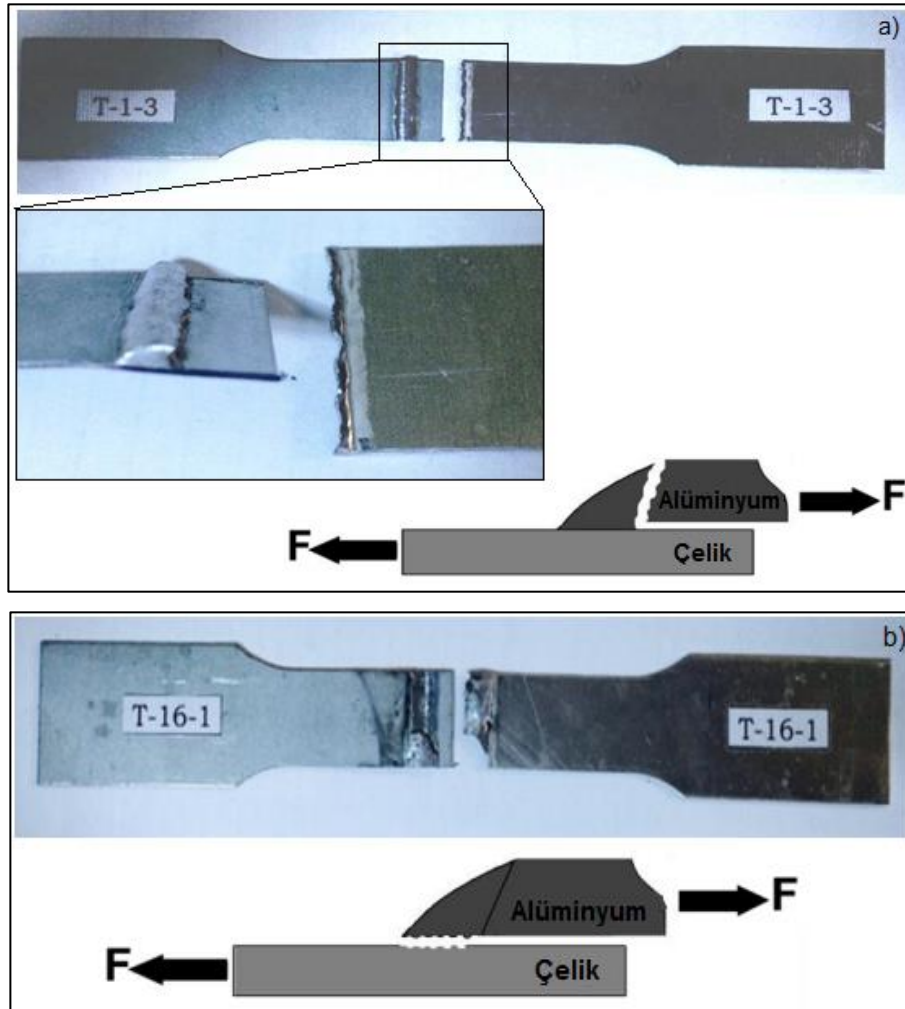
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
Al	Ka	444.03	13.327	63.646	wt.%	
Si	Ka	10.57	2.056	2.550	wt.%	
Fe	Ka	124.68	7.062	33.804	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Şekil 5.16. 1 no' lu numuneye ait IMC den' alınan EDX analizi sonucu

Artan ısı girdisi ile birlikte intermetalik tabaka kalınlığındaki artışın yanı sıra iki metal arasındaki intermetalik tabakadan alınan EDX sonuçlarında elde edilen ağırlıkça alüminyum ve demir oranlarında farklılıklar gözlenmiş olup arayüzeyde oluşması

muhtemel fazlar Fe_3Al , $FeAl_2$, $FeAl_3$ ve Fe_2Al_5 olabileceği sonucu elde edilmiştir. Potesser vd. (2006). Detaylı ve kesin bir analiz için çalışmaların derinleştirilerek, XRD ve Transmisyon elektron mikroskopisi (TEM) çalışması sonucu arayüzeyde oluşan fazlar, kafes yapısının belirlenmesi veya % elementel analiz yardımı ile net bir şekilde belirlenebilir.

