

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ BİRLEŞTİRMELERDE
SEÇİLEN KAYNAK PARAMETRELERİ ve KULLANILAN
TEKNOLOJİLER: GELENEKSEL YÖNTEMLER ve
LASER TEKNİĞİ**

Metalurji ve Malzeme Müh. Caner YEŞİLDAL

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet KARAASLAN (YTÜ)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
Sayfa	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK	3
2.1 Kaynağın Önemi	3
2.2 Kaynak ile Perçinin Karşılaştırılması	3
2.3 Kaynak ile Dökümün Karşılaştırılması	4
2.4 Kaynağın Sınıflandırılması	4
2.4.1 Kaynağı Uygulandığı Malzemeye Göre Sınıflandırma	4
2.4.2 Kaynağı Amacına Göre Sınıflandırma	4
2.4.3 Kaynağı Yöntemine Göre Sınıflandırma	4
2.4.4 Kaynağı İşlemin Cinsine Göre Sınıflandırma	5
2.5 Metal Kaynağı	5
2.5.1 Ergitme Kaynağı Yöntemleri	5
2.5.1.1 Ergitme Kaynağında Kaynak Kabiliyeti	6
2.5.2 Basınç Kaynağı Yöntemleri	9
2.6 Plastik Malzeme Kaynağı	9
2.7 Lehimleme	10
3. OTOMOBİL ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ	11
3.1 Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri	12
3.1.1 TIG Kaynağı	12
3.1.2 MIG/MAG Kaynağı	14
3.1.3 Özlü Telle Ark Kaynağı	15
3.1.4 Laser Işın Kaynağı	16
3.1.4.1 Uzaktan Laser Kaynağı	17
3.1.5 Lehimleme	19

3.1.5.1	Sert Lehimleme.....	19
3.1.5.2	Yumuşak Lehimleme.....	20
3.2	Basınç Esaslı Kaynak Yöntemleri	21
3.2.1	Nokta Direnç Kaynağı.....	21
3.2.2	Projeksiyon Direnç Kaynağı.....	22
3.2.3	Saplama Kaynağı.....	23
3.2.4	Dikiş Direnç Kaynağı.....	24
3.2.5	Sürtünme kaynağı.....	25
3.2.5.1	Sürtünen Eleman ile Kaynak	25
3.2.5.2	Çizgisel Sürtünme Kaynağı.....	26
3.2.5.3	Dönel Sürtünme Kaynağı	27
4.	KAYNAK METALURJİSİ	29
4.1	Allotropik Malzemelerin Ergitme Kaynağı	29
4.1.1	Şekillenmiş Allotropik Malzemeler.....	33
4.2	Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Malzemeler.....	33
4.2.1	Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Şekillenmiş Malzemeler.....	33
4.2.2	Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Şekillenmemiş Malzemeler.....	34
4.3	Çökeltme Sertleştirmeli Malzemeler	35
5.	OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN MALZEMELER ve SEÇİM KRİTERLERİ	37
5.1	Otomotiv Sektöründeki Hizmet Şartlarına Göre Hafif Malzeme Gereksinimi	37
5.2	Malzeme Seçimi	38
5.3	Gövde Panellerinde Kullanılan Soğuk Haddelenmiş Düşük Karbonlu Gelişmiş Çelikler	40
5.3.1	IF Çeliği.....	42
5.3.2	Fırında Sertleşen Çelikler	44
5.3.3	Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı-HSLA Çeliği	45
5.3.4	Çift Fazlı Çelikler	46
5.3.5	TRIP Çeliği.....	47
5.3.6	TWIP Çeliği.....	48
5.4	Otomobillerde Kullanılan Polimerler ve Özellikleri	48
5.4.1	Otomobil Üzerinde Kullanılan Polimer Parçalar.....	49
5.5	Otomobillerde Kullanılan Metalik Malzemeler	50
5.5.1	Motor Aksamında Kullanılan Geleneksel Malzemeler	51
5.5.2	Şaside ve Gövdede Kullanılan Geleneksel Malzemeler.....	52
5.5.3	Aktarma Organlarında Kullanılan Geleneksel Malzemeler	54
5.5.4	Süspansiyon Sistemlerinde ve Direksiyon Kutusunda Kullanılan Geleneksel Malzemeler	54
5.5.5	Fren Sisteminde Kullanılan Geleneksel Malzemeler	55
6.	OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN METAL MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİNE GÖRE KAYNAK PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ	56
6.1	Direnç Nokta Kaynak Parametreleri.....	56
6.1.1	Elektrot Baskı Kuvveti	57
6.1.2	Elektrot Temas Alanı Çapı	57
6.1.3	Sıkma Süresi	58
6.1.4	Kaynak Süresi.....	58
6.1.5	Tutma-Soğuma Süresi	59

6.1.6	Kaynak Akımı.....	59
6.2	Direnç Dikiş Kaynağı Parametreleri.....	59
6.3	Projeksiyon Direnç Kaynağı İçin Parametreler	62
6.4	Saplama Kaynağı Parametreleri	64
6.5	Sürtünme Kaynağı Parametreleri.....	68
6.6	Gazaltı Ark Kaynağı Parametreleri	70
6.6.1	Akım ve Ark Voltajı	71
6.6.2	İlerleme Hızı	71
6.6.3	Ark Boyu	73
6.7	Laser Kaynak Parametreleri	73
6.7.1	Laser Açısı Toleransı.....	74
6.7.2	Laser Kaynağında Nüfuziyet Genişliği ve Derinliği	75
6.7.3	Laser Kaynağının Optimizasyonu	76
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	79
7.1	Parçalara Uygulanan İşlemler ve Testler.....	79
7.1.1	Ana Malzemenin Kesilmesi.....	83
7.1.2	Ana Malzemenin Metalografik Hazırlığı.....	84
7.1.3	Ana Malzemenin Kimyasal Analizi	84
7.1.4	Ana Malzeme Kaplama Kalınlığı Ölçümü	85
7.1.5	Ana Malzeme Görüntüsünün SEM İncelemesi	86
7.1.6	Ana Malzeme Sertliğinin Ölçülmesi	87
7.2	Kaynak Bölgesi İşlemleri	88
7.2.1	Kaynak Bölgesinin Çıkarılması.....	88
7.2.2	Kaynak Bölgesinin Metalografik Hazırlığı	90
7.2.3	Kaynak Bölgesinin SEM’de İncelenmesi.....	90
7.2.4	Kaynak Bölgesi Sertliğinin Ölçülmesi	91
8.	DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI	92
8.1	Ana Malzemenin Kimyasal Analizi	92
8.2	Ana Malzemenin Kaplama Kalınlığının Ölçümü	92
8.3	Ana Malzeme Görüntüsünün SEM İncelemesi	93
8.4	Kaynak Bölgesinin SEM’de İncelenmesi.....	94
8.4.1	Nokta Kaynağının İncelenmesi	94
8.4.2	TIG Kaynağının İncelenmesi.....	96
8.4.3	Laser Kaynağının İncelenmesi	98
8.4.4	Uzaktan Laser Kaynağının İncelenmesi	100
8.5	Geleneksel Yöntem ile Modern Yöntemin Kırılma Yüzeyleri Açısından Karşılaştırması; TIG Kaynağı – Uzaktan Laser Kaynağı.....	102
8.6	Sertlik Profilleri	105
8.6.1	Nokta Kaynağında Sertlik Dağılımı	106
8.6.2	TIG Kaynağında Sertlik Dağılımı	106
8.6.3	Laser Kaynağında Sertlik Dağılımı	107
8.6.4	Uzaktan Laser Kaynağında Sertlik Dağılımı.....	108
9.	GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	109
	KAYNAKLAR.....	112
	ÖZGEÇMİŞ.....	114

SİMGE LİSTESİ

A	<i>Amper</i>
Al	<i>Alüminyum</i>
C	<i>Karbon</i>
CH ₄	<i>Metan</i>
CO ₂	<i>Karbondioksit</i>
Cr	<i>Krom</i>
Cu	<i>Bakır</i>
E	<i>Elastiklik modülü</i>
Fe	<i>Demir</i>
H ₂ SO ₄	<i>Sülfürik asit</i>
HNO ₃	<i>Nitrik asit</i>
I	<i>Akım</i>
M	<i>Metal</i>
Mg	<i>Magnezyum</i>
Mn	<i>Mangan</i>
Mo	<i>Molibden</i>
N	<i>Newton</i>
<i>n</i>	<i>Sertleşme üsteli</i>
N	<i>Azot</i>
Nb	<i>Niyobyum</i>
NH ₃	<i>Amonyak</i>
Ni	<i>Nikel</i>
Pb	<i>Kurşun</i>
R	<i>Direnç</i>
<i>r</i>	<i>Anizotropi katsayısı</i>
Rp	<i>Akma dayanımı</i>
S	<i>Kükürt</i>
Sn	<i>Kalay</i>
W	<i>Volfram</i>
Zn	<i>Çinko</i>

α	<i>Ferrit Fazı</i>
γ	<i>Östenit fazı</i>
ρ	<i>Yoğunluk</i>

KISALTMA LİSTESİ

<i>ABS</i>	<i>Akrilonitril Bütadien Stiren</i>
<i>AISI</i>	<i>American Iron Steel Institue</i>
<i>USS</i>	<i>United States Ships</i>
<i>BH</i>	<i>Bake Hardenning</i>
<i>BMC</i>	<i>Bulk moulding compounds</i>
<i>BSE</i>	<i>Bulk moulding compounds</i>
<i>cm</i>	<i>Santimetre</i>
<i>mm²</i>	<i>Milimetrekare</i>
<i>CMn</i>	<i>Karbon Mangan çeliği</i>
<i>Dak</i>	<i>Dakika</i>
<i>DDK</i>	<i>Küresel grafitli dökme demir</i>
<i>DDL</i>	<i>lamel grafitli dökme demir</i>
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>EDDQ</i>	<i>Extra Deep Drawing Quality</i>
<i>EM</i>	<i>Esas Malzeme</i>
<i>EN</i>	<i>European Norm</i>
<i>gr</i>	<i>Gram</i>
<i>HB</i>	<i>Hardness Brinell</i>
<i>HK</i>	<i>Hardness Knoop</i>
<i>HSLA</i>	<i>High Strength Low Alloyed</i>
<i>HV</i>	<i>Hardness Vickers</i>
<i>Hz</i>	<i>Hertz</i>
<i>ITAB</i>	<i>Isı Tesiri Altındaki Bölge</i>
<i>J</i>	<i>Joule</i>
<i>kA</i>	<i>Kilo Amper</i>
<i>KD</i>	<i>Kaynak Dikişi</i>
<i>kN</i>	<i>KiloNewton</i>
<i>Kp</i>	<i>KiloPound</i>
<i>kV</i>	<i>Kilo Volt</i>
<i>kW</i>	<i>Kilo Watt</i>

<i>MAG</i>	<i>Metal Aktif Gaz</i>
<i>Max</i>	<i>Maksimum</i>
<i>MIG</i>	<i>Metal İnert Gaz</i>
<i>Min</i>	<i>Minimum</i>
<i>mm</i>	<i>Milimetre</i>
<i>MPa</i>	<i>Megapascal</i>
<i>N</i>	<i>Newton</i>
<i>PBT</i>	<i>Polibütilen Terapatalat</i>
<i>Psi</i>	<i>Pound square inch</i>
<i>PSU</i>	<i>Polysulfone</i>
<i>PTFE</i>	<i>Politetrafloroetilen</i>
<i>PUR</i>	<i>Poliüretan</i>
<i>PVC</i>	<i>Polivinil klorür</i>
<i>SAN</i>	<i>Stiren-akrilonitril</i>
<i>SEM</i>	<i>Scanning Electron Microscope</i>
<i>SMC</i>	<i>Sheet moulding compounds</i>
<i>TIG</i>	<i>Tungsten İnert Gaz</i>
<i>TRIP</i>	<i>Transformation Induced Plasticity</i>
<i>TWIP</i>	<i>Twinning Induced Plasticity</i>
<i>ULK</i>	<i>Uzaktan Laser Kaynağı</i>
<i>ULS</i>	<i>Uzaktan Laser Sistemi</i>
<i>YAG</i>	<i>Yttrium aluminium garnet</i>
<i>µm</i>	<i>Mikrometre</i>

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Malzeme-konstrüksiyon-imal usulü ilişkisi (Anık, 1991).....	7
Şekil 2.2 Kaynak kabiliyetini etkileyen ana ve alt unsurlar (Anık, 1991).....	8
Şekil 3.1 TIG kaynağının şematik görünümü (www.longevity-inc.com)	12
Şekil 3.2 TIG kaynağında kutuplama-akım-nüfuziyet ilişkisi (www.aluminium.matter.org.uk)13	
Şekil 3.3 MIG/MAG kaynağının şematik görünümü (www.aluminium.matter.org.uk)	14
Şekil 3.4 Özlü telle ark kaynağının şematik görünümü (www.weldingengineer.com).....	15
Şekil 3.5 Laser ışını oluşumu ve ışınla kaynak (www.aluminium.matter.org.uk)	16
Şekil 3.6 Uzaktan laser kaynağında ışın yönlendirmek için gerekli aparatların hareket yönleri z: mercek hareketi, α : tarama eksen, β : tarama eksen, Q: tarama aynasının hareketi, Δ : tarama aynası - mercek mesafesi (www.rofin.com).....	18
Şekil 3.7 Lehimleme işlemi adımları (www.chaneyelectronics.com).....	19
Şekil 3.8 Nokta direnç kaynağı şematik görüntüsü (www.aluminium.matter.org.uk).....	21
Şekil 3.9 Nokta kaynağı aşamaları	22
Şekil 3.10 Projeksiyon direnç kaynağı şematik görüntüsü (www.aluminium.matter.org.uk)..	22
Şekil 3.11 Saplama kaynağı şematik gösterimi, a) Kaynak öncesi b)Kaynak sonrası (www.aluminium.matter.org.uk)	23
Şekil 3.12 Dikiş direnç kaynağı gösterimi elektrotlar disk şeklindedir. (www.subtech.com) 24	
Şekil 3.13 araç yakıt deposu üretiminde elektrik direnç kaynağı kullanımı (Degarmo, P.E., vd., 1997)	25
Şekil 3.14 Sürtünen eleman ile kaynak (www.m-osaka.com).....	26
Şekil 3.15 Çizgisel sürtünme kaynağı şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.16 Titanyum ile çeliğin çizgisel sürtünme kaynağı.....	27
Şekil 3.17 Dönel sürtünme kaynağının basit gösterimi (www.cetic.be)	27
Şekil 3.18 Durağan parça ile hareketli parça arasındaki sürtünmenin meydana getirdiği ısı ile kaynak işlemi. (www.cetic.be).....	28
Şekil 4.1 Kaynak dikişine mesafe ile pik sıcaklıkları arasındaki yaklaşık ilişkiler ve Fe – C faz diyagramı. KM: kaynak metali, ITAB: ısı tesiri altındaki bölge, EM: esas malzeme.	30
Şekil 4.2 C15 veya C45 çeliğinin kaynakta tane yapısı değişimi (Dikicioğlu, 2006).....	31
Şekil 4.3 Kaynakta ITAB oluşumu. a) Maksimum kaynak sıcaklığındaki çelik yapısı b) Düşük sertleşebilirliğe sahip çeliğin soğuma sonrası yapısı (%C<0,2), c) Yüksek sertleşebilirliğe sahip çeliğin soğuma sonrası yapısı (%C>0,2), (Askeland ve Phule, 2004).	31
Şekil 4.4 Şekillenmiş allotropik malzeme (Dikicioğlu, 2006)	33
Şekil 4.5 Şekillenmiş allotropik olmayan malzeme (Dikicioğlu, 2006).....	34
Şekil 4.6 Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Malzeme (Nikel, Alüminyum, Bakır gibi) (Dikicioğlu, 2006).....	34
Şekil 4.7 Çökelme Sertleşmeli Alaşımların ITAB’ında çökelmelerin irileşmesi (Dikicioğlu, 2006)	35
Şekil 4.8 Çökelme ile sertleştirilmiş malzeme kaynak bölgesi (Dikicioğlu, 2006).	36
Şekil.5.1 Gövde konstrüksiyonda kullanılan malzemelerin üretim yöntemleri (www.aluminium.org.uk).....	39
Şekil 5.2 Ön taban kenarı, C sütunu takviyesi, koltuk girişinin ve akustik giriş’in şematik gösterimi (www.aluminium.org.uk).	40
Şekil 5.3 Gövde panellerinde kullanılan çelik saclar için sertleşme üsteli-akma dayanımı ilişkisi. BH; fırında sertleşen çelik, CMn; C-Mn çeliği. (www.steeluniversity.org).....	41

Şekil.5.4 Ultra düşük karbonlu tavlanmış IF çeliği a) % 3 Nitale dağlanmış 100X, b) % 3 Nitale dağlanmış 1000X, c) % 3 Nitale dağlanmış 1000X, d) % 3 Nitale dağlanmış 1000X SEM görüntüsü (Samuels, 1999).....	43
Şekil 5.5 Fırında Sertleşen çeliğin mikroyapısı (www.thyssenkrupp-steel.com).....	44
Şekil 5.6 a)Yalın karbonlu UNS G 10150 çeliği eş eksenli ferrit-perlit adaları 200X, b) haddelendiği şekliyle mikro alaşımlı çelik yapısı; eşeksenli ferrit ve bantlaşma 200X (Metals Handbook V09, 2004).....	45
Şekil 5.7 Ferrit –martenzit mikroyapısının şematik gösterimi (www.worldautosteel.org).....	46
Şekil 5.8 TRIP çeliğinin mikroyapısının şematik gösterimi (www.worldautosteel.org).....	47
Şekil 5.9 Tipik TWIP çeliği mikroyapıları a) Şekil değiştirmemiş b) 18% gerinmeli, c) 26% gerinmeli, d) 34% gerinmeli (www.msm.cam.ac.uk).....	48
Şekil 6.1 Direnç dikiş kaynağı için akım profilleri. A) ideal darbe şekli B) anlık darbe	61
Şekil 6.2 a) kabartıların merkezleri arasındaki mesafe, b) üst üste bindirme teması (Metals Handbook V06, 1993).....	62
Şekil 6.3 a)Sac metal içine sıkıştırma, b) saplamaya bağlama, c) kaplama-termal spreyleme (Metal Handbook V06, 1993).....	65
Şekil 6.4 Sabit akımlı güç kaynağı için akım-gerilim eğrisi (www.millerwelds.com).	66
Şekil 6.5 Sabit akımlı güç kaynağı için işlem çevrimi (www.millerwelds.com).	66
Şekil 6.6 Çizelge 6.7’de verilen ölçülerin gösterimi (www.millerwelds.com).	67
Şekil 6.7 Sürtünme parametrelerinin zamana bağlı değişimi (Metals Handbook V06, 1993).	69
Şekil 6.8 Düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için gerilim-akım ilişkisi (www.oerlikon.com.tr).....	71
Şekil 6.9 Düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için tel yığma hızı-akım ilişkisi (www.oerlikon.com.tr).....	72
Şekil 6.10 Gaz üflenerek plazmanın süpürülmesi ve anahtar deliği oluşumu (Chang, 2007)..	74
Şekil 6.11 Laser ışını için İrtifa açısının ve Azimuth açısının gösterimi (Tarui vd. ,2007)	75
Şekil 6.12 Kaynak dikişinin genişliği ve derinliği-temas açısı (Chang, 2007).	75
Şekil 6.13 İrtifa açısının değişimiyle nüfuziyet derinliğinin ve dikiş genişliğinin değişimi (Tarui vd ,2007)	76
Şekil 6.14 a)İrtifa açısının ve Azimuth açısının 90 ⁰ olduğu durum, b) İrtifa açısının 40 ⁰ , Azimut açısının 90 ⁰ olduğu durum (Tarui ve Hasegawa ve Mori, 2007).....	76
Şekil 6.15 Laser gücü, temas açısı ve ışının ilerleme hızına bağlı olarak nüfuziyet derinliğinin değişimi (Chang, 2007).....	77
Şekil 6.16 farklı nüfuziyet derinlikleri için optimum kaynak parametreleri (Chang, 2007).	78
Şekil 7.1 Yük taşıyıcı kiriş ve taban panelinin bilgisayar destekli tasarımı	80
Şekil 7.2 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesini uzaktan laser kaynağı için ölçülendirilmesi. Laser dikişi 20 mm uzunluğundadır.	80
Şekil 7.3 Uzaktan laser dikişinin gerçek görüntüsü	81
Şekil 7.4 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesini nokta kaynağı için ölçülendirilmesi. nokta çapı 7 mm dir.	81
Şekil 7.5 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesinin nokta kaynağı gerçek görüntüsü....	82
Şekil 7.6 Laser ve TIG kaynağının dikiş profili	82
Şekil 7.7 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesinin TIG kaynağı ve Laser kaynağı gerçek görüntüsü.....	83
Şekil 7.8 Standart marka mekanik testere	83
Şekil 7.9 Metalografik hazırlık cihazları a) Zımparalama cihazı b) Parlatma cihazı	84
Şekil 7.10 HILGER Analytical marka Optik Emisyon Spektrometresi.....	85
Şekil 7.11 Sac malzeme kalınlığının kumpasla ölçülmesi	85
Şekil 7.12 Tarama elektron mikroskobu (JEOL 5410 LV)	86
Şekil 7.13 Makaslama	87
Şekil 7.14 Makasla kesilen sacın incelenen kısmı lacivertle gösterilmiştir.	87