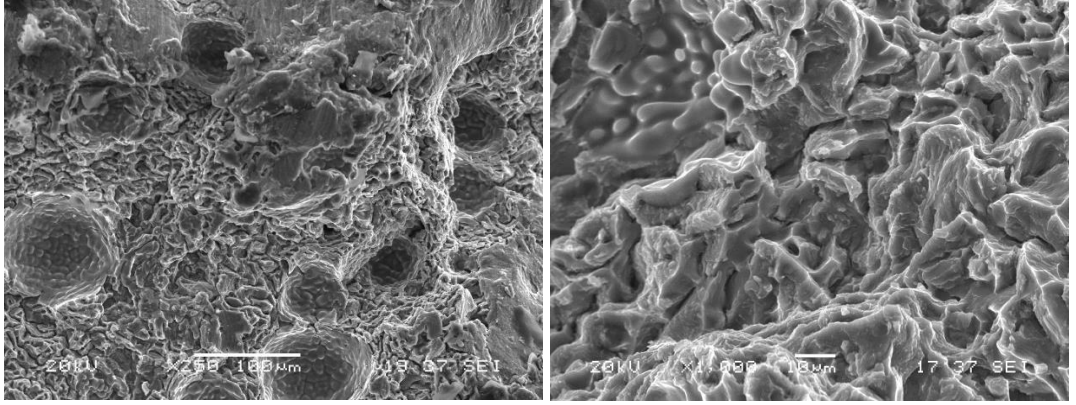
Çekme testi sonrası oluşan kopma yüzeylerinin SEM ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Kırılma yüzeyleri makro incelendiğinde, iki farklı kırılma türü gözlenmiş olup bunlar (bkz: bölüm 3.1.) de bahsedildiği gibi alüminyumun ısıdan etkilenmiş bölgesinden ve alüminyum-çelik kaynak arayüzeyinden kopma şeklindedir. Şekil 5.17.a ve Şekil 5.17.b' de 1 ve 16 no'lu numunelere ait kopma görüntüleri ve şematik gösterimleri verilmiştir.



Şekil 5.17. 1 ve 16 no'lu numunelere ait kopma türü görüntüleri (a) ısıdan etkilenmiş bölgeden kopma, (b) IMC arayüzeyden kopma

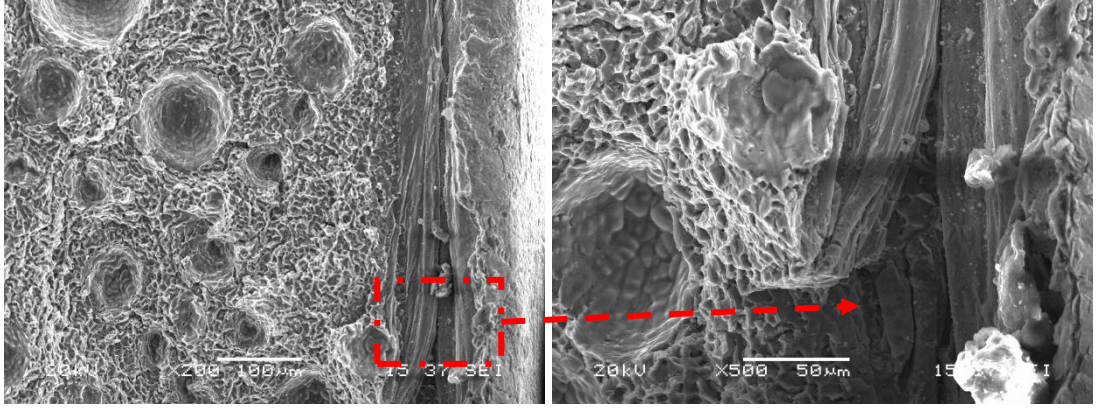
Şekil 5.17.'deki kopma görüntüleri ele alındığında elde edilen iki farklı kopmanın tel besleme hızı ve arayüzeyde oluşan IMC tabaka kalınlığı ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Tel besleme hızı dolayısıyla ısı girdisinin artması, kaynak bağlantısında ısıdan etkilenmiş bölgenin oluşarak bağlantı mukavemetinin azalmasına bunun ile beraber oluşan IMC tabaka kalınlığının artmasına sebep olmaktadır ve sonuç olarak kırılma ya ısıdan etkilenmiş bölgeden ya da IMC arayüzey bölgesinden gerçekleşmektedir.

1 no'lu numuneye ait kırılma yüzeyi görüntüsü ise Şekil 5.18.'de gösterilmektedir. Kırılma yüzeyine bakılarak, sünek kırılmanın gerçekleştiği söylenebilir. Kaynak metalinde bulunan boşluklar da net bir şekilde görünmektedir.

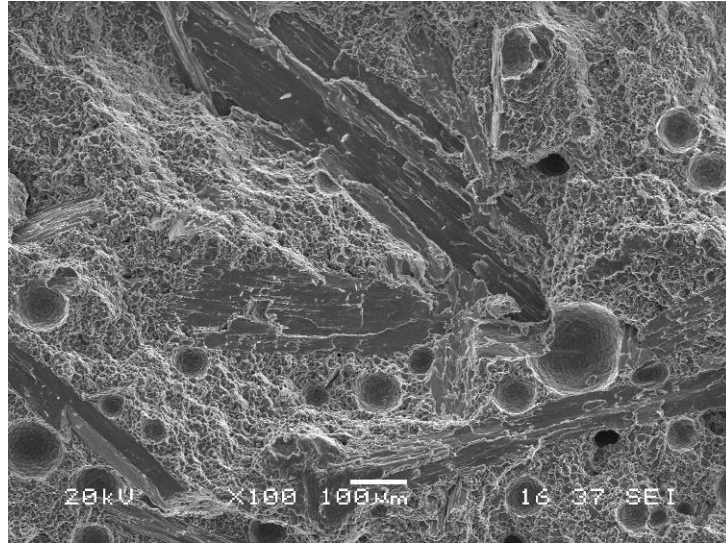


Şekil 5.18. 1'no lu numuneye ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

5 no'lu kaynaklı numuneye ait kırılma yüzeyi incelendiğinde, alüminyum kaynak metalini haricinde, çelik arayüzeyinde gevrek kırılmanın meydana geldiği bölge görünmektedir. Şekil 5.19. Kaynak metalinde sünek kırılma gözlemlenirken, bölgesel olarak homojen olmayan IMC kalınlığı gözlenen numunede intermetalik geçiş bölgesinde gevrek kırılmanın meydana geldiği öngörülmüştür. Bir diğer kopma türü olan arayüzeyden kopma 16 no'lu numunede gözlenmiştir. Yang vd. (2013) ve Lin vd. (2013) yaptıkları açıklamada bu hata türünün iki metal arayüzeyindeki kesme geriliminden meydana geldiği, arayüzeyde oluşan porozite miktarının hata türünü arttırdığı bilgisini vermişlerdir. IMC kalınlığının yeterli düzeyde olmaması nedeniyle bağlantının oluşturulamadığı durumlarda bu kopma türü ile karşılaşmıştır. Ortalama 9,6 µm IMC kalınlığına sahip numunede bu kopma türünün meydana gelmesi kaynak metalindeki porozite miktarının fazla oluşu ile açıklanabilir Şekil 5.20. Ayrıca ısı girdisine ve buna bağlı olarak soğuma hızının fazla olması sonucu kaynak metalinde ikincil faz oluşumu görülmektedir. Bu durum ise kopma mukavemet değerinin diğer numunelere göre düşük 2,06 kN olması ile açıklanabilir.



Şekil 5.19. 5 no' lu numuneye ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü



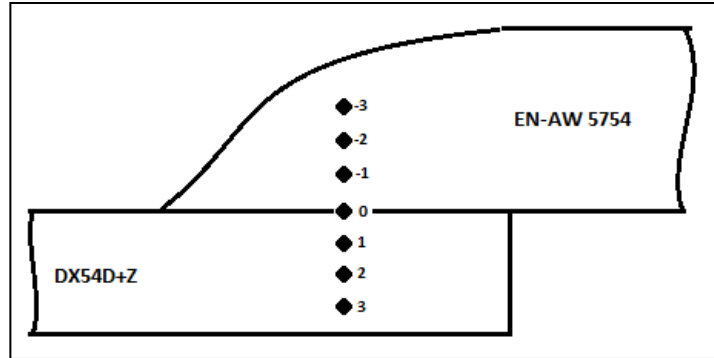
Şekil 5.20. 16 no' lu numuneye ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

Artan ısı girdisi ile birlikte kaynak metalinde ve arayüzeyde oluşan intermetalik fazlar, kopma türünü değiştirdiği gibi, kırılma yüzeyini de değiştirmekte sonuç olarak kaynaklı metallerin bağlantı mukavemetini doğrudan etkilemektedir.