Şekil 7.15 Mikrovickers sertlik cihazı.....	88
Şekil 7.16 Mekanik testere ile kaynak numunesinin çıkarılması	89
Şekil 7.17 Kaynak dikişinin enine kesitinin çıkarılması	89
Şekil 7.18 Kaynak bölgesi enine kesiti.....	90
Şekil 7.19 Kaynak dikişinde SEM incelemesi. EM; Esas (ana) malzeme, ITAB; ısı tesiri altındaki bölge, KD; kaynak dikişi.	91
Şekil 7.20 Kaynak dikişinde sertlik ölçümü.....	91
Şekil 8.1 Düşük karbonlu çelik üzerindeki çinko kaplamanın kalınlığının ölçülmesi	93
Şekil 8.2 Ana malzemenin görüntüsü 25 kV, 500X	93
Şekil 8.3 a)Ana malzeme, b)Ana malzeme ile Kaynak bölgesinin geçişi 350X	94
Şekil 8.3 (Devamı) c) Ana malzeme-Geçiş bölgesi-Kaynak noktası 350 X, d) Ana malzeme- Geçiş bölgesi-Kaynak noktası 500 X.....	95
Şekil 8.3 (Devamı) e) Kaynak noktası 500X, f) Kaynak noktası 1500X	95
Şekil 8.4 a)Ana malzeme 500X, b) Ana malzeme ile ITAB'ın geçişi 500X	96
Şekil 8.4 (Devamı) c) ITAB 500X, d) ITAB-Kaynak dikişi geçişi 350 X.....	97
Şekil 8.4 (Devamı) e) Kaynak dikişi 500X , f) Kaynak dikişi 1000X	97
Şekil 8.5 a)Ana malzeme 500 X, b)Ana malzeme-ITAB-Kaynak dikişi 500X	98
Şekil 8.5 (Devamı) c) Ana malzeme-ITAB-Kaynak dikişi 500X, d) ITAB-Kaynak dikişi 1000X.....	99
Şekil 8.5 (Devamı) e) Kaynak dikişi 500X	99
Şekil 8.6 Uzaktan Laser kaynaklı malzeme kaynak bölgesi a)Ana malzeme 500 X, b)Ana malzeme-ITAB geçişi 500 X	100
Şekil 8.6 (Devamı) c)ITAB 500 X, d)ITAB-Kaynak dikişi geçişi 500 X.....	101
Şekil 8.6 (Devamı) e) Kaynak dikişi 500 X	101
Şekil 8.7. Kırılma yüzeyleri, a)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 200X, b)ULK kırılma yüzeyi 200X.....	102
Şekil 8.7. (Devamı) c)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 500X, d)ULK kırılma yüzeyi 500X.....	103
Şekil 8.7. (Devamı) e)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 1000X, f)ULK kırılma yüzeyi 1000X ..	103
Şekil 8.7. (Devamı) g)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 2000X, h)ULK kırılma yüzeyi 2000X, ..	104
Şekil 8.7. (Devamı) i)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 5000X, j)ULK kırılma yüzeyi 5000X ...	104
Şekil 8.8 Kaynak dikişinin sertliğinin dikine taranması.....	105
Şekil 8.9 Kaynak dikişinin sertliğinin enine taranması	105
Şekil 8.10 Nokta kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi.....	106
Şekil 8.11 TIG kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi.....	107
Şekil 8.12 Laser kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi.....	107
Şekil 8.13 Uzaktan laser kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi.....	108

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Levha kalınlığına bağlı olarak seçilen akım ve kaynak hızı (Anık, 1991).....	25
Çizelge 5.1 Kaporta ve panel malzemesi olarak kullanılabilen malzemelerin özellikleri.....	38
Çizelge 5.2 Aracın farklı bölgelerinde kullanılan malzemeler için seçim kriterleri	40
Çizelge 5.3 Tipik bir IF çeliği bileşimi	42
Çizelge 5.4 Tipik bir IF 260 çeliğin kimyasal bileşimi(www.steeluniversity.org)	44
Çizelge 5.5 Sürekli olarak tavlanmış BH210 Tipi çeliğin kimyasal bileşimi (www.steeluniversity.org).....	45
Çizelge 5.6 Nb ile alaşımlandırılmış tipik HSLA çeliğinin kimyasal bileşimi (www.steeluniversity.org).....	46
Çizelge 5.7 Soğuk haddeli ve sıcak haddeli çift fazlı çeliklerin tipik kimyasal bileşimi (www.steeluniversity.org).....	47
Çizelge 5.8 Farklı tipteki TRIP çeliklerinin kimyasal bileşimleri (www.steeluniversity.org).	47
Çizelge 5.9 Otomobillerde plastik bileşenlerinin kullanım alanları (Yadeli, 2005).....	49
Çizelge 5.9 (Devamı) Otomobillerde plastik bileşenlerinin kullanım alanları (Yadeli, 2005).	50
Çizelge 5.10 Araç motorlarında kullanılan malzemeleri ve kullanım yerleri (Gönül 2001, Özdemir 2001).	51
Çizelge 5.11 Radyatörde kullanılan Al malzemenin kimyasal içeriği (Gönül 2001, Özdemir 2001).	52
Çizelge 5.12 Şasi de kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül 2001, Özdemir 2001).	53
Çizelge 5.13 Gövde panellerinde kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).	53
Çizelge 5.13 (Devamı) Gövde panellerinde kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).	54
Çizelge 5.14 Aktarma organlarında kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).	54
Çizelge 5.15 Aktarma organlarında kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül 2001, Özdemir, 2001).	55
Çizelge 5.16 Fren sisteminde kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).	55
Çizelge 6.1 Kaynak parametreleri için hedef değerler (www.robot-welding.com).	56
Çizelge 6.1 (Devamı) Kaynak parametreleri için hedef değerler (www.robot-welding.com).	57
Çizelge 6.2 Düşük karbonlu çeliklerin projeksiyon direnç kaynağı için işlem gereklilikleri (Metals Handbook V06, 1993)	63
Çizelge 6.3 Farklı sayıdaki kabartı için kaynak parametreleri, A:tek bir kabartı, B:1 ile 3 tane kabartı, C:3 kabartı olduğu durumdaki parametreleri belirtir (Metals Handbook V06, 1993).	64
Çizelge 6.4 Saplama çapına göre gaz debisi, koruyucu gaz %99,95 saflıkta Argon.....	65
Çizelge 6.5 Çeliklerin saplama kaynağı için tavsiye edilen parametreler (www.millerwelds.com).	67
Çizelge 6.6 Saplama özellikleri belirleme tablosu (ölçüler inch cinsinden)	68
Çizelge 6.7 Yumuşak ve düşük karbonlu çelikler için TIG kaynağı parametreleri (www.ckworldwide.com).	73
Çizelge 8.1 Düşük karbonlu çeliğinin kimyasal analizi	92

ÖNSÖZ

Çalışmalarım ve araştırmalarım boyunca tezimin gelişmesinde yardımlarını ve hoşgörüsünü eksik etmeyen ve yaptığı olumlu eleştirilerle tezimin bu aşamaya gelmesini sağlayan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ahmet KARAASLAN'a öncelikle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca manevi desteğini benden hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve hayat arkadaşım Met.Yük.Müh. Zeynep Nihan Yadelî'ye minnettarlığımı belirtir, teşekkürlerimi sunarım.

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ BİRLEŞTİRMELERDE SEÇİLEN KAYNAK PARAMETRELERİ ve KULLANILAN TEKNOLOJİLER: GELENEKSEL YÖNTEMLER ve LASER TEKNİĞİ

ÖZET

Otomotiv sektöründe gövde üretiminde kullanılan soğuk haddeli, düşük karbonlu çelik dört farklı yöntemle belirlenen parametreler doğrultusunda kaynak edilmiştir. Bu yöntemler; nokta direnç kaynağı, TIG kaynağı, laser kaynağı ve uzaktan laser kaynağıdır.

Kaynak edilen numuneler metalografik hazırlık sonrasında SEM incelemesine tabi tutulmuştur. Kaynak bölgesinde sertlik taraması yapılarak kaynak bölgesinin dayanımı ortaya konmuştur. TIG ve uzaktan laser kaynaklı numuneler kaynak dikişlerinden kırılarak kırılma yüzeyleri de SEM’de incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda tüm yöntemlerde de kaynak dikişinde martenzit oluştuğu görülmüştür. En yüksek sertlik uzaktan laser kaynağı ile birleştirilmiş düşük karbonlu çelik numunesinde elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda otomotiv sektöründe kullanılan geleneksel yöntemlerle modern yöntemler karşılaştırılmıştır ve modern yöntemlerin iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv, kaynak, laser kaynağı, düşük karbonlu çelik, mikroyapı

SELECTED WELDING PARAMETERS and USED TECHNOLOGIES FOR JOINING IN AUTOMOTIVE SECTOR: TRADITIONAL METHODS and LASER WELDING

ABSTRACT

Cold rolled low carbon steel which is used in automotive industry for body manufacturing, has been welded by four different methods through the parameters specified. These methods are: resistance spot welding, TIG, laser and remote laser welding.

Welded specimens were subjected to the SEM investigation after metallographic preparation. Strength of the weld zone is revealed by hardness measurement in that zone. Fractured surfaces of the weld seams of TIG and remote laser welded specimens have been interpreted by SEM investigation. As a result of the microstructure investigations, martensite has seemed in each type of specimen welded by different methods. Highest hardness values have been obtained in remote laser welded specimen.

Traditional methods and modern methods have been compared through the results obtained and proposals to develop modern methods have been submitted.

Keywords: Automotive, welding, laser welding, low carbon steel, microstructure

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde yakıt ekonomisi uygulaması, araç üretiminde kullanılan malzemeleri de etkilemiştir. Yakıt ekonomisi fikri araç üreticilerini dayanımda yüksek, ağırlıkta hafif malzemeler üreterek ve kullanarak gerçekleştirebilmektedir. Ancak üretim olgusu salt olarak malzemelerin seçimiyle tamamlanamamaktadır. Bu noktada malzemelerin daha üretim aşamasındaki özellikleri, geçirdiği işlemler, şekillendirilme yöntemleri, şekillenmiş malzemelerin birleştirilmesi, birleştirme sonrası işlemler, kalitesi ve kalitenin kontrolü, üretim olgusunu oluşturan ana öğelerdir. Günümüzdeki gelişmiş teknoloji sayesinde yüksek kaliteli ve hızlı üretim yapmak mümkündür. Geçmiş tecrübeler ve mühendislik uygulamalarındaki istatistiksel değerlendirmeler sonucunda kalitenin kontrol altına alınabilmesi ve dolayısıyla kalitenin güvencesi mümkün olmuştur.

Bu çalışmada amaç üretimdeki hızın çok önemli olduğu otomotiv sektöründe yapılan birleştirmelerdeki kaynak parametrelerini belirlemektir. Parametreler belirlenirken TIG, ve nokta kaynağı gibi konvansiyonel yöntemlerle laser ve uzak laser gibi modern yöntemleri uygulama üzerinden karşılaştırmak söz konusudur. Dokuz bölüm olarak hazırlanan bu çalışmada;

Birinci bölüm çalışmanın giriş bölümü olmak üzere ikinci bölümde kaynak teriminin tanımı, önemi, diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırılması, çeşitli olgular göz önüne alınarak sınıflandırılması ve kaynak kabiliyetinin tanımı verilmiştir.

Üçüncü bölümde otomotiv sektöründe kullanılan kaynak yöntemleri ergitme esaslı yöntemler ve elektrik esaslı yöntemler olarak iki farklı başlık altında verilmiştir, yöntemler detaylı olarak anlatılmış temel kavramlardan bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde kaynak metalurjisine yer verilmiştir. Allotropik malzemelerin ergitme kaynağı, allotropik olmayan şekillenmiş malzemelerin kaynağı, allotropik ve şekillenmiş malzemelerin kaynağında görülen değişimlerden bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde otomotiv sektöründe kullanılan malzemeler iki gruba ayrılarak; otomotiv sektöründe kullanılan metalik malzemeler ve otomotiv sektöründe kullanılan plastik malzemeler olarak verilmiştir.

Altıncı bölümde ise otomotiv sektöründe kullanılan metal malzemelerin özelliklerine göre kaynak parametreleri elektrik esaslı ve ergitme esaslı olarak irdelenmiştir.

Yedinci bölümde deneysel çalışmalar sekizinci bölümde deneysel çalışmaların sonuçları verilirken dokuzuncu bölümde ise genel sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK

Birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini beraber kullanarak aynı cinsten veya yaklaşık ergitme aralığında ilave malzeme katarak veya katmadan yapılan birleştirme yada dolgu işlemine kaynak denir. Kaynak uygulanacağı malzemenin cinsine göre, metal kaynağı ve plastik malzeme kaynağı olarak ele alınır.

Metal kaynağı: metalik malzemeyi ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak ve aynı cinsten ve ergime aralığı aynı veya yaklaşık bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye metal kaynağı adı verilir. İki parçanın birleştirilmesinde ilave bir malzeme kullanılırsa, bu malzemeye ilave metal adı verilir.

Plastik malzeme kaynağı: aynı veya farklı cinsten termoplastik malzemeyi ısı ve basınç kullanarak ve aynı cinsten bir plastik ilave malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye, plastik malzeme kaynağı adı verilir (Anık, 1991).

2.1 Kaynağın Önemi

Parçaların kaynakla birleştirilmesinin öneminin kavranabilmesi için, diğer imal usulleriyle karşılaştırılması gerekir. Her ne kadar her usulün üstün olduğu sahalar varsa da, birbirine çok yakın olduğu sahalar uygulamalar da vardır (Anık, 1991).

2.2 Kaynak ile Perçinin Karşılaştırılması

Parçaların birleştirilmesinde eski bir yöntem olmasına rağmen, kaynağın öneminin bilinebilmesi bakımından perçinle kaynağın karşılaştırılması uygun olacaktır.

- Kaynak, ağırlık ve işçilikten tasarruf sağlar. Ağırlıktan sağlanan tasarruf, %10 ila 30 arasındadır. İşçilikten sağlanan tasarruf ise, %25–35 civarındadır.
- Kaynak ile perçine göre daha iyi bir sızdırmazlık elde edilir.
- Kaynaklı bağlantıların dayanımı, perçinli birleştirmelerden daha yüksektir. Perçinde esas malzemenin dayanımına erişilememesine rağmen, Kaynakta %100'üne erişilir.
- Kaynak ile perçine göre daha kolay ve ucuz bağlantılar elde edilir.
- Gemi inşaatlarında kaynaklı birleştirmelerin suya karşı dirençleri daha azdır. Dolayısıyla geminin hızını azaltmazlar (Anık, 1973).

2.3 Kaynak ile Dökümün Karşılaştırılması

- Kaynakta model masrafı yoktur.
- Cidar kalınlıkları 6 mm'den az olan parçaların dökümü güçlük arz ederken, kaynakla imalatında zorluk yoktur.
- Çelik malzemelerden dökümle parça yapımında bazı zorluklar ortaya çıkarken, aynı parçanın kaynakla imalatı kolaydır
- Kaynak, döküme göre ağırlık tasarrufu sağlar. Ağırlıktan sağlanan kazanç %30 civarındadır.
- Çok sayıda üretimde, döküm daha üstündür (Anık, 1973).

2.4 Kaynağın Sınıflandırılması

Kaynak metotlarını çeşitli bakımlardan sınıflandırmak mümkündür. Temel olarak kaynaklanan malzemenin cinsine, kaynak sırasında tatbik edilen işlemlere ve kaynak işleminin amacına göre sınıflandırma yapılır (Anık, 1991).

2.4.1 Kaynağı Uygulandığı Malzemeye Göre Sınıflandırma

Kaynak uygulandığı malzeme cinsine göre “metal kaynağı” ve “plastik malzeme kaynağı” olmak üzere ikiye ayrılır.

2.4.2 Kaynağı Amacına Göre Sınıflandırma

Kaynak yapılış amacına göre de “birleştirme kaynağı” ve “doldurma kaynağı” diye ikiye ayrılır.

- Birleştirme kaynağı; iki veya daha fazla parçayı çözülmez bir bütün haline getirmek için kaynak yapmaktır.
- Doldurma kaynağı; bir iş parçasının hacmindeki eksikliği tamamlamak veya hacmini büyütmek, ayrıca korozyona veya aşındırıcı etkilere karşı korumak amacıyla üzerinde sınırlı bir alan dâhilinde malzeme kaynak etmektir. Örneğin; kaplama; zırlama ve tampon tabaka kaplama doldurması gibi.

2.4.3 Kaynağı Yöntemine Göre Sınıflandırma

Kaynak gerçekleştirilmesi sırasında izlenen yola göre dörde ayrılır. Bunlar el kaynağı, yarı mekanize kaynak, tam mekanize kaynak ve otomatik kaynaktır.

- El kaynağı; Kaynak, yalnız el ile sevk edilen bir kaynak aleti sayesinde yapılır.
- Yarı mekanize kaynak; Kaynak aleti, el yerine kısmen mekanize edilmiş bir araç ile sevk edilir.
- Tam mekanize kaynak; Kaynak aleti, el yerine tamamen mekanize edilmiş bir makine ile sevk edilir.
- Otomatik kaynak; Gerek kaynak işlemi, gerekse iş parçasının değiştirilmesi gibi bütün ana ve yardımcı işlemler tam olarak mekanize edilmiştir.

2.4.4 Kaynağı İşlemin Cinsine Göre Sınıflandırma

- Ergitme kaynağı; Malzemeyi yalnız sıcaklığın etkisiyle bölgesel olarak (sınırlandırılmış bir kısmını) ergitip, bir ilave metal katarak veya katmadan birleştirmektir.
- Basınç kaynağı; malzemeyi genellikle ilave metal katmadan basınç altında bölgesel olarak ısıtıp birleştirmektir (Anık, 1991).

2.5 Metal Kaynağı

Metal kaynağı, “ergitme kaynağı” yöntemleri ve “basınç kaynağı” yöntemlerinden ibarettir.

2.5.1 Ergitme Kaynağı Yöntemleri

Ergitme kaynak yöntemleri; döküm ergitme kaynağı, elektrik direnç ergitme kaynağı, gaz ergitme kaynağı, elektrik ark kaynağı, karbon arkı ile kaynak, metal arkı ile kaynak ve koruyucu gazla kaynak yöntemlerini içermektedir.

Koruyucu gazla kaynak kendi içinde TIG ve MIG olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. TIG kaynağı;

- Normal TIG kaynağı
- Plazma TIG kaynağı
- Ark Atom kaynağı

MIG yöntemi ise;

- Normal MIG kaynağı
- Aktif gazla MIG kaynağı (MAG)

şeklinde alt dallara ayrılmaktadır (Anık, 1991).

2.5.1.1 Ergitme Kaynağında Kaynak Kabiliyeti

Kaynak kabiliyeti kesin ve kantitatif olarak ifade edilebilen bir özellik olmayıp, karmaşık bir anlam taşır. Uluslararası Kaynak Enstitüsünün IX numaralı “ Kaynak Kabiliyeti” Komisyonu; kaynak kabiliyetini şöyle tanımlamaktadır;

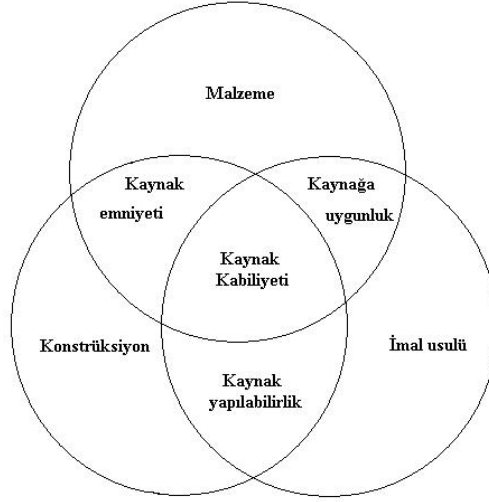
“Bir metalik malzeme, verilen bir yöntem ile bir amaç için bir dereceye kadar kaynak yapılabilir diye kabul edilir. Uygun bir yöntem kullanarak kaynaklı metalik bağlantı elde edildiği zaman, bağlantı yerel özellikleri ve bunların konstrüksiyona etkileri bakımından belirlenmiş bulunan şartlar sağlanmalıdır. Tanımdan da anlaşılacağı gibi kaynak kabiliyeti yalnız malzemeye bağlı bir özellik değildir. Aynı zamanda kaynak yöntemine ve kaynaklı konstrüksiyona da bağlıdır. Bir metal veya alaşım bir kaynak yönteminde gayet iyi derecede bir kaynak kabiliyeti göstermesine rağmen diğer bir yöntemde zayıf bir kaynak kabiliyetine sahip olabilir (Anık, 1975).

Bir malzemenin yüksek kaynak kabiliyetine sahip olması; kaynak şartları geniş bir aralıkta değişirken hiçbir tedbire gerek kalmadan tatminkâr bir kaynak kalitesinin elde edilebilmesi demektir.

Düşük derecede kaynak kabiliyeti tatminkâr bir netice alabilmek için özel tedbirler ihtiyaç olduğunu ve kaynak şartlarının çok dar sınırlar arasında tutulmasının gerektiğini ifade eder.

Kaynak kabiliyetinin derecesini belirten özellikler malzemenin tipine göre değişir örnek olarak; birçok çelik malzemenin kaynağında iyi mekanik özellikler elde etmek istenirken, östenitik paslanmaz çeliklerde ısının tesiri altındaki bölgenin korozyona dayanıklı olması istenir.

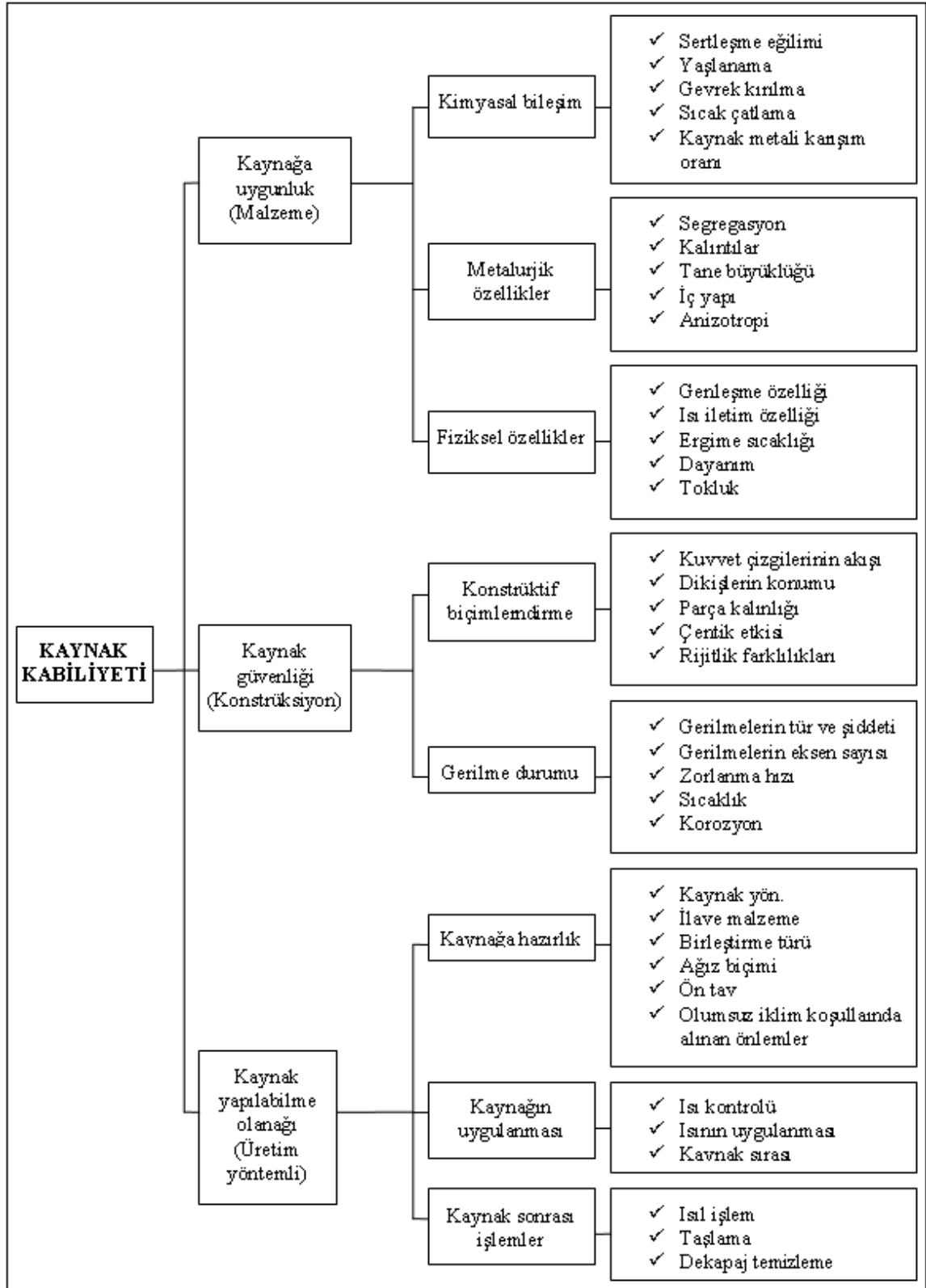
Kaynak kabiliyeti deyimi kaynağa elverişlilik, konstrüksiyonun kaynak emniyeti ve üretimde kaynak yapılabilme kavramlarını içine alır. Bu kavramlarda malzeme, imal usulü ve konstrüksiyonun etkisi altındadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Malzeme-konstrüksiyon-imal usulü ilişkisi (Anık, 1991)

Bir malzemenin kaynak kabiliyetinden söz edebilmek için en azından aşağıdaki iki şart gerçekleşmelidir.

- Parçaların belirli bir kaynak usulü ile birleştirilebilmesi mümkün olmalıdır. (Kaynağa elverişlilik deyimi).
- Kaynak edilen malzeme, maruz kalacağı zorlamalara dayanmalıdır (Kaynak emniyeti)



Şekil 2.2 Kaynak kabiliyetini etkileyen ana ve alt unsurlar (Anık, 1991)

Şekil 2.2’de kaynak kabiliyetini etkileyen ana unsurları oluşturan alt unsurlar gösterilmiştir. En alt seviyedeki unsurların oluşturduğu grup bir üst seviyedeki unsurları oluşturmaktadır. Bir

üst seviyedeki unsur grupları da kaynak kabiliyeti için ana unsurları oluşturmaktadır (Anık, 1991).

Bir konstrüksiyonun kendisinden beklenenleri sağlaması malzeme, konstrüksiyon, imal usulü ve işletme zorlamaları gibi faktörlerini etkisi altındadır. Hatalı bir durum ortaya çıktığı zaman, bütün kusur malzemeye yüklenemez. Diğer faktörler de göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle; kaynak konstrüktörü, malzeme mühendisi ve işletme mühendisi birlikte çalışmak mecburiyetindedir. İyi tasarlanmış bir konstrüksiyon, seçilen malzeme ile bir dereceye kadar gerçekleştirilebilir. Fakat bu konstrüksiyonun bekleneni tam olarak verebilmesi için, uygun bir imal usulünün de seçilmesi gerekir.

Pratikte kaynak kabiliyetinin ifadesi olarak “iyi kaynak edilebilir”, “kaynak edilebilir” ve “şartlı olarak kaynak edilebilir” deyimleri kullanılır. Bu deyimlerin anlamları çelik malzeme için şöyle ifade edilebilir.

- a) İyi kaynak edilebilir: Malzemenin hiçbir ön ve nihai tavlamaya ihtiyaç olmadan kaynak edilebileceğini ifade eder.
- b) Kaynak edilebilir: Kaynak yapılacak malzemenin kalınlığının arttıkça, bir ön tavlama gerekir. Bu tür malzeme için, kaynak edilebilir deyimini kullanılır.
- c) Şartlı olarak kaynak edilebilir: Bu tür malzemede ya karbon oranı yüksektir veya bileşiminde çeşitli alaşım elemanları vardır. Kaynaklı bağlantının geçiş bölgesinde sertleşme ve çatlama tehlikeleri nedeniyle, özel tedbirler alınmalıdır. Ön tavlama uygulanmalı ve soğuma kontrollü olmalıdır (Baggerud, 1966).

2.5.2 Basınç Kaynağı Yöntemleri

Basınç kaynağı yöntemleri; soğuk basınç kaynağı, ultrasonik kaynak, sürtünme kaynağı, ocak kaynağı, döküm basınç kaynağı, gaz basınç kaynağı, elektrik direnç kaynağı, elektrik ark basınç kaynağı ve difüzyon kaynağını içermektedir (Anık, 1991).

2.6 Plastik Malzeme Kaynağı

Plastik malzeme kaynağı; aynı ve farklı cinsten termoplastik malzemeyi ısı ve basınç kullanarak aynı cinsten bir plastik malzemeye ilave ederek veya etmeden birleştirme işlemidir.

Kaynak işlemi, kaynak yapılacak malzemelerin birbirine temas eden yüzeylerinin sıcaklığı sıcak plastik hale gelme sıcaklığına yükselterek yapılır. Bu esnada sınır yüzeylerindeki serbest hareketli molekül zincirleri birbiri içerisine akarak kümeleşirler.

Plastik malzeme kaynak yöntemleri; sıcak gaz kaynağı, direkt-indirekt sıcak eleman kaynağı, sürtünme kaynağı, yüksek frekans kaynağı ve ultrasonik kaynaktır (Anık, 1991).

2.7 Lehimleme

İki veya daha fazla metalik malzeme, kendileri ergimeden ergime derecesi daha aşağıda bulunan bir ilave metalin (lehim alaşımının) ergimesiyle birleşirse, bu işleme “lehimleme” adı verilir. Lehimleme işlemi yapılırken ayrıca bir dekapan kullanılır (Anık, 1991).

3. OTOMOBİL ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Otomobil endüstrisi, kaynak işlemlerinin, malzemelerin, kaplamaların ve tasarımların bir dizi kombinasyonundan istifade etmektedir. Bu faktörlerin birçok muhtemel kombinasyonu, üretim işlemi içerisinde güçlükler kaçınılmazdır. Ancak, ilk tasarım safhasında özenli bir çalışmayla birçok problem bertaraf edilebilir. Tasarım mühendisleri planlanan tasarıma uyum ve performansı maksimuma çekmek için dayanım, çarpışma güvenliği ve yorulma direnci gibi yapısal gereksinimlerin yanında korozyon direnci ve bitirme gibi görünüm gereksinimlerini de hesaba katarak malzeme-birleştirme tekniğinin en verimli kombinasyonunu belirleyebilmelidir.

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan birleştirme işlemleri aşağıdaki yöntemlerdir. Ancak sektör bunlarla sınırlı değildir;

- Nokta direnç kaynağı
- MIG/MAG kaynağı
- TIG kaynağı
- Özlü telle ark kaynağı
- Projeksiyon direnç kaynağı
- Saplama kaynağı
- Laser ışın kaynağı
- Dikiş direnç kaynağı
- Sürtünme kaynağı
- Sert lehimleme
- Yumuşak lehimleme
- Plastik kaynağı

Bu işlemler otomotiv endüstrisinin bizzat kendisi tarafından yada sektör içerisindeki tedarikçileri tarafından uygulanmaktadır. Her iki şekilde de bütün birleştirme teknikleri, tekniğin doğru şekilde belirlendiğini ve uygulandığını bir dizi standartla güvence altına almaktadır.

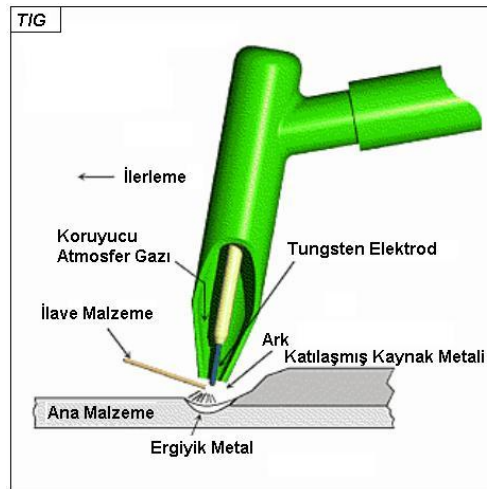
Otomotiv sektöründeki kaynak işlemleri sınıflandırılacak olursa en mantıklı sınıflandırma şekli yöntemleri ergitme esaslı yöntemler ve basınç esaslı kaynak yöntemleri olarak ikiye ayırmaktır (Metals Handbook V06, 1993).

3.1 Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri

Ergitme esaslı kaynak yönteminde metallerin ısı uygulamasıyla ergitilmesi söz konusudur. Bu işlem kaynak havuzuna beslenen tükenbilir elektrot yada tel beslemesini de içerebilir. Bu işlemler aynı zamanda atmosfer ve ergiyik metal arasında gaz kalkanı yada kaynak metali üzerinde ergiyerek viskoz bir cüruf olan ve işlem sonrasında katılaşp kazınabilen flaks şeklindeki koruyucu bir katman kullanmaktadır. Kullanılabilecek birçok farklı ergitme kaynak çeşidi mevcuttur (www.matter.org.uk).

3.1.1 TIG Kaynağı

TIG kaynağı, sıradan örtülü elektrotların kullanımının dışında geliştirilen ilk kaynak yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde tungstenden yapılmış bir elektrot, özel bir tutucu içine yerleştirilir. Tutucunun içinden akan inert (soy) gaz (argon, helyum ve bunların karışımı), ark ve ergimiş kaynak banyosu çevresinde koruyucu bir örtü oluşturur. Bu inert ortamda çalışan (genellikle daha iyi akım iletimi sağlamak ve elektron emisyon karakteristikleri oluşturmak üzere toryum veya zirkonyumla alaşımlandırılan) tungsten elektrot ark sıcaklığında erimez. Ark boyu sabit kalır, böylece kararlılığı sürdürülebilir (Çiğdem, 1996).

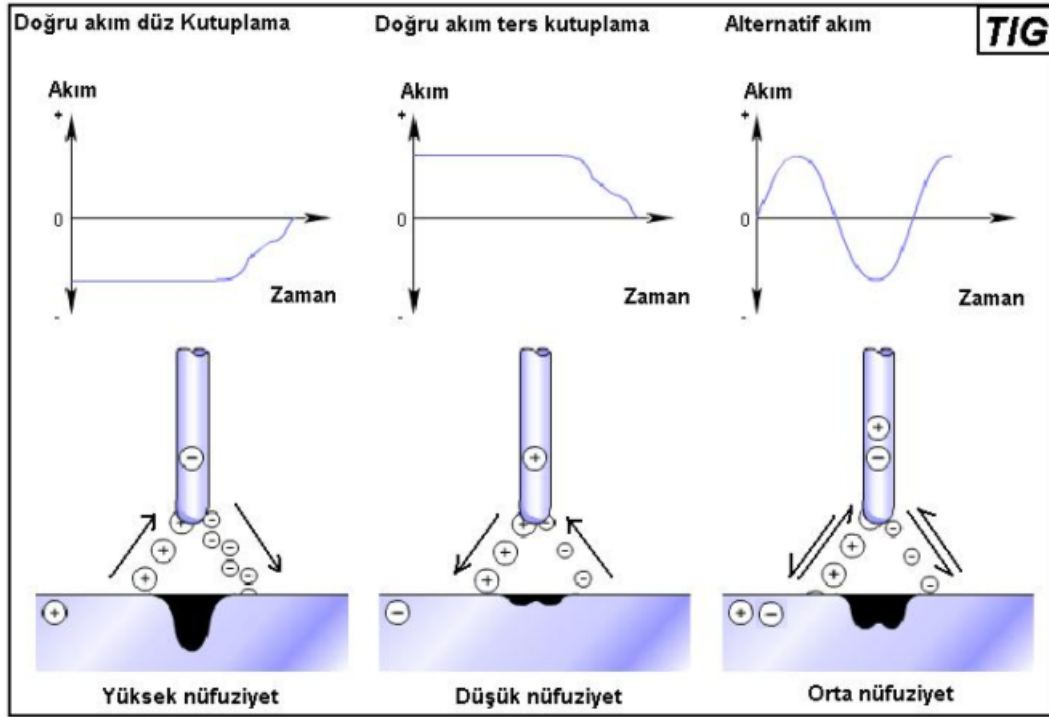


Şekil 3.1 TIG kaynağının şematik görünümü (www.longevity-inc.com)

Eğer kaynak yapılacak parçalar birbirine yakın yerleştirilmişse, ilave metal gerekmebilir. İlave metal kullanıldığında ise, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, ayrı bir tel olarak kaynak bölgesine sevk edilir. İlave metal genellikle kaynak yapılan metalle kimyasal bileşim bakımından uyumlu olarak seçilir. Yüksek yığıma hızlarının istendiği durumlarda, ilave tele ön tavlama uygulamak için ayrı bir ısıtıcı direnç devresi kullanılır. Ancak bakır ve alüminyumun kaynağındaki ilave telin düşük direnci nedeniyle sıcak tel işlemi uygulamaya

yatkın değildir.

Becerisi yüksek kaynakçıların yaptığı uygulamalarda TIG kaynağı zorlukla görülebilen kaynaklar oluşturur. Ayrıca yöntem, son derece temiz kaynaklar üretir. Herhangi bir dekepan kullanılmadığından, özel bir temizleme veya cüruf kaldırma işlemine gerek yoktur. Ancak kaynak edilecek yüzeyler temiz olmalı ve inert gaz temizleme veya dekepan etkisi yapmadığından yağ, gres, boya veya pas içermemelidir.



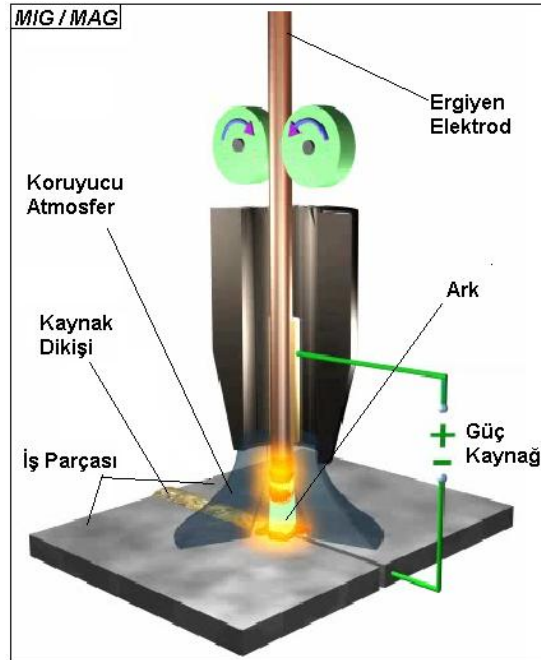
Şekil 3.2 TIG kaynağında kutuplama-akım-nüfuziyet ilişkisi (www.aluminium.matter.org.uk)

Bu yöntemle tüm metaller ve alaşımları kaynak yapılabilir. Soy gaz, bu yöntemi özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi reaktif metaller ve ayrıca yüksek sıcaklık reaktif metalleri için özellikle çekici kılmaktadır. Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi maksimum nüfuziyet, Doğru Akım Düz Kutuplama koşulunda elde edilir; ancak alternatif akım (alüminyum kaynağındaki gibi) yüzey oksitlerinin temizlenmesi için gerekebilir. Ters kutuplama tungsten elektrotun ergimesine yol açabildiğinden nadiren kullanılır. Kaynak gerilimi tipik olarak 20 ila 40 V arasında olup kaynak akımı Ters Kutuplama Doğru Akım için 125 Amper’den düşük, Düz Kutuplama Doğru Akım için 1000 Amper’e kadar çıkabilir. Yüksek frekanslı yüksek gerilimli alternatif akım, çoğu kez arkı başlatma ve sürdürmek için düzenli alternatif akım veya doğru akımının üzerine bindirilir (Çiğdem, 1996).

3.1.2 MIG/MAG Kaynağı

MIG/MAG kaynağı, TIG kaynağı mantığının dışında gelişmiş bir kaynak yöntemidir. İşlem benzer özellikler taşır ancak bu yöntemde ark, parça ile otomatik olarak beslenen bir çıplak elektrot arasında yanar. Şekil 3.3' de gösterildiği gibi ergiyen elektrot ilave metal görevi yapar; bu nedenle ayrıca bir tel beslemesine gerek kalmaz. Argon, helyum veya bunların karışımları, tüm metaller için kullanılabilir ancak özellikle demir dışı metallerin kaynağında kullanılmaktadır. Çelik kaynağında ark kararlılığını arttırmak ve sıçrama miktarını azaltmak için bir miktar O_2 ve CO_2 eklenir. CO_2 'nin ucuz oluşu, deoksitleyici bir elektrot teli kullanıldığı takdirde, çeliğin kaynağında tek başına kullanılmasını sağlamıştır (Çiğdem, 1996).

Özel koruyucu gazlar, elektrottan parçaya metal geçişinin yapısını büyük oranda etkiye sahiptir. Ayrıca ısı geçiş davranışını, nüfuziyeti ve yanma oluğu oluşturma eğilimini etkileyebilmektedir. Metal geçişini, sprej geçişten kısa devre geçişe doğru damla oluşumunu kontrol etmek üzere kaynak akımını değiştirmek için çeşitli tip elektronik kontroller kullanılabilmektedir. Bazı yöntem değişiklikleri, darbeli ark kaynağı, kısa devre ark kaynağı ve sprej geçiş kaynağıdır. Küresel ark kaynağı (uzun ark olarak da bilinir), özellikle karbondioksitçe zengin gaz kullanılan bir yöntemdir.

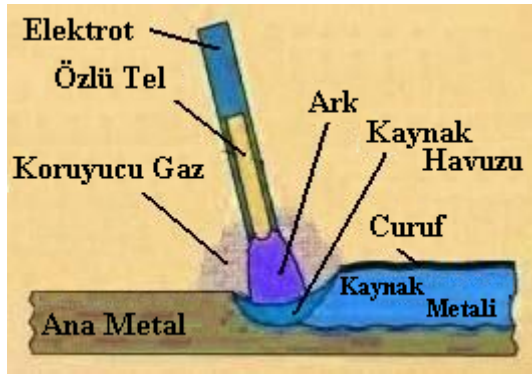


Şekil 3.3 MIG/MAG kaynağının şematik görünümü (www.aluminium.matter.org.uk)

MIG/MAG kaynağı hızlı ve ekonomiktir. Elektrik ark kaynağında olduğu gibi elektrotun sık sık değiştirilmesi problemi yoktur. Dekapan gerekmez ve kaynak üzerinde cüruf oluşmaz. Ara temizleme olmadan üst üste birkaç paso çekilebilir. Yöntem kolayca otomatik hale getirilebilir ve hafif, kompakt kaynak ünitesi, robotik uygulamalara kolayca uyarlanabilir. Ters Kutuplama Doğru Akım arkı, daha derin nüfuziyet, sprey geçiş ve iyi profile sahip düz dikişler verdiği için daha çok tercih edilir. İşlem değişkenleri, akım türü akımın büyüklüğü koruyucu gaz, elektrot çapı, elektrot bileşimi, elektrot boyu (tabancanın dışındaki uzunluğu), kaynak hızı, gerilimi ve ark boyudur. İleri MIG/MAG kaynağı olarak bilinen bir modifikasyonda, ilave tel kaynak torcuna gelmeden önce ikinci bir akım üretici tarafından ön tavlânır. Bu modifikasyonda kaynağı oluşturmak için daha düşük ark ısısına ihtiyaç vardır; böylelikle ilave metalle karışımı daha düşük olacak şekilde daha az esas metal ertitilir ve nüfuziyet de daha az düşüktür (Çiğdem, 1996).