5.5. Mikrosertlik Deney Sonuçları

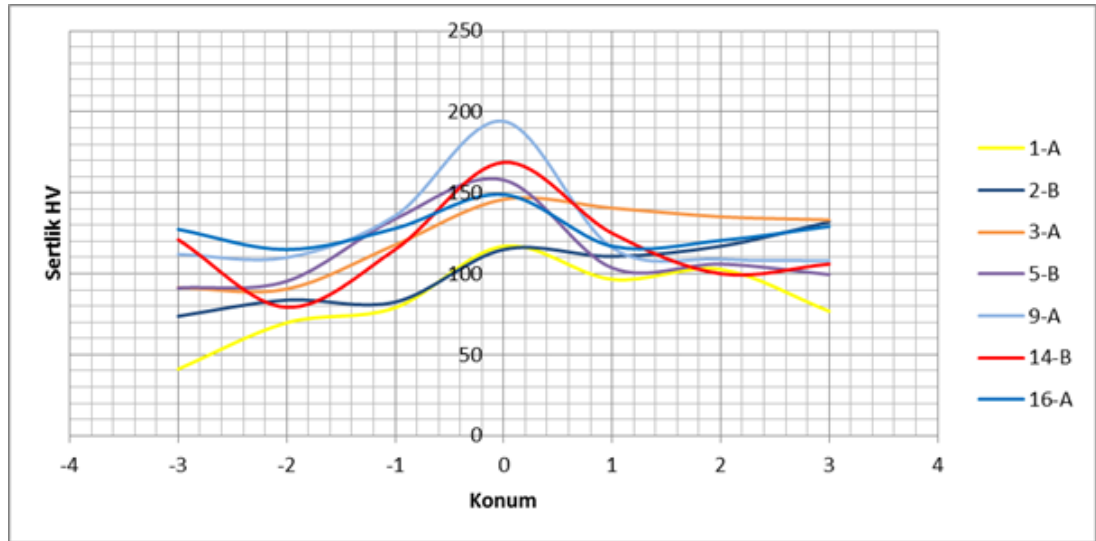
Mikrosertlik analizi 0,5 kg yük altında 15 süre ile ölçülmüş olup sonuçlar HV cinsinden elde edilen veriler Şekil 5.22. da gösterilmiştir. Kaynak metali üzerinden toplamda 7 adet ölçüm alınarak geçiş bölgelerindeki sertlik dağılım eğrisi oluşturulmuştur. Kaynak metalinde ölçüm alınan bölgeler ise Şekil 5.21. da gösterilmiştir. Sertlik dağılımı incelendiğinde iki ana metal arayüzeyinde oluşan intermetalik faz geçiş bölgesinde sertliğin ana metale göre artarak 190 HV değerine

kadar ulaştığı gözlenmiştir. Artan ısı girdisi ile arayüzeyde oluşan intermetalik faz sertlik değerinin de arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.21. Mikrosertlik ölçümü alınan bölge şematik gösterimi

Ana metallerden yapılan ölçümlerde ise çelik için sertlik değeri 118 HV iken, bu değer alüminyum için 82,5 HV olarak belirlenmiştir