3.1.3 Özlü Telle Ark Kaynağı

Özlü telle ark kaynağı, kaynak için gerekli ısının, tükenen bir özlü tel elektrot ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı bir ark kaynak yöntemidir. Ark ve kaynak bölgesini koruma işlevi özlü tel içindeki öz maddesinin yanması ve ayrışması sonucunda oluşan gazlar tarafından veya gazaltı kaynağındaki gibi dıştan beslenen bir koruyucu gaz tarafından gerçekleştirilir (Şekil 3.4). Kendinden korumalı olan (açık-ark özlü kaynak telleri) kaynak işlemini ise daha çok örtülü elektrot kaynak yöntemindeki gaz korumasına benzer. Örtülü elektrotların üzerindeki örtü maddesi elektrotların düz çubuklar olarak üretilmesine ve boy kısıtlamasına neden olur. Özlü tellerde ise bu örtü maddesi boru şeklindeki tel elektrotun içinde olduğu için makaralara sarılı tel şeklinde üretilir ve sürekli kaynak bölgesine beslenebilir.

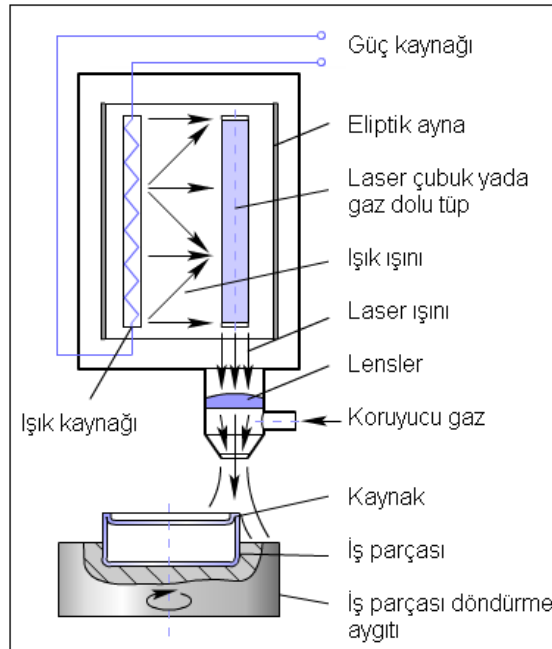


Şekil 3.4 Özlü telle ark kaynağının şematik görünümü (www.weldingengineer.com)

Bu kaynak yöntemi, hem yarı otomatik hem de otomatik kaynak sistemlerinde uygulanabilir. Özlü telle ark kaynağının dezavantajı, kaynak dikişi üzerinde örtülü elektrot ark kaynağında olduğu gibi ama biraz daha ince bir cüruf tabakasının oluşmasıdır. Fakat şu an cüruf temizliğine ihtiyaç olmayan veya cüruf oluşturmaya pek çok özlü tel elektrot türü üretilmektedir (www.oerlikon.com.tr).

3.1.4 Laser Işın Kaynağı

Laser ışını bir ısı kaynağı olarak kaynak yapma, delik açma, kesme, kaplama ve ısıl işlem amacıyla kullanılabilir. Laser, ışın kaynağı için kullanıldığında odaklanmış laser ışını genellikle 10^3 kW/cm^2 nin üzerinde güç yoğunlukları sağlar. Yüksek yoğunluklu ışın, çevresinde sıvı banyo olan ince bir buharlaşmış metal oluşturulur. Laser ışını ilerledikçe sıvı, derinlik/genişlik oranı genellikle 4:1 olan bir kaynak üretmek üzere kanalın içine akar. Dar kaynak banyosu kısa sürede katılaşır; bu sırada çok dar bir ITAB ve düşük termik distorsiyon ortaya çıkar. Laser ışın kaynağı ilave metal kullanılmayan (otojen kaynak) basit ergitme kaynağı üretiminde çok etkilidir ancak dar bir aralık oluşturmak için ağız hazırlığı çok dikkat gerektirir. Eğer aralık geniş ise ilave metal eklenebilir ve inert gaz örtüsü ile kaynak banyosu oksitlenmeden korunabilir (Dawes, C., 1992)



Şekil 3.5 Laser ışını oluşumu ve ışınla kaynak (www.aluminium.matter.org.uk)

Yoğun enerjili ve son derece paralel hale getirilmiş ışın, elektron ışın kaynağına benzer şekilde derin nüfuziyetli kaynaklar oluşturur; ancak laser ışın tekniği başka üstünlüklere de sahiptir:

- Işın hava içinden iletilebilir; böylece bir vakum ortamına gerek duyulmaz.
- X-ışınları üretilmez.
- Laser ışını, iletim ve yansıtıcı optik ortamlarla (mercekler ve aynalar) kolayca şekillendirilebilirler, yönlendirilebilir ve odaklanabilir ve fiber optik kablolar içinden iletilebilir.
- Bir kaynak dikişi oluşturmak için takım ile parçanın temas etmesi gerekmez, sadece optik olarak ulaşılması yeterlidir. Kaynaklar, bir vakum tüpü içindeki elemanlar gibi, saydam kaplar içinde tutulan malzemelerde yapılabilir.

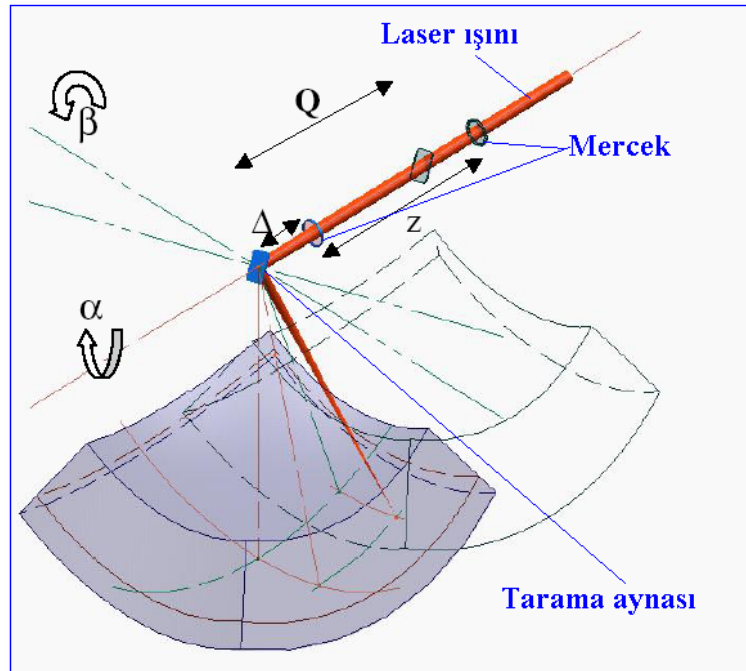
Keskin şekilde odaklanmış ışın ve kısa kaynak süresi nedeniyle laser kaynakları genellikle genişlik veya çap bakımından 0.25 mm'den daha dardır ve toplam ısı girdisi genellikle 0.1 ila 10 J gibi çok düşüktür. Bu nedenle laser ışın kaynağı kurşun tellerin küçük elektronik elemanlara birleştirilmesi gibi uygulamalar bakımından elektronik endüstrisi tarafından kendisine uyarlanmıştır. Bindirme, alın, T ve çapraz tel şeklindeki birleştirilmelerde kullanılabilir. Telleri üzerlerindeki poliüretan yalıtım kaplamasını dahi sökmeden kaynak yapmak mümkündür. Laser ışını yalıtım kaplamasını buharlaştırır ve içindeki teli kaynak yapar (Dawes, C., 1992).

CO₂ veya YAG (Yttrium-Alüminyum-Garnet) laser ışın kaynak sistemleri için donanım maliyeti son derece yüksektir; ancak bu maliyet, daha yüksek kaynak hızları, ilave metalsiz kaynak yapabilme ve kaynaktan sonraki doğrultma ve işleme miktarında azalmaya yol açan düşük distorsiyon bakımından kısmen karşılanır. Ancak bu tip cihazlarda, saçılan veya yansıyan laser ışınlarından korunmak gerekir. Gözlerin korunması zorunludur (Vural, 2008).

3.1.4.1 Uzaktan Laser Kaynağı

Maliyet göz önüne alındığında otomotiv sektöründe kaynak kalitesinde herhangi bir bozulma olmaksızın üretim hızını arttırmak önemli miktarda ilgi uyandırmaktadır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında laser işlemi kalite ve maliyet talepleri doğrultusunda yüksek nüfuziyet, düşük distorsiyon, daha yüksek kaynak hızı ve gövde atölyesindeki takım ihtiyacını en aza indirmek gibi birçok avantaj sunmaktadır (Tsoukantas, Chryssolouris, 2006, Vasilash, 2002).

Laser ışın kaynağı, elektron ışın kaynağı ve plazma ark kaynağı gibi yüksek güç yoğunluklarına sahip yöntemler kaynak bölgesi yakınlarındaki sınırlı bir sahada çok yüksek sıcaklıklara çıkılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle daha dar Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ortaya çıkışı söz konusu olabilmektedir. Laser ışını oluşumu için vakum işlemine ihtiyaç yoktur oysaki elektron ışın kaynağı vakumlama işlemine ihtiyaç duyarken aynı zamanda X ışınları da yaymaktadır. Laser ışını aynalar ve mercekler yardımıyla hızlı ve kolay şekilde yönlendirilebildiğinden avantajlı bir yöntemdir (Tsoukantas, Salonitis, Stournaras, Stavropoulos ve Chryssolouris, 2007). Ancak otomotiv gibi endüstrilerin daha verimli ve esnek birleştirme işlem talepleri laser kaynağı esaslı olan Uzaktan Laser Sistemlerinin (ULS) doğmasına ve gelişimine sebep olmuştur. Temassız işlem laser kaynağının temel özelliğidir. Ancak geleneksel laser yöntemiyle ULS arasındaki fark ışın tabancasının diğer adı olan kafa ile iş parçası arasındaki mesafedir. Geleneksel laser de kafa ile iş parçası arasındaki mesafe çok küçük iken ULS’de bu açıklık mesafesi 1,6 metreye kadar çıkmaktadır. Sonuç olarak ULS ile daha iyi ışın esnekliği elde edilebilmektedir (Tsoukantas ve Chryssolouris, 2006, Vasilash, 2002). Esneklik daha yüksek üretim hızı ve kalite seviyesi getirmektedir. Işın esnekliği, kafanın uzak bir köşedeki kaynak işlemini gerçekleştirmek için hareket etme gerekliliğini azalttığından geleneksel lasere oranla daha hızlı işlem yapmak mümkündür.

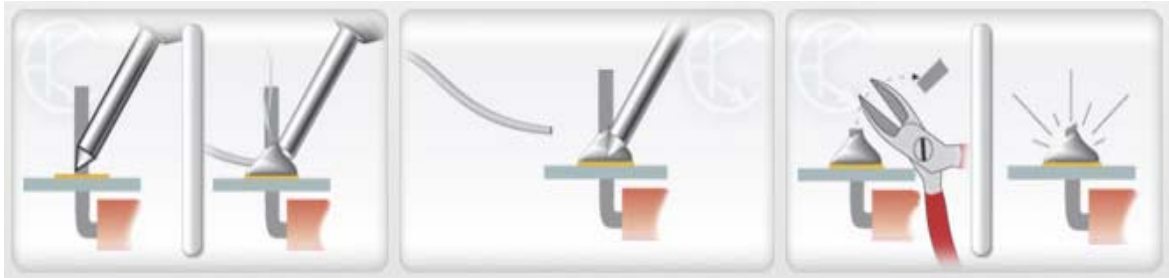


Şekil 3.6 Uzaktan laser kaynağında ışın yönlendirmek için gerekli aparatların hareket yönleri
 z : mercek hareketi, α : tarama eksen, β : tarama eksen, Q : tarama aynasının hareketi, Δ :
 tarama aynası - mercek mesafesi (www.rofin.com).

Şekil 3.6 uzaktan laser kaynağını şematik olarak göstermektedir. Laser ışını oluşturulduğu merkezden çıktığında kesme, kaynak, ısıtım işlem ve markalama gibi işlemler için kullanılmaya hazırdır. Laserin üretilmesi kadar yönlendirilmesi de çok önemlidir. Şekil 1’de görülen mercekler z eksenı boyunca hareket edebilmektedir. Bu hareket sayesinde odak noktası sürekli olarak değıştirilebilmektedir. Odak noktasının değıştirilmesiyle laser ışınının güç yoğunluğu değıştirilerek kaynak, kesme, ısıtım işlem ve markalama gibi farklı işlemler için kullanılabilirken iş parçasının farklı derinlikteki katmanları üzerinde işlem yapmayı mümkün kılmaktadır. Tarama aynası ise Q eksenı boyunca hareket edebilirken α ve β eksenlerindeki hareketleriyle ışını programlanan her yere yönlendirebilmektedir. Bu esneklik yüksek işlem kalitesine yüksek hızla sahip olmak demektir.

3.1.5 Lehimleme

Kaynağın en iyi çözüm olmadığı birleştirme veya tespit işlemleri vardır. Kaynak ısısı istenmeyebilir; malzemelerin kaynak kabiliyetleri kötü olabilir ya da kaynak pahalıya gelebilir. Böyle durumlarda düşük sıcaklık birleştirme yöntemleri tercih edilebilir. Bunlar arasında sert lehimleme, yumuşak lehimleme, yapıştırma ve mekanik tespit elemanları sayılabilir. Sert ve yumuşak lehimlemede metal yüzeyler temizlenir; parçalar bir araya getirilir veya fiştür içine yerleştirilir ve düşük sıcaklıkta ergiyen demir dışı bir metal ergitilir ve kapiler etkiyle iki karşı yüzey arasında çekilir ve orada katılaşır. Şekil 3.7 lehimleme işlemindeki adımları göstermektedir (Vural, M., 2008, Çiğdem,1996).



Şekil 3.7 Lehimleme işlemi adımları (www.chaneyelectronics.com)

3.1.5.1 Sert Lehimleme

Ergime sıcaklığı 450°C 'nin üzerinde ancak birleştirilen metallerin ergime sıcaklıkları altında olan bir ilave metal ve ısı kullanımıyla metallerin birleştirilmesidir. Kaynak işlemine kıyasla sert lehimleme işlemi birkaç yönden ayrılır; Sert lehim alaşımının kimyasal bileşimi, esas metalinkilerden tamamen farklıdır.

- Sert lehim alaşımının dayanımı esas metalinkinden oldukça dūřuktur.
- Sert lehim alaşımının ergime sıcaklığı esas metalinkinden dūřuktur; bu nedenle işlem sırasında metal ergimez
- Birleşme sıvının viskozitesine ve bağlantının geometrisine bağlı özel bir akış olan kapiler etki (kılcallık etkisi) gerektirir.

Bu farklardan dolayı sert lehimleme kaynağa göre çeşitli üstünlüklere sahiptir;

- Hemen hemen tüm metaller belirli bir sert lehim alaşımıyla birleştirilebilirler.
- İşlem ideal olarak, demir dışı metallerle demirli metallerin veya çok farklı ergime sıcaklıklarına sahip metaller gibi farklı metallere uygundur.
- Kaynağa göre daha d şuk ısı gerektirdiğinden, işlem daha çabuk ve daha ekonomik olarak uygulanabilir.
- D şuk sıcaklıklar ITAB'la, dalgalanma veya distorsiyonla ilgili problemleri azaltır.
- Sert lehimleme otomasyona çok uygundur ve çok sayıda üretilecek narin yapılarıdaki rahatlıkla kullanılabilir. Güçlü bir kalıcı bağlantı oluşturur.

Sert lehimlemenin temel zayıflığı, yapı grubunun sonradan ısıtılmasının sert lehim metalinin dikkatsizce ergitilmesine, bağlantının zayıflamasına veya tahrip olmasına yol açabilmesidir. İnsanların bir yapıyı doğrultmak veya hasarlı yapıları tamir etmek için ısı uygulaması durumunda sert lehim bağlantılarının hasara uğradığı çok sık görülmektedir. Bu durum hatalı sert lehim işleminin sonucu olmamasına rağmen sonuç, istenmeyecek durumların oluşmasıdır (Vural, 2008,  iğdem,1996).

Sert lehimlemede dolgu metaliyle ana metalin farklı kimyasal içeriklere sahip olması galvanik korozyon tehlikesini doğurmaktadır.

3.1.5.2 Yumuşak Lehimleme

Sert lehimleme ile aynı mekanizmaya sahiptir ancak ilave metalin ergime sıcaklığı 450⁰C'nin altındadır. Etkin bir yumuşak lehimleme işlemi genellikle altı adımda oluşur;

- Kabul edilebilir bir yumuşak lehimleme bağlantısının oluşturulması
- Yapılacak işe uygun yumuşak lehim alaşımının seçilmesi
- Doğru dekapanın seçilmesi
- Birleştirilecek yüzeylerin temizlenmesi

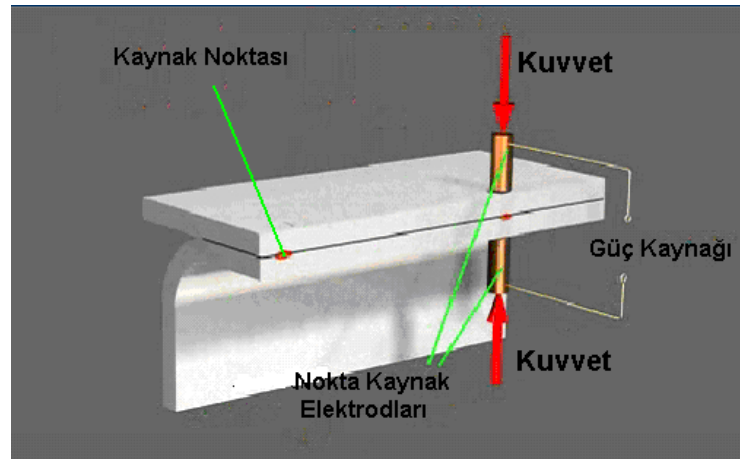
- Dekapanın, lehim alaşımının ve ergimiş lehim alaşımının kapiler etkiyle birleşme aralığını doldurmasına ve katılaşmasına yeterli ısının uygulanması
- Gerekliyse artık dekapanın temizlenmesi (Vural, 2008, Çiğdem,1996).

3.2 Basınç Esaslı Kaynak Yöntemleri

Malzemeleri genellikle ilave metal katmadan basınç altında bölgesel olarak ısıtıp birleştirmede kullanılan yöntemler basınç esaslı kaynak yöntemleridir. Yöntemlerin büyük bölümünde basınç yanında elektrik akımı da kullanılmaktadır. Elektrik akımı kısmi ergimeyi ve difüzyonu hızlandırmaktadır ve basınç birleştirme işinin gerçekleştirip birleşmenin güvenilirliğini sağlamaktadır.

3.2.1 Nokta Direnç Kaynağı

Elektrotlar tarafından bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdikleri dirençten elde edilen ısı ile parçaların bölgesel olarak ertitilip basınç altında birleştirilmeleri işlemine nokta kaynağı denir.



Şekil 3.8 Nokta direnç kaynağı şematik görüntüsü (www.aluminium.matter.org.uk)

Nokta kaynağında kullanılan ısı enerjisi Eşitlik (3.1) de gösterilmiştir;

$$Q = I^2 R t \quad (3.1)$$

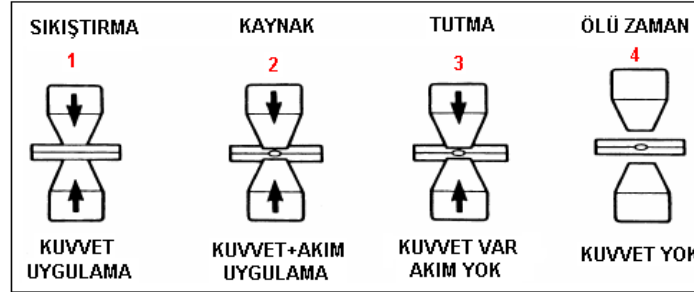
Q = Üretilen ısı enerjisi (Joule)

I = Akım (Amper)

R = Direnç (Ω Ohm)

t = Süre (s)

Akım (A) transformatörlerle üretilir. Direnç (R) iş parçalarının elektrik akımına karşı gösterdikleri dirençtir. Süre ise akımın iş parçaları üzerinden geçtiği zaman aralığıdır. Kaynak parametreleri yüksek gerilim-düşük akım prensibiyle seçilmektedir. Elektrotların uyguladığı baskı kuvvetleri hidrolik veya mekanik olarak üretilmektedir.



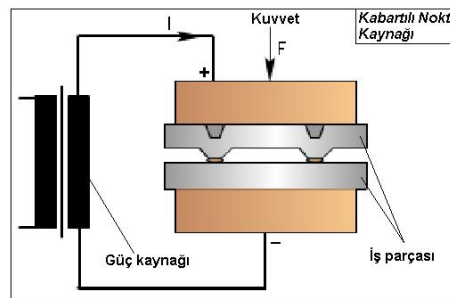
Şekil 3.9 Nokta kaynağı aşamaları

Nokta kaynağı genellikle dört aşamadan meydana gelir;

- Sıkıştırma zamanı; elektrotun uyguladığı ilk kuvvet zamanıyla akımın ilk verildiği zaman arasındaki süredir. Sıkıştırma zamanı, elektrot kuvvetinin istenilen seviyeye gelmesine kadar kaynak akımının geciktirilmesi için gereklidir.
- Kaynak zamanı; Kaynak süresi, kaynak akımının metal levhaya uygulandığı sürece geçen zamandır.
- Tutma zamanı; kaynağı soğutmak için elektrotların levhaya hala kuvvet uygulandığı kaynak sonrası süredir.
- Ölü zaman; elektrotların iş parçasıyla temasta olmadığı zaman aralığıdır (Anık, 1991).

3.2.2 Projeksiyon Direnç Kaynağı

Projeksiyon direnç kaynağında (kabartılı nokta kaynağında) parçaların elektriksel direnci ile bölgesel ergime sağlanır ve basınç uygulanır. Kabartılar, ısıнын düzgün dağılımını sağlar.



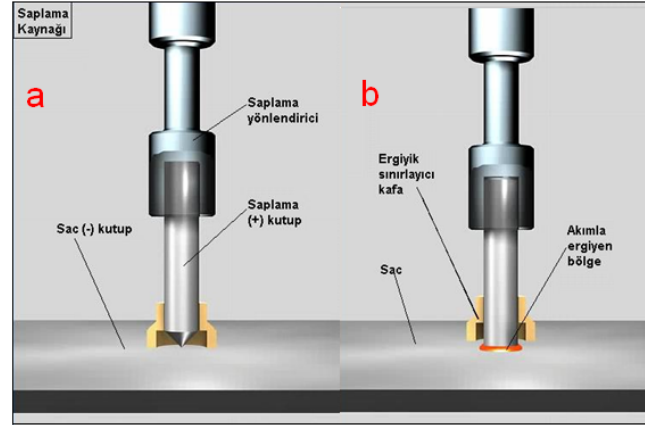
Şekil 3.10 Projeksiyon direnç kaynağı şematik görüntüsü (www.aluminium.matter.org.uk)

Normal nokta kaynağında sekonder akımın geçiş yüzeyi, elektrot uçlarının boyutları ve şekilleriyle sınırlandırılmış iken; kabartılı nokta kaynağında, birleştirilecek parçaların birinde veya ikisinde bulunan kabartılarla sınırlandırılmıştır.

Farklı metallerle kaynakta; yüksek iletkenlikli olan kabartılı olmalıdır. Bu yöntem otomotiv sektöründe kenetler, muylular, somunlar gibi bağlantı elemanlarının sac metale tek taraftan birleştirmelerinde kullanılır ve bir işlemde 50 adet birleştirme yapılabilir. Çeliklerin kaynağında sac kalınlıkları 0,5 ile 8 mm arasında değişirken alüminyum kaynağında 0,4–3 mm arasındadır (Yeşildal ve Karaaslan, 2007).

3.2.3 Saplama Kaynağı

Kaynak yönteminde saplama ana malzeme ile temas ettiğinde akım 2 – 3 mili saniye içinde saplama üzerinden akar. Oluşan elektrik arkı saplama ucunun ve ana malzeme yüzeyinin ergimesini sağlar ve basınç uygulanarak saplamanın sac yüzeyine birleştirilmesi yapılır. Bu teknikte farklı malzeme kombinasyonlarının kullanılması mümkündür. (Alüminyum, pirinç, karbonlu çelik, paslanmaz çelik, galvanizli çelik) (www.robot-welding.com ve Fenton, 1996)

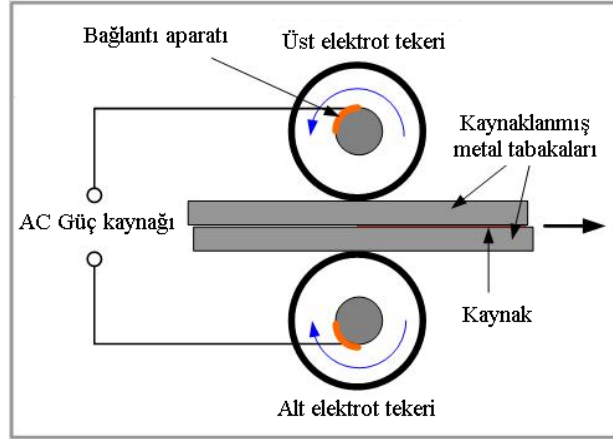


Şekil 3.11 Saplama kaynağı şematik gösterimi, a) Kaynak öncesi b) Kaynak sonrası
(www.aluminium.matter.org.uk)

Saplama kaynağı cıvatalar yada özelleşmiş tipteki somunlar gibi bağlantı elemanlarının özellikle sac yüzeyler üzerine yüksek verimlilikte ve hızla bağlanması için kullanılan elektrik direnç esaslı kaynak yöntemlerinden biridir. Otomotiv sektöründe saplama ve benzer bağlantı elemanlarının çok ince levha yüzeylerinde deformasyonsuz bir şekilde birleştirilmesi için kullanılmaktadır (Yeşildal ve Karaaslan, 2007).

3.2.4 Dikiş Direnç Kaynağı

Elektrotlar tekerlek şeklinde olup bastırarak dönmeleriyle sürekli veya kesikli kaynak dikişi elde edilir. Otomotiv sektöründe sacların ve yakıt depolarının flanşlarının kaynağında, egzost sistemlerinin ve katalitik konvertörlerin birleştirilmesinde kullanılırlar. Sürekli dikiş akımın üst üste bindirilmesiyle sağlanmaktadır.



Şekil 3.12 Dikiş direnç kaynağı gösterimi elektrotlar disk şeklindedir. (www.subtech.com)

Dikiş kaynağı için malzeme kalınlıkları 0.5 mm ile 3 mm arasında değişmektedir. Nokta kaynak yönteminde kullanılanlardan daha yüksek akım kullanılmaktadır.

Dikiş kaynağında sızdırmaz bir bağlantı elde edilebilmesi, kaynak şeridinin genişliğine bağlıdır. Kaynak şeridinin ideal genişliği, levha kalınlığına bağlı olarak Eşitlik 3.2 de gösterilmiştir.

$$L = 2 \cdot (e + 1) \quad (3.2)$$

L : Sac genişliği

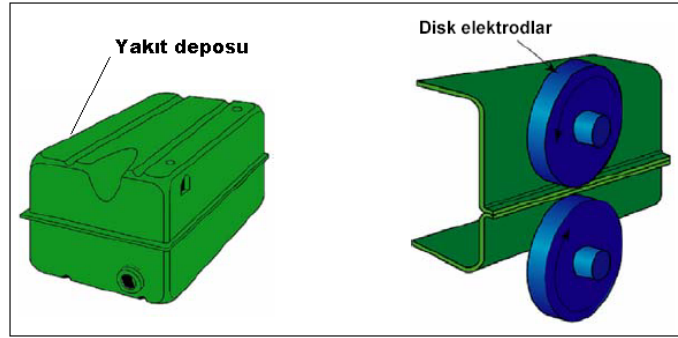
e : Sac kalınlığı

İdeal kaynak dikişi elde edebilmek, kaynak akım şiddeti ve kaynak hızına da bağlıdır. Levha kalınlığına bağlı olarak, akım şiddeti ve kaynak hızı arasındaki bağıntı Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Levha kalınlığına bağı olarak seçilen akım ve kaynak hızı (Anık, 1991)

Levha kalınlığı (mm)	Akım şiddeti (amper)	Kaynak hızı V (m/dak)
0,5	9250 – 975* V	9,5
1,0	10600 – 2260* V	4,7
1,5	11850 – 3800* V	3,1
2,0	12850 – 5550* V	2,3
3,0	15000 – 9600* V	1,55

Yakıt deposu imalatında dikiş direnç kaynağının nasıl kullanıldığını Şekil 3.13 göstermektedir. Disk elektrotlar yakıt deposunun alt ve üst parçalarının flanşlar vasıtasıyla birleştirmektedirler.



Şekil 3.13 Araç yakıt deposu üretiminde elektrik direnç kaynağı kullanımı (Degarmo, P.E., vd., 1997)

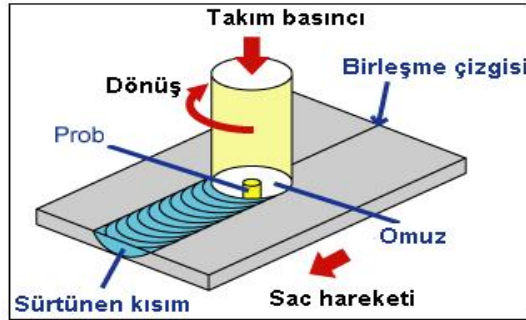
3.2.5 Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı katı hal esaslı kaynak işlemlerinden biridir. Bu yöntemde ısı, hareket eden iş parçasıyla durağan komponent arasındaki mekanik sürtünme kuvvetiyle sağlanmıştır. Havacılık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe emme ve egzost supapları genellikle iki farklı metalden üretilmektedir bu metallerin birleştirilmesi için sürtünme kaynağı kullanılmaktadır.

3.2.5.1 Sürtünen Eleman ile Kaynak

Sürtünen eleman ile kaynak yöntemi, sürtünme kaynağından türetilmiştir. Kaynak edilen parçalar ergimezler bu yüzden yöntem katı hal kaynağı olarak adlandırılır. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin (probe) daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. Şekil

3.14'te yöntem için kullanılan ve özel olarak tasarlanmış pim görülmektedir (Özsoy ve Kaluç, 2002).

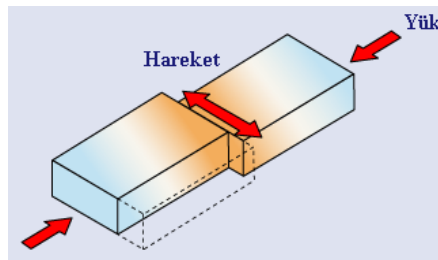


Şekil 3.14 Sürtünen eleman ile kaynak (www.m-osaka.com)

Alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi ile oluşturulacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılmış gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi) alüminyum ve alaşımlarında başarılı ve güvenli bağlantıların ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca bakır–bakır alaşımları, kurşun, titanyum–titanyum alaşımları, magnezyum–magnezyum alaşımları, metal matrisli alüminyum kompozitlerde de bu yöntemin uygulanmasına başlanmıştır. Binek bir otomobilde yaklaşık 15 adet sürtünme kaynağı uygulanmaktadır (Özsoy ve Kaluç, 2002, Yumurtacı ve Mert, 2003).

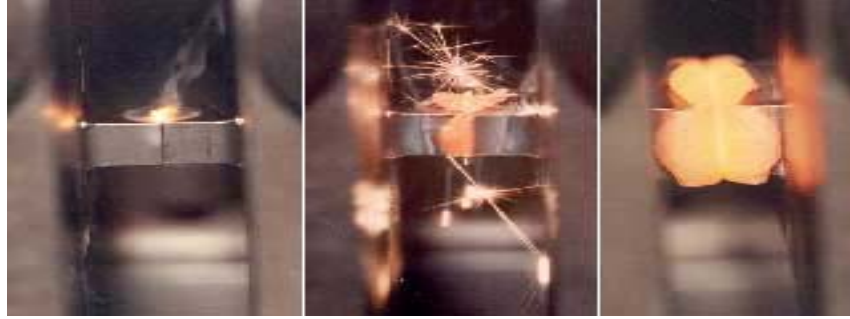
3.2.5.2 Çizgisel Sürtünme Kaynağı

Çizgisel sürtünme kaynağı, rijit olarak sabitlenmiş komponent karşısında çizgisel hareket kullanarak sürtünen başka bir komponentin olduğu bir düzeneği kapsamaktadır. Bu hareket mevcut durumda 25–125 Hz frekansta, 1–3 mm gibi küçük genlikle ve 150 kN gibi maksimum eksenel kaynak kuvvetiyle gerçekleştirilir (Şekil 3.15). Şekil 3.16'da gösterilen çizgisel karşıt hareket, sürtünme ısısı oluşumunu ve kaynak arayüzeyinden kıvılcım olarak dışarı atılan malzemenin yumuşamasını sağlamaktadır (www.twi.co.uk).



Şekil 3.15 Çizgisel sürtünme kaynağı şematik gösterimi

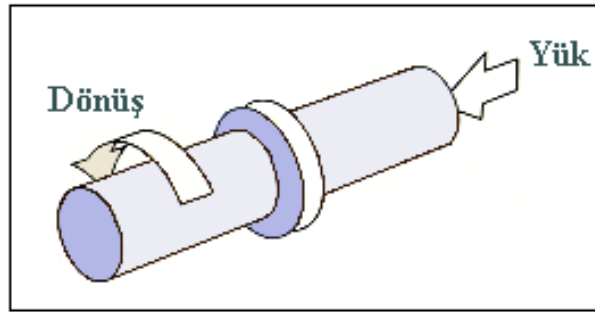
Şekil 3.16’de görüldüğü gibi iki parça uygun şekilde hizaya getirilir ve kuvvet uygulanır. Kaynak çevriminin sonlarına doğru kaynak kuvveti korunur veya bağlantıyı sağlamlaştırmak amacıyla arttırılmaktadır (www.twi.co.uk).



Şekil 3.16 Titanyum ile çeliğin çizgisel sürtünme kaynağı

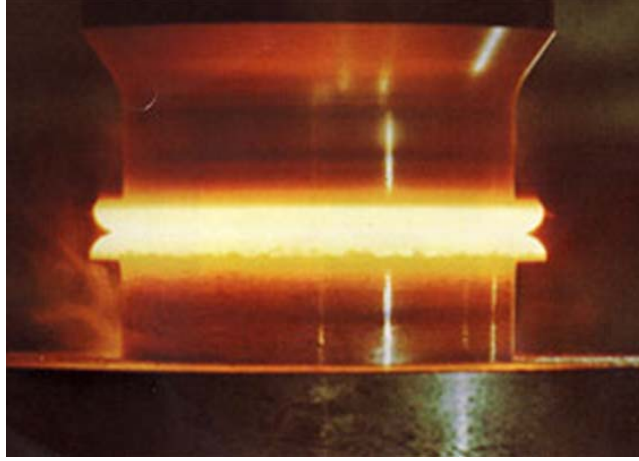
3.2.5.3 Dönel Sürtünme Kaynağı

Dönel sürtünme kaynağı geliştirilen sürtünme işlemlerinin ilkidir ve ticari olarak ilk kullanılanıdır. Ek dolgu malzemesi kullanılmaz ve kaynak katı halde gerçekleşir. Sürtünme kaynağının doğasındaki özelliklerden biri üretilen ısı enerjiden verimli şekilde yararlanmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Dönel sürtünme kaynağının basit gösterimi (www.cetic.be)

İki farklı işlem vardır: sürekli dönel sürtünme kaynağı ve depolanmış enerji sürtünme kaynağı (ör: atalet kaynağı). Sürekli dönel sürtünme kaynağı için en basit mekanik düzenleme, eksenel hizada tutulan iki silindirik çubuktan ibarettir. Çubuklardan biri önceden seçilmiş eksenel basınç altındaki bağlantıya ilettilirken diğeri döndürülmektedir. Dönme, birleşme bölgesinde plastik halde bulunan metal için gerekli sıcaklığa ulaşmak için yeterli olan özel bir süre için devam etmektedir. Bu şartları gerçekleştirmek için ya basınç korunurken veya birleşmeyi güçlendirmek için basınç arttırılırken dönen çubuk durdurulur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Durağan parça ile hareketli parça arasındaki sürtünmenin meydana getirdiği ısı ile kaynak işlemi. (www.cetic.be)

Atalet kaynağında, dönen komponent ayarlanmış dönüş hızına çıkan volana bağlanır. Bu noktada volan hareketi kesilir. Bir miktar depolanmış enerjiyle dönmekte olan volan daha sonra durağan komponente karşı itelenir ve ortaya çıkan frenleme etkisi kaynak için gerekli ısıyı üretir.

İşlem birçok benzer ve farklı metal kombinasyonlarının birleştirilmesinde kullanılabilir. Zorlukların üstesinden bazı kombinasyonlarla gelinebilir ancak uzman tavsiyesine başvurulmalıdır (Metals Handbook V06, 1993, www.cetic.be).

4. KAYNAK METALURJİSİ

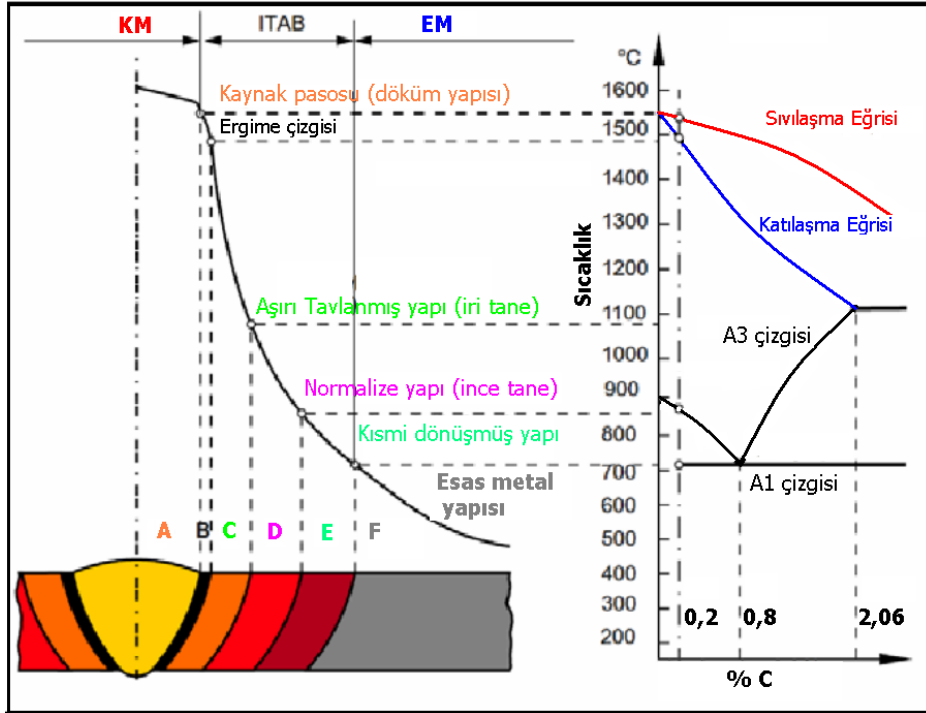
Kaynak tekniğinde ergitme yöntemiyle birleştirme yapılırken dört farklı durum söz konusu olmaktadır. Aynı cins malzemelerin ilave malzemeli ve ilave malzemesiz ergitme yöntemi ile birleştirilmesi bu dört durumdan ikisini oluşturmaktadır. Farklı cins malzemelerin ilave malzemeli ve ilave malzemesiz ergitme yöntemiyle birleştirilmesi ise diğer iki durumu oluşturmaktadır

Bu dört durum kaynak sonrasında kullanılacak olan malzemedeki beklenen performansına bağlıdır. Genel olarak iki metal arasında oluşan kaynak havuzu (ergiyik bölge) bir kokil kalıpta katılaşıyormuşçasına hızlı olarak soğur ve kaynak edilen malzemelerin tane yapılarından daha ince taneli olarak katılaşıp. Eğer ince tane durumu arzu edilmiyorsa ya ısıtma işlemi veya ilave malzemeyle bu durum değiştirilebilir. Tane boyutu küçük olan malzemenin tokluğu yüksek olacaktır ancak tane boyutu küçük olan malzemenin çentik darbe dayanımı daha düşük olacaktır.

Kaynakta soğuma etkileri şekillenmiş ve şekillenmemiş allotropik malzemeler için ve şekillenmiş allotropik olmayan malzemeler için farklı olacaktır. Allotropik olmayan malzemeler dönüşüm göstermediklerinden kaynakta büyük sorunlar çıkartmazlar ancak bu malzemeler kaynak öncesinde şekillendirilmişlerse kaynak bölgesinde (kaynak dikişi ve ITAB) özellikle ITAB’da mikroyapı değişimi ortaya çıkar. Yeniden kristalleşmiş tanelerin tav sıcaklıkları veya tav süreleri artacak olursa tane kabalaşması olduğu bilinmektedir. Bu nedenle şekillenmiş ve allotropik olmayan bir malzeme ergitme kaynağı ile birleştirildikten sonra ITAB’ın kaynak dikişi sınırlarında kaba tane (Yüksek tav sıcaklığı sebebiyle) ve bu sınırdan uzaklaştıkça daha küçük taneler oluşmaktadır. Küçük taneli malzemelerin sertliği kaba taneli yapıya göre daha yüksek olmasına rağmen şekil alabilirliği daha iyidir.