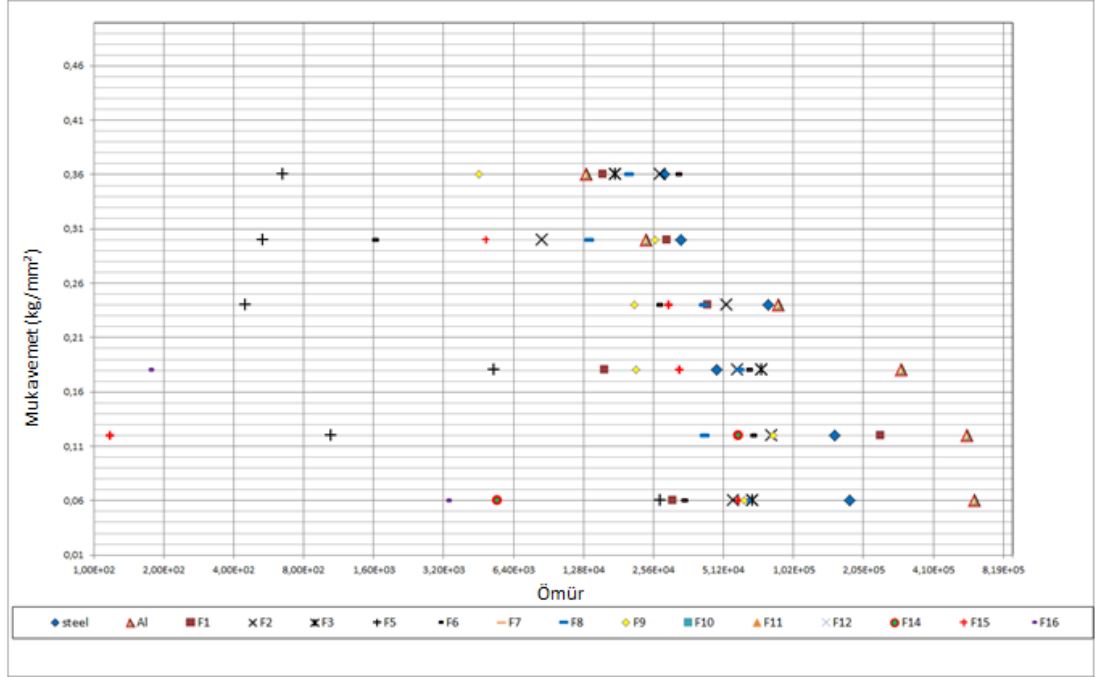


Şekil 5.22. Farklı ısı girdisi değerlerinde kaynak metali ve ana metal arası mikrosertlik dağılım grafiği

5.5. Yorulma Deneyi Sonuçları

Yorulma test sonuçları incelendiğinde numuneler arasında düşük ısı girdisine sahip 1, 2 ve 3 no' lu numuneler diğer numunelere göre üstün yorulma dayanımı sergilemiştir. Kaynaklı birleştirmeler arasında en yüksek yorulma ömrü 1 no' lu numuneye aittir ve ortalama 62834 çevrim sonucu kopma gözlenmiştir. Bu numune için kaynak parametreleri incelendiğinde, analiz sonrası elde edilen sonuçlarını desteklediği görülmektedir. 5 no' lu numuneye ait yorulma değerleri, diğer

numuneler ile karşılaştırıldığında ciddi oranda düşüktür. Bu durum yüksek ısı girdisi $1,04 \text{ kJ/cm}^{-1}$ ve bunun sonucunda oluşan gevrek ve kısmen daha kalın $4,63 \mu\text{m}$ intermetalik fazın oluşumu ile açıklanabilir. Şekil 5.23.' de yorulma test sonuçları gösterilmiştir. Tablo 5.5. de ise her bir numuneye ait ortalama yorulma çevrim sayısı gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Eğmeli yorulma test sonuçları

Tablo 5.5. Numunelere ait ortalama yorulma çevrim sayısı

F1	62834
F2	47790
F3	40095
F5	5877
F6	37900
F7	40642
F8	36680
F9	22571
F10	29699
F11	28664
F12	24995
F14	32353
F15	25390
F16	1754

Teknolojik üst sınır olan $10 \mu\text{m}$ nin altında olmasına rağmen, düşük kaynak hızı ve yüksek tel besleme hızı değerleri ile birlikte ısı girdisinin yüksek olması ve

arayüzeyde oluşan intermetalik bileşenlerin gevrek yapıda oluşu ile açıklanabilir. Bunun ile birlikte kaynak dikişinde oluşan porozite miktarının fazla olması ve bu porozitelerin önemli çatlak başlangıç bölgeleri oluşu yorulma çevrim değerinin azalmasına etken bir faktördür.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

1 mm EN-AW 5754-H111 alüminyum alaşımı ile 0,75 mm kalınlığındaki DX54D+Z galvanizli çelik metal çifti 10 mm bindirme mesafesinde soğuk metal transferi yöntemi birleştirilmiştir. Mekanik incelemeler sonucu gerçekleştirilen Taguchi analizi ve metalografik incelemeler sonucunda, en mukavemetli bağlantıların 3-4 m/dak tel besleme hızı, 0-1 mm aralığında elektrot besleme mesafesi ve 8-10 mm/s kaynak hızı parametre değerlerinde oluştuğu gözlenmiştir.

İstatistiksel analiz sonuçları, kullanılan kaynak proses parametreleri içinde tel besleme hızının %59,7 oranında etki derecesi ile en önemli proses değişkeni olduğu, ikinci olarak %20,6 ile elektrot besleme mesafesi ve son olarak değişkenler arasında prosese en az etkinin %6,5 ile kaynak hızı olduğu sonucuna varılmıştır.

Soğuk metal transferi yöntemi ile birleştirilen çelik-alüminyum bağlantısının kaynak metalinin 3 bölgeden oluştuğu ve bunların; kaynak metali, çinkoca zengin bölge ve iki metal arayüzeyinde oluşan intermetalik fazlar olduğu gözlenmiştir. Kaynak metalinin a-Al, alüminyumun kaynak metalinde dolgu metalinden gelen Mn, Si vb diğer elementler ile oluşturduğu ikincil fazlar ve arayüzeyde oluşan demir alüminyum Fe_3Al , $FeAl_2$, $FeAl_3$ ve Fe_2Al_5 intermetalik fazlardan oluştuğu bilinmektedir.

CMT prosesinde ısı girdisinin kontrolü ile ($0,40-1,00 \text{ kJ cm}^{-1}$) IMC tabaka kalınlığının kontrol edilebileceği, böylece mukavemeti daha yüksek, güvenilir bağlantıların oluşturulabileceği sonucu elde edilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantılarda ana metalin (alüminyum) %80' i ne yakın mukavemet değerlerine ulaşılmıştır.

Alüminyum ile galvanize çeliğin birleştirilmesinde, galvanizin olumsuz etkileri olduğu gibi (eksik ergime, porozite oluşumu) ergiyen alüminyumun galvaniz üzerine ıslatma açısını etkilediği, böylece elde edilen kaynak dikişine direkt etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Artan ısı girdisi ile daha çok çinkonun çelik yüzeyinden buharlaşması, ergiyen alüminyumun küçük ıslatma açılarında çelik yüzeyine yayılarak daha zayıf bağlantıların elde edilmesine sebep olmaktadır.

Düşük ısı girdisine sahip örneklerde, birleştirilmiş metallerin arka yüzeyinde çinko tabakasının varlığını koruduğu, artan ısı girdisine bağlı olarak galvanizli çeliğin arka yüzeyinde çinkonun metal üzerinden buharlaşarak korozyon oluşumuna açık bölgeler oluşturduğu gözlenmiştir.

Mikrosertlik incelemesi sonucu arayüzeyde oluşan intermetalik faz tabakasının beklendiği gibi ana metallerin sertlik değerlerinden yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durumun ikincil fazların sertlik değerlerinin ana metallere göre yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Elde edilen bağlantıların yorulma analizi sonuçlarının istatistiksel analiz sonucu elde edilen değerler ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Mekanik ve mikroyapısal olarak uygun 1 ve 2 numaralı numunelerin yorulma ömürleri 45000-65000 çevrim aralığında olduğu görülürken, ısı girdisi artışına ve dolaylı etkilerine bağlı olarak diğer numunelerde yorulma ömrünün azalarak 6000 çevrim değerlerine kadar düştüğü sonucu elde edilmiştir.

Sonuç olarak 1 mm EN-AW 5754-H1111, 0,75 mm DX54D+Z galvanize çelik arasında CMT yöntemi ile teknolojik olarak dayanıklı ve yorulma dayanımı yüksek bağlantının oluşturulması mümkündür.

KAYNAKLAR

Bertram M., Buxmann K., Chase R., Furrer P., Gilmont B., Hannagan J., Martchek K., Morton P., Rebitzer G., Improving Sustainability in The Transport Sector Through Weight Reduction and The Application of Aluminum., *International Aluminum Institute*, 12, 1-55, 2007.

Bruckner J., Cold Metal Transfer Has A Future Joining Steel to Aluminum, *Welding Journal*, 2005, **84**, 38-40.

Cao R., Huang Q., Chen H., Wang P., Cold Metal Transfer Spot Plug Welding of AA6061-T6 to Galvanized Steel for Automotive Applications, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, **585**, 622-632.

Cao R., Yu G., Chen H., Wang P., Cold Metal Transfer Joining Aluminum Alloys-to-Galvanized Mild Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **213**, 1753-1763.

Cebeci T., Şahin S., Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AA1050 ve AA5754-H111 Alüminyum Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Teknik Bilimler Dergisi*, 2010, **2**, 10-17.

Chen Y. C., Gholinia A., Prangnell P. B., Interface Structure and Bonding in Abrasion Circle Friction Stir Spot Welding: A Novel Approach for Rapid Welding Aluminium Alloy to Steel Automotive Sheet, *Materials Chemistry and Physics*, 2012, **134**, 459-463.

Cobden R., Banbury A., Aluminium: Physical Properties, Characteristics And Alloys, *TALAT (Training in Aluminium Application Technologies)*, 1501, 1-60, 1994.

Dong H., Hu W., Duan Y., Wang X., Dong C., Dissimilar Metal Joining of Aluminum Alloy to Galvanized Steel With Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Cu and Zn-Al Filler Wires, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**, 458-464.

Dost I., Khan A. S., Aziz M., Mechanical Evaluation of Joining Methodologies in Multi Material Car Body, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2012, **5**, 2231-1963.