4.1 Allotropik Malzemelerin Ergitme Kaynağı

Dönüşüm yoluyla dayanım kazanan alaşımlar kaynak işlemi sebebiyle ortaya çıkacak soğumaya bağlı olarak martenzit dönüşümüne uğrayacak alaşım içeren ve yeterli miktarda C içeren çelikleri kapsamaktadır. Bu çelikler kaynaktan önce menevişlenmiş martenzit ısıtma işlemi görmüşlerdir veya kaynak ısıtma çevrim süresince martenzit dönüşümü sebebiyle uygun sertleşmeye sahiptirler. Her iki durumda da yaklaşık olarak ITAB aynı şekilde kaynak ısıtma çevriminden etkilenir. Bu çeliklerin ITAB’ları Şekil 4.1’de Fe–C diyagramı ile ilişkilendirilerek verilmiştir (Dikicioğlu, A., 2006).



Şekil 4.1 Kaynak dikişine mesafe ile pik sıcaklıkları arasındaki yaklaşık ilişkiler ve Fe – C faz diyagramı. KM: kaynak metali, ITAB: ısı tesiri altındaki bölge, EM: esas malzeme.

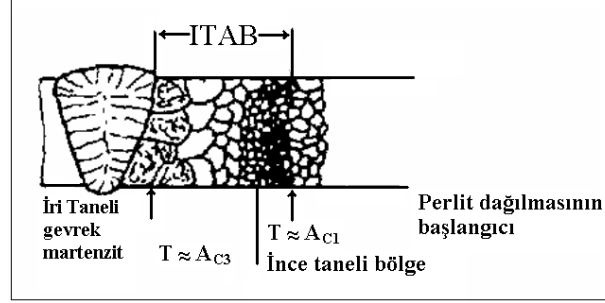
A bölgesi kaynak pasosu olup metal kalıba yapılmış döküm yapısı sergilemektedir. Buradaki taneler B bölgesinden başlayıp A bölgesinin merkezine doğru kolonsal şekilde uzanmaktadır. B bölgesi ise kısmi ergime çizgisidir A bölgesinin bir parçası olarak düşünülmelidir. Ergimiş A bölgesi ile kaynak sırasında katı halde kalan C bölgesi arasında kalmış çok ince, sıvı-katı yüzeyidir.

C bölgesi, hemen kaynak dikişinin yanı olup iri taneli bölgedir. Sıcaklığın ergime noktası yakınına ulaştığı bölge olması nedeniyle hızlı östenitik tane büyümesi meydana gelir. Büyük tane boyutu gevrekleşme eğilimini artırır ve bu bölge soğuma ile birlikte kolayca martenzit dönüşüme uğrar.

D bölgesi, östenit hale gelmiştir ancak burada sıcaklık önemli ölçüde tane büyümesi gerçekleşmesi için oldukça düşüktür. C bölgesinin sertleşme kabiliyeti tane büyümesine bağlı olarak önemsenmeyecek derecede artar ancak bu bölgede soğuma hızı yeterli derecede fazla ise veya alaşım miktarı yeterli kadar fazla ise martenzit dönüşümü olabilir.

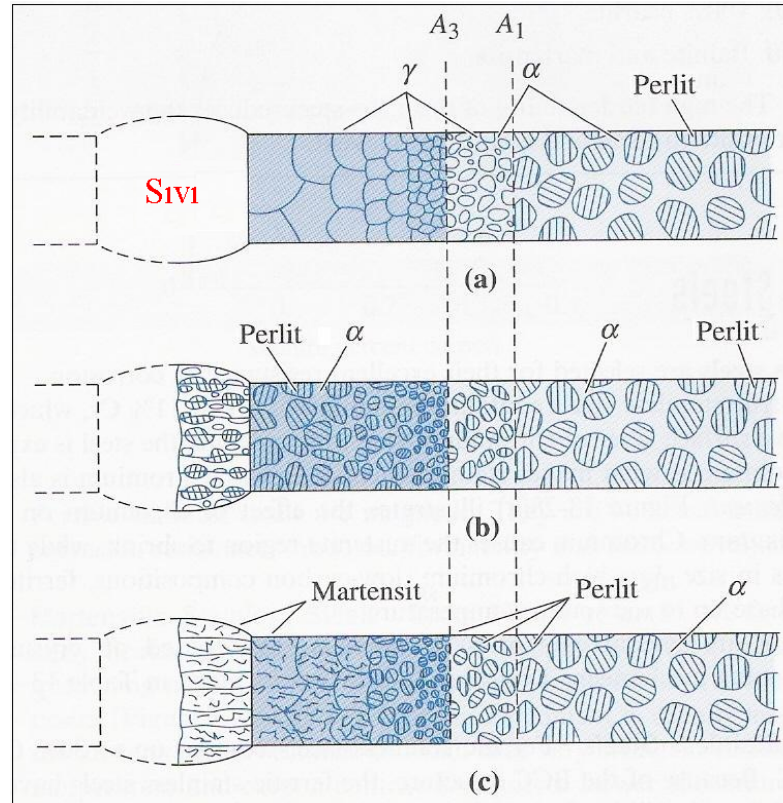
E bölgesinde, bazı tanecikler östenite dönüşebilirse de diğerleri dönüşemez. Östenit tanecikleri oldukça incedir. D bölgesinde östenite dönüşemeyen tanecikler vardır ancak ferrit tanecikleri kaynak ısısı etkisiyle menevişlenebilir.

ITAB'ın ve ITAB'daki her bir bölgenin genişliği kaynak ısı girdisi tarafından kontrol edilir. Yüksek ısı girişi yavaş soğuma hızlarına neden olur. Bu nedenle, nihai içyapıları ısı girdisi ortaya çıkarır. Şekil 4.2 farklı sıcaklıklı bölgelerde tane yapısını göstermektedir.



Şekil 4.2 C15 veya C45 çeliğinin kaynakta tane yapısı değişimi (Dikicioğlu, 2006).

Ergime çizgisine komşu bölgede martenzit oluşumu nedeni ile sertlik aşırı derecede artar. Ancak karbon oranı % 0.2 den küçük olan çelikler bu nedenle önlem alınmadan kaynak edilebilirken, daha yüksek karbon içeren çelikler ancak ön tavlama ile kaynak edilebilirler.



Şekil 4.3 Kaynakta ITAB oluşumu. a) Maksimum kaynak sıcaklığındaki çelik yapısı b) Düşük sertleşebilirliğe sahip çeliğin soğuma sonrası yapısı (%C<0,2), c) Yüksek sertleşebilirliğe sahip çeliğin soğuma sonrası yapısı (%C>0,2), (Askeland ve Phule, 2004).

Şekil 4.3' deki "a" durumunda kaynak dikişinin henüz sıvı olduğu andaki esas metaldeki tane yapısı gösterilmektedir. Kaynak dikişinin hemen yanındaki bölgede kaba östenit (γ) taneleri oluşumu görülmektedir. Bu bölgeden esas metale doğru gidildikçe tane boyutu küçülmektedir. Sıcaklığın A3 ile A1 arasında olduğu bölgede östenit (γ) ve ferrit (α) taneleri görülmektedir. Sıcaklığın A1 sıcaklığından daha düşük olduğu bölgede ise, oda sıcaklığındaki dengeli katılaşmış yapının aynısı mevcuttur (α + perlit).

Şekil 4.3' deki "b" durumunda düşük sertleşme kabiliyetine sahip çelikte soğuma sonrası yapı görülmektedir. Sertleşme kabiliyeti görece küçük olduğundan kaynak dikişiyle A3 sıcaklığı arasındaki bölgede α + perlit yapısı mevcuttur ve "a" durumundaki tane boyutu dağılımı burada da aynı şekildedir. Sıcaklığın A3 ile A1 arasında olduğu bölgede de α + perlit yapısı mevcuttur ancak tane boyutu ana malzemeden daha küçüktür. Dolayısıyla sertlik ve dayanım bu bölgede ana malzemeden daha yüksektir.

Şekil 4.3' deki "c" durumunda yüksek sertleşme kabiliyetine sahip çelikte soğuma sonrası yapı görülmektedir. Sertleşme kabiliyeti görece daha büyük olduğundan kritik soğuma hızı küçüktür ve kaynak dikişi ile A3 sıcaklığına sahip sınır arasındaki bölgede önce kaba martenzit taneleri oluşmuştur. A3 sıcaklıklı sınıra doğru kaba martenzit tanelerinden daha ince α + perlit yapısı oluşmaktadır. Sınırlarındaki sıcaklık A3 ve A1 olan bölgedeki yapı da α + perlit yapısındadır, ancak, tane boyutu ana malzemenin tane boyutundan küçüktür.

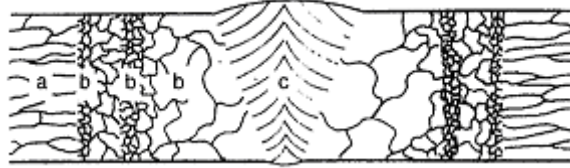
Yüksek C'lu martenzit sert ve gevrek ve ITAB'da problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. ITAB'ın sertliği esas metalin karbon içeriğinin bir fonksiyonudur. Artan C oranıyla, ITAB'ın tokluğu azalır sertliği artarken çatlak eğilimi artabilir. Yüksek karbonlu martenzit yapı tek başına çatlak meydana getirme sebebi değildir; hidrojenin çözünmesi ve kalıntı gerilmelerin varlığı da çatlak oluşturma faktörleridir (Dikicioğlu, 2006).

ITAB'ın sertliği, mevcut martenzitin miktarı ve potansiyel çatlak için önemli bir ölçüdür. Her ne kadar çatlak, ender olarak, 250 HB civarında meydana gelirse de tedbir alınmamış durumda sertlik 450 HB civarında olacaktır. Ön tavlama yapılmaksızın hazırlanan kaynak dikişinin ITAB'ının Knoop sertliği 435 HK'dır. Ön tavlama yapılmış plakadaki kaynak dikişinin ITAB'ının Knoop sertliği 361 HK'dır ve kaynaktan sonra bir tavlama işlemi yapılmış (595°C 'de) üçüncü plakanın kaynak dikişinin ITAB'ının Knoop sertliği 196 HK'dır. İkinci ve üçüncü plakaların kaynak dikişlerinin ITAB sertlik değerleri önemli ölçüde ilk plakanın değerine göre düşüktür. Böylece sertleşme kabiliyeti yüksek olan çeliklerin kaynak metalinin ve ITAB'ının sertlik değerinin düşürülmesi için son tavlama ısı işlemi ileri sürülebilir.

Kaynak yapıldığında sertleşebilen çeliklerde; özellikle menevişlenmiş martenzitik içyapı elde etmek için ısıtılma işlemi yapmak gibi özel tedbirler gerekebilir. Genellikle, ITAB boyutunun kontrolü için düşük kaynak ısı girdisi ve kaynak bölgesinin soğuma hızı kontrolü için yüksek ön tavlama sıcaklığı arzu edilir. Çelik üreticileri tarafından verilen kaynak veri tavsiyeleri özellikle düşük alaşımlı, yüksek dayanımlı çeliklerde kaynak işlemlerinin hazırlığında muhakkak göz önüne alınmalıdır (Dikicioğlu, 2006).

4.1.1 Şekillenmiş Allotropik Malzemeler

Eğer ısıtıldığında allotropik dönüşüme uğrayabilen bir soğuk şekil değiştirmiş metal söz konusu ise kaynağın etkisi daha da karmaşıktır. Çelik, Titanyum ve diğer allotropik değişim gösteren metallerde Şekil 4.4’de görüldüğü gibi iki farklı yeniden kristalleşme bölgesi görülebilir. Birinci ince taneli bölgesi, alfa fazı soğuk şekil değiştirmesinin yeniden kristalleşmesi sebebiyle meydana gelir. İkinci ince taneli bölge ise yüksek sıcaklık fazında allotropik dönüşüm sonucu meydana gelir (Dikicioğlu, 2006).



Şekil 4.4 Şekillenmiş allotropik malzeme (Dikicioğlu, 2006)

4.2 Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Malzemeler

Allotropik olmayan malzemeler katı haldeyken birden fazla çeşitte dengeli fazlara sahip olmayan malzemelerdir. Katı haldeyken sıcaklık değişimiyle herhangi bir faz dönüşümü yapmamaktadırlar.

4.2.1 Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Şekillenmiş Malzemeler

Bu metaller yeniden kristalleştirme sıcaklığının üzerine ısıtıldıklarında yeniden kristalleşirler. Kaynak ısısı soğuk şekil değiştirmiş metalin ITAB’ını yeniden kristalleştirir ve metal önemli ölçüde yumuşar. Kaynak kesiti Şekil 4.5 de soğuk şekil değiştirme içyapısına kaynak ısıtılmasının etkisi gösterilmektedir. Burada a ile ısıdan etkilenmemiş bölge tipik mekanik deformasyon sonucu şekil almış (hadde sonunda gibi) tanelerin durumunu göstermektedir. (Şekil 4.5); eşeksenli ince taneler “b” ile gösterilmektedir. Bu taneler ITAB’da sıcaklığın yeniden kristalleşme sıcaklığına ulaştığı bölgelerde tanelerdir ve iri taneler ergime hattı

yakınındaki yüksek sıcaklık bölgesinde yerlerini almışlardır. ITAB'da yeniden kristalleşmenin sonucu yumuşar ve soğuk şekil değiştirmiş esas metale göre zayıflar ve dayanım ısıtıl işlem ile yeniden kazanılamaz (Dikicioğlu, 2006).

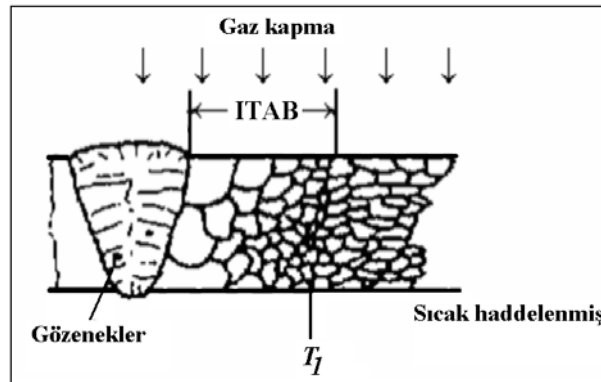


Şekil 4.5 Şekillenmiş allotropik olmayan malzeme (Dikicioğlu, 2006)

4.2.2 Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Şekillenmemiş Malzemeler

Bu tür alaşımların kaynak ITAB'ları çok az problem çıkarır. Katı hal dönüşümü içermediklerinden ısıtıl çevrim etkisi küçüktür ve ITAB'ın özellikleri büyük ölçüde kaynaktan etkilenmez (Dikicioğlu, 2006).

Yüksek pik sıcaklığı sonucu olarak kaynak yakınındaki kesitte tane büyümesi meydana gelir. Ancak bu tane büyümesi sadece bir kaç tane genişliğini kapsıyorsa mekanik özellikler açısından pek önemli değildir. Genellikle bu yöntemle dayanım kazandırılan alaşımlar, alüminyum ve bakır alaşımları, sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelikler gibi alaşımlardır. Ferritik ve östenitik çeliklerde bu kategoriye aittir.



Şekil 4.6 Allotropik Dönüşüm Göstermeyen Malzeme (Nikel, Alüminyum, Bakır gibi) (Dikicioğlu, 2006)

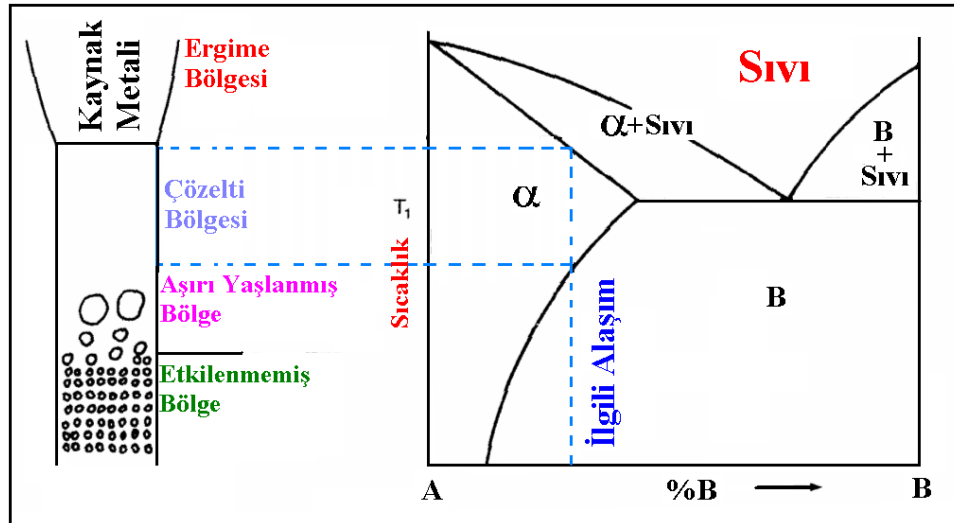
Tane büyüklüğü T_1 'den başlayarak sürekli artar (Şekil 4.6); ITAB'ın genişliği kaynak yöntemine, paso sayısına, uygulanan enerjinin yoğunluğuna bağlıdır.

Kaynak bölgesi gaz kapar dolayısı ile de gevrekleşme ve gözenek oluşumu ile karşılaşılır, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek ısıl genleşme çarpılma ve iç gerilmelerin oluşumuna neden olur.

4.3 Çökelme Sertleştirmeli Malzemeler

Çökelme sertleşmeli malzemeler AlCuMg alaşımları, özel paslanmaz çelikler, yüksek nikelli alaşımlar gibi alaşımlardır. Çökelme sertleşmesi yoluyla dayanım kazandırılan alaşımlar, deformasyon sertleştirmeli alaşımlar gibi aynı şekilde kaynak ısısına aynı cevabı verir. Bu ITAB'ın tavlama çevrimi altında kalması demektir. ITAB'ın buna cevabı oldukça karmaşıktır zira kaynak ısıl çevrimi değişik bölgelerde değişik etkiler ortaya çıkarır. Çökelme sertleşmesine ait ısıl işlem çevrimi; çözeltiye alma, ani soğutma ve yaşlandırma işlemlerini içerir. Kaynak ısısı kaynak bölgesinin hemen yakınındaki ITAB bölgelerinde ısıl işlemi çözer ve göreceli olarak yumuşak, iri tanenin eşlik ettiği tek faz katı eriyiği ortaya çıkarır. Bu bölge kaynak sonrası yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilir.

Çözeltiye alma sıcaklığı altına kadar ısınmış ITAB'ın bu bölgeleri kaynak ısısı nedeni ile aşırı yaşlanır. Kaynak sonrası yaşlandırma işlemi bu bölgeyi yeniden sertleştirmez. Eğer kaynak ısısı ITAB'ın sıcaklığını, orijinal yaşlandırma sıcaklığı civarına kadar yükseltmiyorsa mekanik özellikler önemsiz derecede etkilenir. Çökelme sertleştirmeli dayanım kazandırılan alaşımların ITAB'ı Şekil 4.7'de gösterildiği gibidir (Dikicioğlu, 2006).



Şekil 4.7 Çökelme Sertleşmeli Alaşımların ITAB'ında çökelmelerin irileşmesi (Dikicioğlu, 2006)

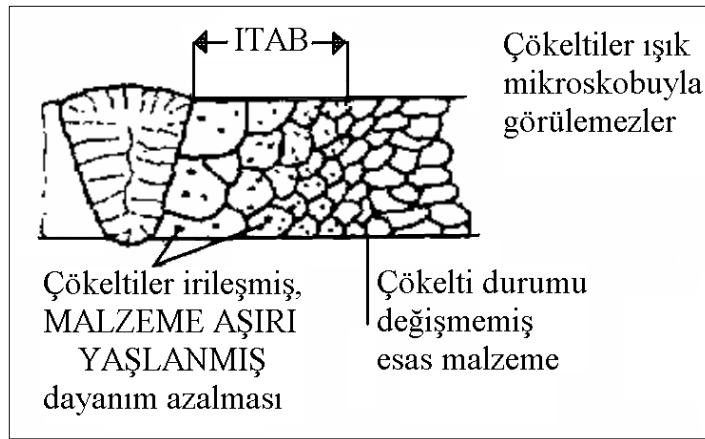
Yüksek dayanımlı, çökelmeyle sertleştirilebilir alaşımları, dayanım kaybı olmaksızın kaynak yapmak zordur. Ancak yine de söz konusu dayanım kaybı üç teknik ile minimuma indirilebilir.

Birinci yöntem; işlemi çözme, su verme ve kaynaklı bağlantıyı yaşlandırmaktır. Bu her ne kadar en etkili yöntem olsa da oldukça pahalı ve bazı durumlarda uygulanması bile imkânsızdır.

İkinci yöntem; kaynak işlemi, çökelme sertleştirmeli esas metali, çözmeye (çözeltiye alma) yaklaştırır ve sonradan kaynaklı bağlantı yeniden yaşlandırılır. Bu ısı işlem ITAB'ın eriyiğe alma ısı işlemine karşı gelen bölgesinin dayanımını yükseltir. Ancak aşırı yaşlanmış bölgenin dayanımında düzelmeye neden olmaz.

Son yöntem ise esas metali çözeltiye alma şartlarında kaynak yapmak ve sonra tüm kaynaklı bağlantıyı yaşlandırmaktır. Aşırı yaşlanmış bölge en zayıf hat olacaktır ancak önceki yaklaşımlardan daha fazla düzeltici bir etkiye sahiptir.

Kaynak işleminin ısı çevrimi nedeniyle ısı işlem görmüş esas metalin dayanımı azalır, yüksek ısı girdisi kullanılan kaynak yöntemleri bu alaşım türleri için tavsiye edilmez. Düşük ısı girdisi ITAB'ın genişliğini ve yumuşayan esas metal miktarını en aza indirir.



Şekil 4.8 Çökelme ile sertleştirilmiş malzeme kaynak bölgesi (Dikicioğlu, 2006).