Franc A., Heterogeneous Joints Between Steel and Aluminium Made by Modified MIG Process, *Metal-Rožnov Pod Radhoštěm Symposium*, Czech Republic, 18-20 May 2010.

Güngör B., Kaluç E., Taban E., Şık A., Mechanical and Microstructural Properties of Robotic Cold Metal Transfer (CMT) Welded 5083-H111 and 6082-T651 Aluminum Alloys, *Materials And Design*, 2014, **54**, 207-211.

Güngör B., AW 5083-H111 ve AW 6082-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma (FSW) ve Robotik CMT-MIG Kaynak Yöntemleri ile Kaynağında Mekanik ve Metalürjik Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342552.

Kascak L., Vinas J., Spisak E., Deltaspot as an Innovative Method of Resistance Spot Welding, *Mechanika*, 2012, **84**, 43-53.

Kaufman J. G., *Introduction To Aluminum Alloys And Tempers*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2000.

Lin J., Ma N., Lei Y., Murakawa H., Shear Strength of CMT Brazed Lap Joints Between Aluminum and Zinc-Coated Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **213**, 1303-1310.

Lohwasser D., Chen Z., *Friction Stir Welding From Basics to Applications*, 1th ed., Woodhead Publishing, Berkeley, 2010.

Mathers G., *The Welding of Aluminium And its Alloys*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, New York, 2002.

Medgyesi T., Popescu M., Opris C., Difficulties Encountered in Performing Dissimilar Joints On Sheets, *Proceedings of The 22nd International DAAAM Symposium*, Vienna, Austria, 23-26 November 2011.

Mert Ş., Mert S., Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin İncelenmesi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2013, **2**, 26-35.

Milani A. M., Paidar M., Khodabandeh A., Nategh S., Influence of Filler Wire and Wire Feed Speed on Metallurgical and Mechanical Properties of MIG Welding-Brazing of Automotive Galvanized Steel/5754 Aluminum Alloy in a Lap Joint Configuration, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 2015, **4**, 1-12.

Miller W. S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A. J., Smet D. P., Haszler A., Vieregge A., Recent Development in Aluminium Alloys for The Automotive Industry, *Materials Science and Engineering A*, 2000, **280**, 37-49.

Muncut S., Mortoiu D., Sima G., Technology for Heterogeneous Joining of Thin Zinc-Plated Steel Sheet with Aluminum, *Nonconventional Technologies Review*, 2011, **4**, 73-77.

Muncut S., Culda L., Sima G., Mortoiu D., The CMT Braze-Welded Diffusion Layer Study on Galvanized Aluminum Sheets, *Fascicle of Management and Technological Engineering*, 2013, **1**, 219-222.

Olantunji O., Akure N., Taban E., Kaluç E., Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys: A Recent Review, *Materials Testing*, 2015, **57**, 609-627.

Ozaki H., Kutsuna M., Dissimilar Metal Joining of Zinc Coated Steel and Aluminum Alloy by Laser Roll Welding, *Intech*, 2012, **2**, 33-54.

Polak V., Dostal P., Analysis of Modern Methods in Welding Technology of Technical Materials, *Technology and Automobile Transport*, 2013, **61**, 847-851.

Rathod. J., Kutsuna M., Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding, *Welding Research*, 2004, **83**, 26-26.

Rosado T., Almeida P., Pires I., Miranda R., Quintino L., Innovations in Arc Welding, *Congresso De Engenharia De Moçambique*, Maputo, 2-4 September 2008.

Shao L., Shi Y., Huang J. K., Wu S. J., Effect of Joining Parameters on Microstructure of Dissimilar Metal Joints Between Aluminum and Galvanized Steel., *Materials And Design*, 2015, **66**, 453-458.

Su Y., Hua X., Wu Y., Influence of Alloy Elements on Microstructure and Mechanical Property of Aluminum-Steel Lap Joint Made by Gas Metal Arc Welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **214**, 750-755.

Taban E., Gould J. E., Lippold C. J., Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel: Properties and Microstructural Characterization, *Materials and Design*, 2010, **31**, 2305-2311.

Taban E., 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının TIG, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2004, 154963.

Taban E., Gould J. E., Alüminyum Alaşımlarının Kaynağında Yeni Nesil Direnç Kaynak Yöntem ve Uygulamaları, *ALUS'05 Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul, 13-14 Ekim 2011.

Taban E., Gould J. E., Lippold C. J., Characterization of 6061-T6 Aluminum Alloy to AISI 1018 Steel Interfaces During Joining and Thermo-Mechanical Conditioning, *Materials Science and Engineering A*, 2010, **527**, 1704-1708.

Talalaev R., Veinthal R., Laansoo A., Sarkans M., Cold Metal Transfer (CMT) Welding of Thin Sheet Metal Products, *Estonian Journal of Engineering*, 2012, **18** (3), 243-250.

Thorny C., Wirth A., Kreimeyer M., Wagner F., Vollertsen F., Joining of Dissimilar Materials–New Perspectives for Lightweight Design in the Transportation Industries, *Proc. IW International Conference Welding & Materials*, Dubrovnik & Cavtat, 01-08 July 2007.

Thomy C., Vollertsen F., Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum to Steel-Effect of Process Parameters on Joint Properties, *Welding in the World*, 2013, **56**, 124-132.

Totten G. E., Mackenzie S., *Handbook of Aluminum Volume 1: Physical Metallurgy and Processes*, 1st ed., Marcel Dekker Inc., New York, 2003.

URL-1:<http://www.aluminiumleader.com/en/around/transport/cars> (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2015).

URL-2:http://www.alueurope.eu/pdf/Aluminium_in_cars_Sept2008.pdf (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2015).

URL-3:<http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2012/10/EAA-Aluminium-in-Cars-Unlocking-the-light-weighting-potential.pdf> (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2015).

URL-4:<http://world.honda.com/news/2012/4120906Weld-Together-Steel-Aluminum/> (Ziyaret Tarihi: 26 Aralık 2015).

URL-5:http://www.axson.se/pdf/fro_news_DeltaSpot_eng.pdf (Ziyaret Tarihi: 26 Aralık 2015).

URL-6:<http://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/properties> (Ziyaret Tarihi: 21 Kasım 2015).

URL-7:http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-6F72238A-DEF5A15E/fronius_usa/22_cmt_the_new_revolution_in_digital_gma_welding_gb.pdf (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2015).

URL-8:http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-51778B3C-4B522B10/fronius_uk/40_0006_2418_TR_v01_2009_CMT_109526_snapshot.pdf (Ziyaret Tarihi: 30 Aralık 2015).

Wouters M., Hybrid Laser-MIG Welding: An Investigation of Geometrical Considerations, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Sweden, 2005.

Yang S., Zhang J., Lian J., Lei Y., Welding of Aluminum Alloy to Zinc Coated Steel by Cold Metal Transfer, *Materials and Design*, 2013, **49**, 602-612.

Zhang H. T., Feng J. C., He P., Zhang B. B., Chen J. M., Wang L., The Arc Characteristics and Metal Transfer Behaviour of Cold Metal Transfer and Its Use in Joining Aluminium to Zinc-Coated Steel, *Materials Science and Engineering*, 2009, **499**, 111-113.

Zhang H. T., Feng J. C., He P., Hackl H., Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum-Zinc Coated Steel Joints Made by a Modified Metal Inert Gas Welding-Brazing Process, *Material Characterization*, 2007, **58**, 588-592.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Ünel E.**, Taban E., Properties and Optimization of Dissimilar Aluminum Steel CMT Welds, *Annual Assembly of International Institute of Welding Commission II*, Finland, 29 June-3 July 2015.
- [2] **Ünel E.**, Taban E., Properties and Optimization of Dissimilar Aluminum Steel CMT Welds, *Intermediate Meeting of International Institute of Welding Commission II*, İstanbul, 02-05 March 2015.
- [3] **Ünel E.**, Taban E., Alüminyum – Çelik CMT Kaynaklı Bağlantılarının Özellikleri ve Optimizasyonu, *ALUS07 7. Alüminyum Sempozyumu*, TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, İstanbul, 7-8 Ekim 2015.
- [4] **Ünel E.**, Taban E., CMT (Soğuk Metal Transferi) kaynağı; Yöntemin üstünlükleri ve otomotiv sektöründeki yeri. *Modern Kaynak Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları*, İzmit Rotary Kulübü, Kocaeli, 8 Mayıs 2015.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Batman' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İzmit' te tamamladı. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümün' nü kazandı. 2009 yılında Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde ikinci anadal programına kabul edildi ve 2012 yılında lisans eğitimlerini tamamladı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü' nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Ar&Ge mühendisi olarak başladığı kariyerine, 2013 yılından beri otomotiv robotik kaynak hücresi projeleri gerçekleştiren özel bir şirkette proje mühendisi olarak devam etmektedir.