ITAB'da yüksek sıcaklık nedeni ile çökelti çözülür ve tekrar uygun olmayan bir boyut ve biçimde yeniden çöker. Bu aşırı yaşlanma, çöktürme sertleşmesinin yeniden uygulanması ile giderilebilir. Tane sınırlarındaki çökelti çatlak oluşumuna neden olur. Kaynağın yaşlanmadan önce yapılması çatlak oluşumu olasılığını azaltır. İri çökelti nedeni ile korozyon dayanımı düşer.

5. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN MALZEMELER ve SEÇİM KRİTERLERİ

Yaklaşık yüzyıl önce ortaya çıkan otomobil endüstrisi, birleştirme teknolojilerine büyük oranda bel bağlamıştır. Yıllarla birlikte birleştirme teknolojilerindeki gelişmeler, müşterilerin ve devlet kurumlarının artan talepleriyle sürekli değişmekte olan otomobil tasarımlarında ilerlemelere olanak sağlamıştır. Müşteriler performanslarından, işlevlerine ve görünümlerine kadar farklı alanlarda araçlarının kıstasları karşılamalarını istemektedirler. Devlet kurumları ise araçların, uyulması zorunlu olan güvenlik ve çevre standartlarını karşılamalarını zorunlu kılmaktadır. Bu talepler ve kısıtlamalar altında yapılan otomotiv tasarımları çoğu kez birleştirme işlemlerinde problemler yaratabilmektedir (Metals Handbook V06, 1993).

5.1 Otomotiv Sektöründeki Hizmet Şartlarına Göre Hafif Malzeme Gereksinimi

Tasarım mühendisleri otomobiller için birçok servis şartını göz önünde bulundurmak zorundadır. Bir araç yapısal olarak arazi ve yol şartlarına dayanabilmeli, kaza anında araç içerisindekilerin zarar görmemesini temin etmeli ve yakıt ekonomikliği standartlarına uygun olmalıdır. Araç aynı zamanda çeşitli çevre koşullarına dayanıklı olmalıdır. Dış çevre koşullarından (hava, elektrolitle temas, asit yağmurları v.b.) iç çevre koşullarına (motor ısısı, yakıtlar, yağlayıcılar ve sızdırmazlık elemanlarına) kadar değişen şartlara dayanırken ve su-hava geçirmezliğine sahip olmalıdır. Sonuç olarak bütün bunlar maliyet ve birleştirme işlemini kapsayan sınırlar içinde kalınarak başarılmak zorundadır (Metals Handbook V06, 1993).

70'li yılların sonlarında yakıt maliyetinin 5 yıl önceki seviyesinden oldukça yüksek olmasından dolayı üreticiler aracın ağırlığını azaltarak yakıtın daha ekonomik kullanılması konusunu araştırmışlardır. Araştırmalar sonucunda aşağıdaki gelişmeler sağlanmıştır;

- Derin çekme çeliklerin sahip olduğu akma dayanç değerlerinin altındaki değerlere ve daha yüksek r (anizotropi katsayısı) değerlerine sahip çeliklerin geliştirilmesi,
- Daha ince ve daha hafif çeliklerin kullanılması,
- Çeliğin yerine geçebilecek alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanılması,
- Alternatif olarak belli bölgelerde seramik malzeme kullanılması,
- Araç üzerinde plastik malzeme kullanımının artırılması.

Yakıt tüketiminde motor büyüklüğü ve performans etkili faktör olmasına rağmen enerji tasarrufunda asıl önemli olan etken ağırlıktır. Çelik yerine yeni malzemelerin aranması; araç ağırlığının azaltılması ve aerodinamik araç karoserlerinin geliştirilmesi gerçeğinden doğmuştur. Yakıt tüketiminin azaltılması taşıt toplam ağırlığının azaltılması ile sağlanır; dolayısıyla azalan yakıt tüketimi sonucunda motor verimi de artar (Alim, 1998).

5.2 Malzeme Seçimi

Araç ağırlığının % 71'i çelik (kaporta ve paneller) iskelet sistemlerinden, % 15'i dökme demirden (motor bloğu, dişli kutuları, aktarma organları), % 4'ü lastikten (tekerlek, hortum) ve geri kalan kısmı ise polimer, alüminyum ve kompozit malzemelerden oluşmaktadır.

Günümüzde mekanik özellikler yönünden çeliklerle aynı, fakat yoğunluğu düşük olan malzemeler tercih edilmektedir. Bu sayede araç ağırlığında azalma meydana gelmektedir. Örneğin, motor bloğu için kullanılan dökme demir ($d = 7,7 \text{ gr/cm}^3$) yerine alüminyum ($d=2,7 \text{ gr/cm}^3$) veya magnezyum ($d=1,8 \text{ gr/cm}^3$) iyi bir seçim olabilir. Bu yeni malzemelerin kullanılması ile ağırlıkta 2,8 – 4,3 kat tasarruf sağlanmıştır.

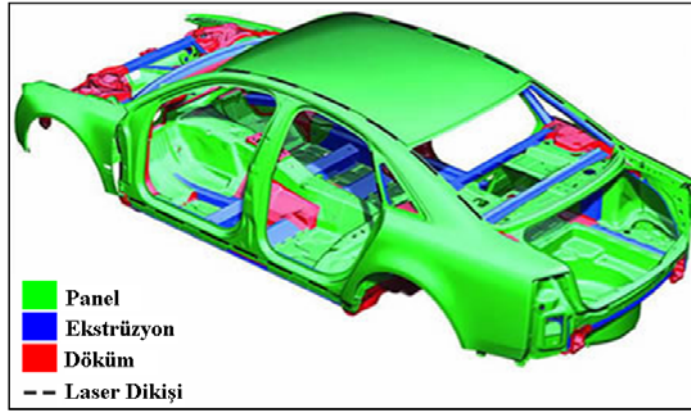
En büyük ağırlık tasarrufu araç ağırlığının % 60'ını oluşturan gövde panellerinde meydana gelmektedir. Burada kullanılabilecek malzemeler Çizelge 5,1'de verilmektedir. Kaporta, şasi ve panellerde ağırlık tasarrufunu başarabilmemiz için elastiklik modülü/ malzeme yoğunluğu olan özgül dayanımın yüksek olması gerekmektedir.

Çizelge 5.1 Kaporta ve panel malzemesi olarak kullanılabilen malzemelerin özellikleri

Malzeme	Yoğunluk $\rho \text{ (gr/cm}^3\text{)}$	E (Mpa)	Re (Mpa)	$\rho / E^{1/3}$	$\rho / Re^{1/2}$
Yumuşak Çelik	7,85	$2,1 \cdot 10^5$	220	1,32	0,53
Yüksek Dayançlı Çelik	7,84	$2,1 \cdot 10^5$	500	1,32	0,35
Alüminyum Alaşımı	2,7	$0,7 \cdot 10^5$	193	0,66	0,19
Cam Takviyeli plastik	1,8	$0,15 \cdot 10^5$	75	0,73	0,21

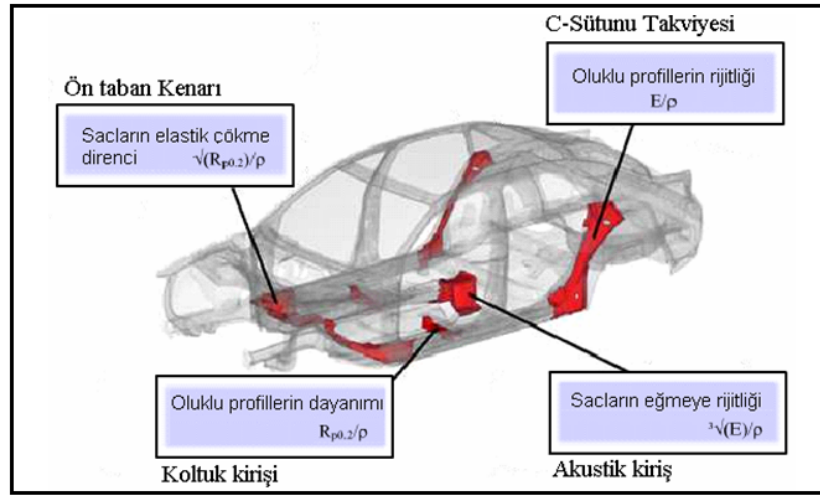
Malzeme seçimi yapılırken, kullanılacak malzemenin uygulanan yükler altında plastik akmaya maruz kalıp kalmama durumuna bağlı olarak en az ağırlığa sahip malzeme sehim veya plastik akma kıstasları kullanılarak belirlenebilir (Tepeli, 2005).

Gövde konstrüksiyonunda kullanılan malzemelerin kendilerinden beklenen özellikleri vermeleri doğrultusunda üretim yöntemi seçilmektedir. Hiç şüphesiz ki panel saclarının üretimi için en uygun yöntem yassı malzemelerin üretiminde başvurulana haddeleme işlemidir. Bunun yanında gövde iskeletini oluşturan profiller ekstrüzyonla üretilmektedir. Grift şekilli parçaların üretiminde ise en elverişli yöntem dökümdür. Özellikle basınçlı döküm gibi yenilikçi yöntemlerle karmaşık şekilli parçaların nihai boyuta yakın üretimleri otomobil sektörü için mantıklı bir seçimdir. Şekil 5,1’de gövde konstrüksiyonu ve gövdedeki yerlerine göre kullanılan malzemelerin üretim yöntemleri gösterilmiştir



Şekil.5.1 Gövde konstrüksiyonda kullanılan malzemelerin üretim yöntemleri
(www.aluminium.org.uk)

Gövdede kullanılan malzemeler gövdenin farklı bölgelerinde farklı zorlamalara maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle kullanılan malzemeler zorlamalara karşı dayanıklı olmalıdır. Her bir durum için farklı bir seçim kıstası bulunmaktadır. Şekil 5.2 ve Çizelge 5.2’de araç gövdesindeki farklı bölgelerdeki malzemelerin seçimkriterlerini göstermektedir.



Şekil 5.2 Ön taban kenarı, C sütunu takviyesi, koltuk kirişinin ve akustik kiriş'in şematik gösterimi (www.aluminium.org.uk).

Örnek olarak ön taban kenarında yüksek çökme direnci arzu edilmektedir. Yüksek çökme direncinden kasıt; darbelere elastik bölge içinde cevaplar verebilmektir. Aksi takdirde plastik şekil değiştirme sonrası pekleşme ve sonrasında gevrek kırılma olasılığı mevcuttur. Seçim kriterinin temeli; yeterli dayanımı temsil eden $R_{0.2}$ değerinin büyük ve düşük ağırlığı temsil eden ρ yoğunluk değerinin küçük seçilmesidir. Ön taban kenarı sehim kriteri malzeme seçimini belirlemektedir. Örnek bölge için kıstas $(R_{0.2})^{0.5}/\rho$ olacaktır.

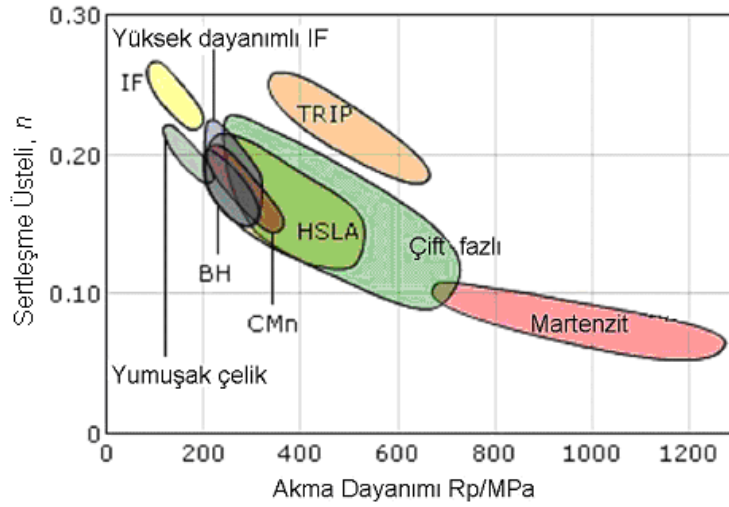
Çizelge 5.2 Aracın farklı bölgelerinde kullanılan malzemeler için seçim kriterleri

Gövdede farklı bölgeler	Malzeme seçimi için kıstas
Ön taban kenarında	$(R_{0.2})^{0.5} / \rho$
C sütunu takviyesi	E / ρ
Koltuk kirişi	$(R_{0.2})^{0.5} / \rho$
Akustik kiriş	$(E_{0.2})^{1/3} / \rho$

5.3 Gövde Panellerinde Kullanılan Soğuk Haddelenmiş Düşük Karbonlu Gelişmiş Çelikler

Geleneksel bir merdanede çelik levhayı sıcak haddelemeyle yaklaşık 1,5 mm kalınlığa getirmek mümkündür. Yüksek kaliteli yüzey bitirme ve hassas kalınlık kontrolünün arzu edildiği çıplak otomobil gövde panelleri gibi 1,5 mm'den daha ince levha uygulamalarında soğuk haddeleme seçilmelidir. Soğuk haddeleme sonrasında toplu veya sürekli tavlama yapılmaktadır, korozyondan korunma için ise sıklıkla metalik ve/veya organik kaplamalar

yapılmaktadır. Sürekli tavlama aşaması sıcak daldırma galvanizleme işlemiyle bir arada yapılabilir.



Şekil 5.3 Gövde panellerinde kullanılan çelik saclar için sertleşme üsteli-akma dayanımı ilişkisi. BH; fırında sertleşen çelik, CMn; C-Mn çeliği. (www.steeluniversity.org).

Otomobil gövde panelleri için akma dayanımının (>140 MPa) ve şekillendirilebilirliğin ($n>0,16$) makul bir kombinasyonunu sağlamak için geleneksel olarak düşük karbonlu yumuşak çelik ($C<0,13$) kullanılmaktadır. Ekstra derin çekme kaliteli (EDDQ) çelikler düşük karbon ($C<0,02$) içeriklerinden ötürü daha iyi şekillendirilebilirliğe ($n>0,22$) ancak daha düşük dayanım (>110 MPa) değerlerine sahiptir. Soğuk haddeli düşük karbonlu sacların derin çekilebilirliği $\{111\}$ düzlemiyle ve büyük ferriti tane boyutuyla maksimize edilmiştir. Bunlar büyük oranda derişimden, çözünen elementlerin dağılımlarından (özelikle karbon ve azot) ve onların tavlama sırasında oluşan çökeltilerinin dağılımlarından, kristalografisinden, morfolojisinden, boyutundan etkilenmektedir. Bunlar, çeliğin ilk katılma davranışıyla, segregasyon kalıntılarıyla, slab tavlama ile, tutma zamanıyla ve sıcaklığıyla, sıcak haddeleme programıyla (tasarı sırası, haddeleme bitiş sıcaklığı, haddeleme sonrası soğutma ve sarma sıcaklığı, soğuma hızı), soğuk haddelemedeki redüksiyonla, hem toplu hem de sürekli tavlama için tavlama parametreleriyle (ısıtma hızı, tavlama sıcaklığı ve süresi, soğuma hızı) kontrol edilmektedir. Tavlama sırasında çökelti oluşturmaya elverişli olan çözünen elementlerin uygun değerlerini sağlamak için seri tavlama öncesinde düşük bir sıcak haddeleme sıcaklığı kullanılmaktadır. Sürekli tavlamaadaki büyük ısıtma hızları dolayısıyla daha yüksek sarma sıcaklıkları gerekmektedir.

Otomobil gövde panellerinin şekillendirilme işleminde sonraki deformasyonlar sırasında

süreksiz akma meydana geldiğinden, soğuk haddeli ve tavlı düşük karbonlu çelikler için gerinme yaşlanmasından kaçınmak önemlidir. Süreksiz olan bu akmalar şekillendirilmiş parçanın bitiş yüzeyinde kabul edilemez dalgalı *Lüders Bantları* oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Gerinme yaşlanması, arayer karbon ve azot atomlarının dislokasyonlara göçmesi ve dislokasyonları kilitlemesi nedeniyle oluşmaktadır. Bu nedenle dayanımda artış, süneklikte ise düşüş görülmektedir. Bu yaşlanma oda sıcaklığında oluşabilir ve yaşlanma etkisinin ortaya çıkışı birkaç ay alabilir. Sürekli akmaya imkân verecek hareketli dislokasyonları oluşturmak üzere yapılan tavlama sonrası düşük (% 0,9–1,8) soğuk haddeleme redüksiyonuyla (tavlama haddesi olarak da bilinir) gerinme yaşlanmasını önlemek mümkündür.

Alternatif olarak modern çelik üretim teknikleriyle ve vanadyum, niyobyum, titanyum gibi karbür ve nitrür yapıcı güçlü ilavelerle toplam karbon yada azot içeriğini çok düşük seviyelere çekerek (%0,003), *C* yada *N* atomlarının serbest halde arayer şeklinde bulunmamasını sağlayarak gerinme yaşlanmasından kaçınılabılır. Nitrür oluşumu için aynı zamanda alüminyum ve bor da kullanılabilir. Bu yaklaşım stabilizasyon olarak adlandırılır. Tavlama işleminin bir bölümü olan aşırı yaşlanma aynı zamanda karbürleri oluşturmak ve serbest karbonu minimuma indirmek için kullanılır (www.steeluniversity.org).

5.3.1 IF Çeliği

Şu anda modern çelik üretimi ve sürekli tavlama ile arayersiz soğuk haddeli çelik üretmek (IF) mümkündür. Bu çelikler düşük dayanıma ve mükemmel süneklik-şekillendirilebilirliğe sahiptir. Stabilizasyon işlemi için yalnızca titanyum kullanılıyorsa *Ti* içeriği şu formülle hesaplanmaktadır;

$$Ti = 4 * \%C + 3,42 * \%N + 1,5 * \%S + 0,02$$

Aynı zamanda niyobyum da kullanılıyorsa;

$$Ti = 3,42 * \%N + 1,5 * \%S$$

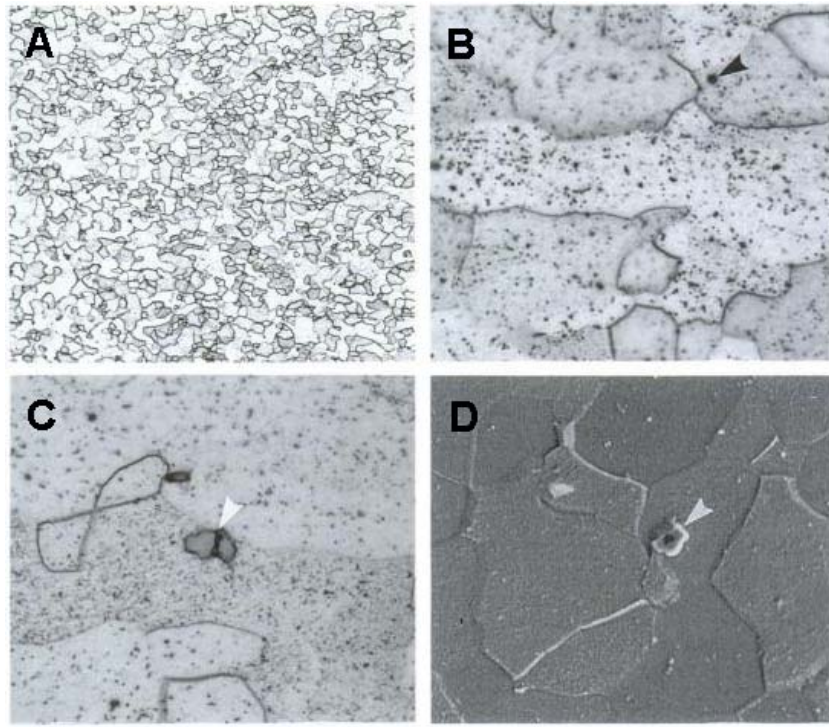
ve $Nb = 7,75 * \%C$ olmaktadır.

Çizelge 5.3 Tipik bir IF çeliği bileşimi

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% N	% Al	% Ti	% Nb
0,002	0,01	0,15	0,01	0,01	0,0025	0,04	0,025	0,016

Yüksek dayanımlı soğuk haddeli çelik 210 MPa'dan büyük bir akma dayanımına sahiptir. Düşük karbonlu ve ultra-düşük karbonlu çeliklerin dayanımlarını arttırmak için birçok farklı metalurjik seçenek mevcuttur. Her bir seçenek farklı maliyetlerle dayanımın, sürekliliğin, kalıpta şekillendirilebilirliğin ve çekilebilirliğin farklı kombinasyonlarını meydana getirmektedir. Aynı zamanda özellikler sıcak, soğuk haddeleme ve yukarıda açıklanan tavlama parametrelerinden büyük oranda etkilenmektedir.

Şekil 5.4'de %70 soğuk haddeli 720⁰ C'de kutu tavlı 90 HV sertliğe sahip ve kimyasal bileşimi ağırlıkça % (0,0035 C, 0,015 Si, 0,15 Mn, 0,014 P, 0,007 S, 0,081 Ti, 0,003 N) olan IF çeliği mikroyapıları gösterilmektedir.



Şekil.5.4 Ultra düşük karbonlu tavlınmış IF çeliği a) % 3 Nitale dağlanmış 100X, b) % 3 Nitale dağlanmış 1000X, c) % 3 Nitale dağlanmış 1000X, d) % 3 Nitale dağlanmış 1000X SEM görüntüsü (Samuels, 1999).

Uygun dayanım kazandırma mekanizmalarından biri olan katı eriyik sertleşmesi % 0.5 Si, % 0.1 P, % 1,5 Mn'ye kadar kullanılabilir. Örnek olarak % 0,01 P ilavesi akma dayanımını yaklaşık olarak 10 MPa arttırmaktadır ancak çok yüksek fosfor seviyeleri şekillendirme sonrası soğuk çalışma gevrekleşmesiyle sonuçlanabilir. Küçük miktardaki bor ilavesinin bu etkinin telafi edilmesine ve aynı zamanda katı eriyik sertleşmesine katkıda bulunduğu tespit

edilmiştir. Bu elementler yalnız başlarına yada bir kombinasyon içerisinde yüksek dayanımlı IF çeliklerinin üretimi için kullanılabilir.

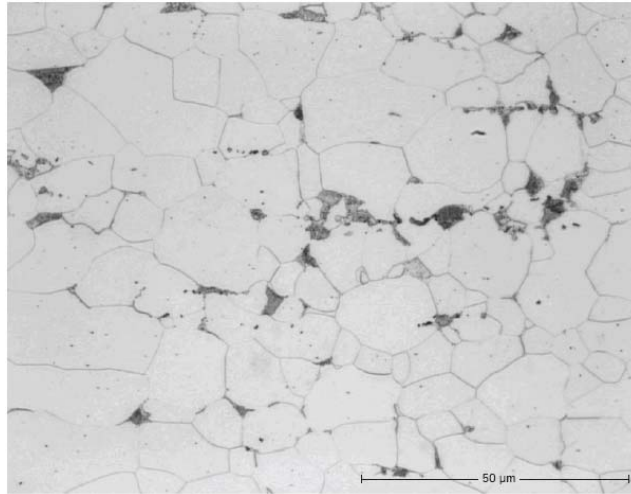
Çizelge 5.4 Tipik bir IF 260 çeliğin kimyasal bileşimi(www.steeluniversity.org)

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% N	% Al	% Ti	% B
0,003	0,01	1,2	0,005	0,01	0,0025	0,04	0,05	0,0015

IF 300 tipi çelikte benzer esaslı bileşimle (% 0,3 *Si*, % 1,2 *Mn*, % 0,05 *Ti* ve %0,003 *B*) daha yüksek dayanım elde edilmektedir (www.steeluniversity.org).

5.3.2 Fırında Sertleşen Çelikler

Soğuk haddeli ve tavlı çeliğin dayanımını arttırmanın bir diğer yolu da gerinme sertleşmesidir (yaşlanması). Bunu başarmak ya tavlama sonrası stabilizasyon altında yada karbür partiküllerin çözünmesiyle küçük ve kontrollü seviyede arayer karbonu (% 0,001) teminiyle mümkündür. Sonuç olarak üreticiden geldiği şekliyle dayanım düşük, şekillendirilebilirlik ise yüksektir ve arzu edilen dayanım, boya pişirme işlemi sırasında boyalı ve şekillendirilmiş parça üzerinde gerinme yaşlanması ile gerçekleştirilebilir (tipik olarak 170°C-20 dak.). Şekil 5.5’de fırında sertleşebilen çelik mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 5.5 Fırında Sertleşen çeliğin mikroyapısı (www.thyssenkrupp-steel.com)

Fırında Sertleştirilmiş tipler özellikle otomobil gövdelerindeki çökme dirençli uygulamalar için uygundur. Fırında sertleştirme ve katı eriyik sertleşme mekanizmalarının

kombinasyonu ile dayanımı 300 MPa ve şekillendirilebilirlik seviyeleri $n > 0,15$ ve $r > 1,3$ değerlerine çekilebilmektedir. Sürekli tavllanmış, Fırında Sertleştirilmiş tipler uygun işleme tabi tutularak ve bileşim kontrolüyle IF çeliklerinden farklılık gösterebilir, ancak toplu tavllanmış, Fırında Sertleşebilir tipler daha yüksek karbon içeriğini (%0,02) gerektirmektedir. Fırında Sertleşme etkisi tipik olarak 40 ile 50 MPa arasındadır. Servis şartlarında kullanılacak çeliğin dayanımını seçerken bu etkiyi hesaba katmak gereklidir.

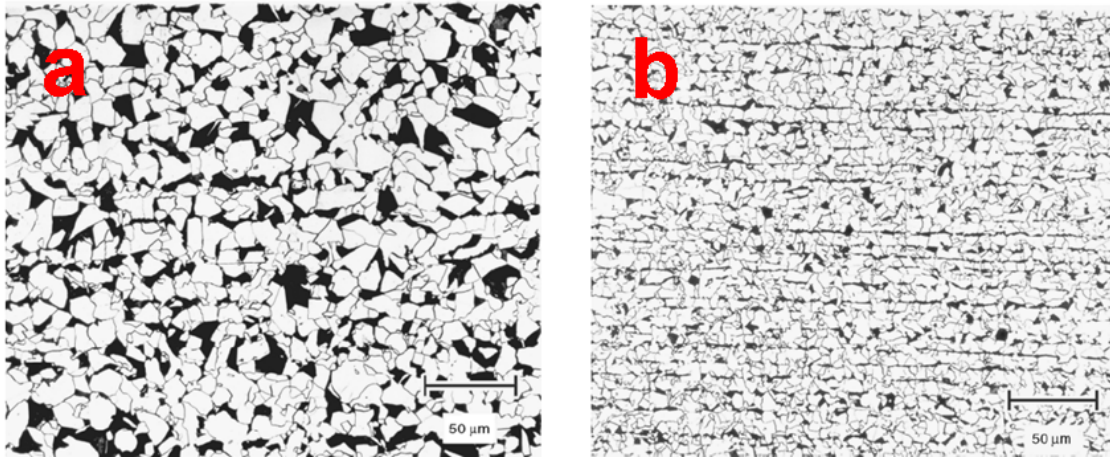
Çizelge 5.5 Sürekli olarak tavllanmış BH210 Tipi çeliğin kimyasal bileşimi
(www.steeluniversity.org).

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% N	% Al	% Ti	% Nb
0.003	0.01	0.5	0.03	0.01	0.0025	0.05	0.005	0.007

Daha yüksek dayanıma sahip olan BH 260 çeliği benzer bileşime sahiptir ancak % 1.0 *Mn* ve % 0.05 *P* değerleriyle farklılık göstermektedir (www.steeluniversity.org).

5.3.3 Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli-HSLA Çeliği

Yüksek dayanımlı sıcak haddeli çelikte, ince karbür ve nitrür oluşturan mikro alaşım elementleri ilavesiyle (*Nb*, *V* ve/veya *Ti*, % 0,1'e kadar) çökelme sertleşmesinden faydalanılır. Bu çelikler Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli (HSLA) çelikler olarak anılmaktadır ancak mikro alaşımli çelikler olarak da bilinmektedir.



Şekil 5.6 a) Yalın karbonlu UNS G 10150 çeliği eş eksenli ferrit-perlit adaları 200X, b) haddelendiği şekliyle mikro alaşımli çelik yapısı; eşeksenli ferrit ve bantlaşma 200X (Metals Handbook V09, 2004)

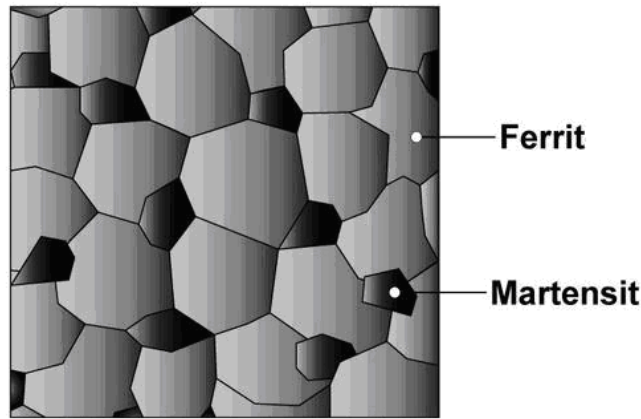
Soğuk haddeleme ve tavlama sonrasında partikül kabalaşması vasıtasıyla genellikle bu elementlerin dağılma dayancı etkisi kaybolmaktadır ancak bununla birlikte sonuçta ortaya çıkan ince taneli HSLA çeliği, dayanım ve şekillendirilebilirliğin cazip kombinasyonunu sahiptir. Şekil 5.6 ‘da soldaki görüntü de sağdaki görüntü de 200X büyütmevidir ancak mikro alaşımların etkisiyle ferrit taneleri oldukça küçülmüştür (www.steeluniversity.org).

Çizelge 5.6 Nb ile alaşımlandırılmış tipik HSLA çeliğinin kimyasal bileşimi
(www.steeluniversity.org).

% C	% Mn	% Nb	% Si
0,05–0,1	0,25–1,2	0,01–0,05	0,01–0,4

5.3.4 Çift Fazlı Çelikler

Hali hazırda birçok yüksek dayanımlı çelik geliştirilmiş durumdadır. Bunlar ferrit-martenzit mikroyapılı, düşük akma dayanımlı ancak çok yüksek çalışma sertleşmesi oranı gösteren böylece kalıpta şekillendirilebilirliği mükemmel olan ve şekillendirilmiş parçada yüksek dayanım elde edilen çift fazlı çelikleri de kapsamaktadır. Soğuk haddeli çeliklerde çift fazlı mikroyapı ani soğutmanın takip ettiği kritik aralıktaki sıcaklık sahasında sürekli tavlama ile elde edilmektedir. Şekil 5.7’de şematik çift fazlı çelik mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 5.7 Ferrit –martenzit mikroyapısının şematik gösterimi (www.worldautosteel.org)

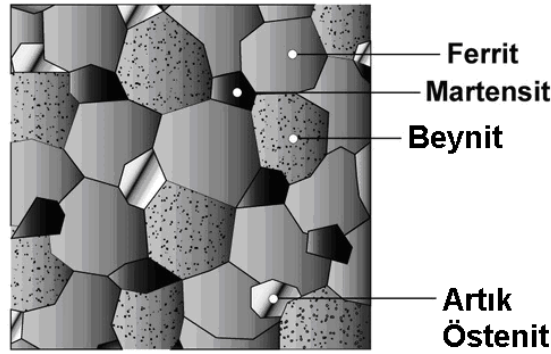
Soğutma ve sarma sırasındaki martenzit dönüşümünü gerçekleştirecek sertleştirilebilirlik seviyesine ulaşmak için çeliğin alaşım içeriği dikkatlice seçilmelidir. Özellikler iki fazın bağlı oranlarıyla, boyutlarıyla ve morfolojileriyle kontrol edilmektedirler. Çift fazlı çelikler, HSLA çeliklerine benzer dayanımlarıyla gelişmiş darbe dayanım kabiliyeti ve daha iyi şekillendirilebilirlik özellikleri sunmaktadır (www.steeluniversity.org).

Çizelge 5.7 Soğuk haddeli ve sıcak haddeli çift fazlı çeliklerin tipik kimyasal bileşimi (www.steeluniversity.org).

Soğuk Haddeli Çift Fazlı			Sıcak Haddeli Çift fazlı				
% C	% Mn	% Cr+ Mo	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo
0,08-0,18	1,6-2,2	0,4	0,05	1	1,5	0,6	0,4

5.3.5 TRIP Çeliği

Bir diğer yüksek dayanımlı gelişmiş çelik tipi TRIP çeliğidir. TRIP İngilizce; *Transformation Induced Plasticity* sözcüklerinin kısaltılmasıdır ve şekil değiştirme nedenli dönüşüm anlamındadır. Bu çelikler ferrit, beyrit, martenzit ve şekillendirme sırasında dönüşen artık östenitin karışımından oluşmuş, yüksek çalışma sertleşmesi oranına sahip ve yüksek çekme dayanımı veren mikroyapı sergilemektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 TRIP çeliğinin mikroyapısının şematik gösterimi (www.worldautosteel.org)

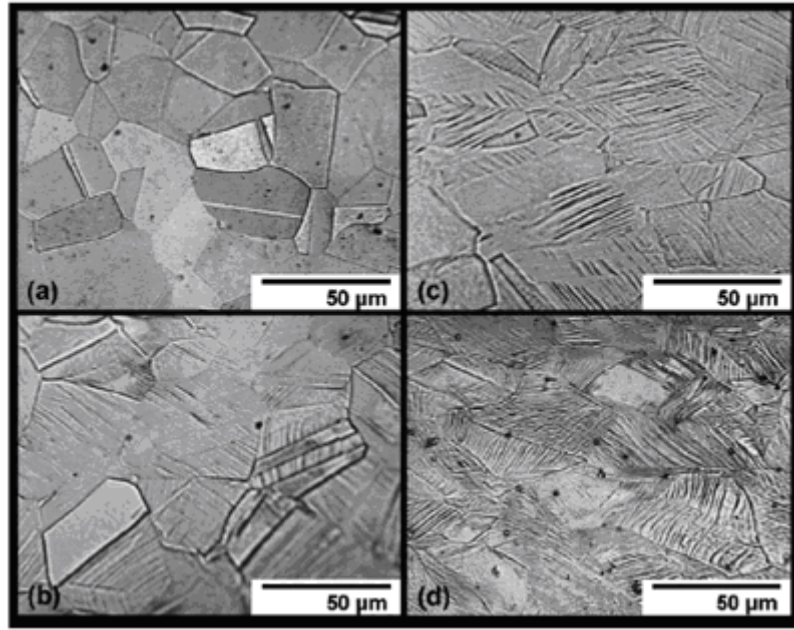
Bu nedenlerden dolayı özellikle yüksek seviyedeki gerinimlerde ($n > 0,2$) ve benzer yüksek dayanım potansiyeline sahip çift fazlı çeliklerden daha iyi şekillendirilebilirliğe sahiptirler. TRIP çelikleri çift fazlı çeliklerden daha yüksek silisyum ve/veya alüminyum ve/veya fosfor seviyelerine gereksinim duymaktadır. Ancak üretimleri zordur. Bazı yüksek dayanımlı çelikler çift fazlı çeliklerin mikroyapısal özelliklerini ve yüksek çalışma sertleşme oranlarını ek çökelme işlemleriyle bir araya getirebilmektedir (www.steeluniversity.org).

Çizelge 5.8 Farklı tipteki TRIP çeliklerinin kimyasal bileşimleri (www.steeluniversity.org).

Si alaşımlı TRIP 700/800			Al alaşımlı TRIP 600		
% C	% Mn	% Si	% C	% Mn	% Al
0,2	1,5	1,5	0,2	1,5	2,0

5.3.6 TWIP Çeliği

Hâlihazırda geliştirilmekte olan yüksek dayanımlı bir başka çelik ailesi ise TWIP çelikleridir. TWIP İngilizce; *Twinning Induced Plasticity* ifadesinin baş harflerinin kısaltılmasıdır ve şekil değiştirme nedeniyle ikizlenme anlamındadır. Bu çelikler, düşük yığılma (stacking) hatası enerjisini sağlamak için manganla (% 30'a kadar) ve alüminyumla (%9'a kadar) stabilize edilmiş tam östenitik çeliklerdir. Çok yüksek süneklik (% 88 toplam uzamaya kadar) ve yüksek dayanım (620 MPa çekme dayanımı) değerleri sergilemektedirler. Sertleşme mekanizması kaymaya karşın ikizlenme tabanlıdır.



Şekil 5.9 Tipik TWIP çeliği mikroyapıları a) Şekil değiştirmemiş b) 18% gerinmeli, c) 26% gerinmeli, d) 34% gerinmeli (www.msm.cam.ac.uk).

Otomotiv uygulamaları için birçok şekillenebilir ve yüksek dayanımlı çelik sadece son on yıl içerisinde geliştirilmiş bulunmaktadır. Bireysel çelik üreticileri, bileşimleri ve işlem şartlarını kendi fabrikalarının spesifik kapasitelerine, proseslerine, kaplama işlemlerine ve müşteri ihtiyaçlarına göre seçmektedirler. Farklı galvanizleme süreçleri kaplanan çeliğin mikroyapısını ve bileşimini farklı şekillerde etkilemektedir. Yeni tip bu çelikler tasarlanırken bu durum da hesaba katılmak zorundadır (www.steeluniversity.org).

5.4 Otomobillerde Kullanılan Polimerler ve Özellikleri

Polimerler, büyük moleküllerden oluşan maddelerdir. Polimer moleküllerini oluşturmak üzere birbirine kimyasal bağla bağlanan küçük moleküllere monomer denir. Monomer

birimlerinden başlayarak polimer moleküllerinin elde edilmesini sağlayan reaksiyonlara ise polimerizasyon denir. Polimerler, termoset plastikler ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır.

Termoset plastikler; özel sentetik reçinelerden yapılırlar. Isıtıldıklarında yumuşak ve akıcı hale gelerek kalıbı doldururlar. Isı ve basınç altında şekil verme sırasında karşılıklı bağlanma sonucu sertleşirler. Yeniden işlenme imkânları yoktur. Sertlik ve dayanımları termoplastiklerden daha yüksektir. Uygun pekiştiriciler kullanılarak kompozit malzeme tasarımında kullanılabilirler.

Termoplastikler; ısıtıldıkları zaman kalıplanabilen ve soğutulduğunda katılaşabilen malzemelerdir. Termoset plastiklerde olduğu gibi kalıplama esnasında kimyasal değişime uğramazlar; sadece fiziksel değişime uğrarlar. Bu nedenle toz haline getirilebilmek için tekrar öğütülebilir, ısıtılabilir ve kalıplanabilir. Yaygın olarak kullanılabilen termoplastiklerin çoğu kompozit malzeme şeklinde pekiştirilebilir. Bu amaçla kullanılan en yaygın malzeme cam fiberlerdir. Takviyeli termoplastikler, genelde termoplastik reçinelerin takviye edilmesiyle yapılırlar (Yadeli, 2005).

5.4.1 Otomobil Üzerinde Kullanılan Polimer Parçalar

1994 yılından sonra araç üzerinde ana panel uygulamalarının %13 'ünde çeliğin yerini plastik esaslı malzemeler almıştır. Özellikle tavan, kaporta, kapı iç döşemeleri, gövde panelleri ve tamponlar plastiklerin kullanıldığı araç parçalarıdır. Çizelge 5.9'da ise çeşitli plastik bileşenlerinin otomobilde kullanım alanları görülmektedir.

Çizelge 5.9 Otomobillerde plastik bileşenlerinin kullanım alanları (Yadeli, 2005).

Plastik Adı	Taşıtta Kullanıldığı Yerler
Polipropilen	Taşıt iç dekorasyonu, akü kutusu, halı ve dokuma, ısıtıcı kanalı, distribütör başlığı, ayna çerçevesi, hava filtresi, ön ızgara, ön lamba koruyucusu, tampon, radyatör fanı, vantilatör, direksiyon simidi, yakıt deposu, tekerlek kapağı, tampon kornişleri, gösterge kabloları.
Poliamid (Naylon)	Karbüratör, valfler, gaz ve buhar contaları, pervaneler, hava giriş manifoldu, radyatör soğutma fanı, debriyaj fren sistemi, radyatör, kafa desteği, dişli kayışları, çekme halatları, dişliler, havalandırma kapağı
SMC	Motor üst kaputu, tampon
BMC	Motor üst kaputu
Poliasetal	Dişliler, flanşlar, gösterge panosu

Çizelge 5.9 (Devamı) Otomobillerde plastik bileşenlerinin kullanım alanları (Yadeli, 2005).

Poliakrilik	Aynalar, sinyal lambaları
Polikarbonat	Sinyal lambaları, far kapakları, tampon, ön cephe parçaları, kırışlar
PTFE	Hidrolik donanım parçaları
PBT	Kapı, pencere, bobin gövdeleri
SAN	Sinyal lamba camları
PSU	Pompalar, filtre elemanları
Selüloz nitrat	Direksiyon simidi kaplanması
PUR	Tel ve kablo yalıtımı, hortum üretimi, tekerlek
ABS	Kaporta üst parmaklığı, ayna çerçevesi, ön ızgara, vites topuzu, vantilatör, kapı iç döşemesi, kafa desteği, koltuklar, iç döşemeler, iç göstergeler
Polietilen	Isıtıcı kanalı, çatı, yakıt bidonu, kablo yalıtımı, silecek su deposu
PVC	Direksiyon simidi, kapı iç döşemesi, kol desteği, çatı bagaj paspası, halı, kafa desteği
Fenolik kaplama tozu	Direksiyon, vites kutusu, gösterge panosu, koltuk başlığı, ayna çerçeveleri, tampon, çamurluk, koruyucu şeritler, ızgara, kapı panoları, tavan çerçeveleri, konsollar, bagaj rafları, contalar
Fenol reçine	Distribütör, rotor kolu, küllükler
Poliüretanlar	Direksiyon simidi muhafazası, filtre kabı
Polistrol	sunî reçine cilasının temel maddesi, izolasyon maddesi
Epoksi reçine	Dolgu maddesi, cam elyafıyla güçlendirilmiş karoseri parçaları
Doymamış polyester reçineleri	Karoseri parçaları

5.5 Otomobillerde Kullanılan Metalik Malzemeler

Bir binek otomobilde %50–60 Fe esaslı (%15–20 HSLA), %10–20 plastik ve lastik, %5–10 alüminyum kullanılmaktadır kalan ise diğer malzemelerdir (Smith, 2001). Görüldüğü gibi bir binek otomobilde yaklaşık % 70 oranında metalik malzemeler kullanılmaktadır. Kalan kısmı plastik, lastik, kompozit ve seramik malzemeler oluşturmaktadır.

5.5.1 Motor Aksamında Kullanılan Geleneksel Malzemeler

Araçlarda motor; yüksek sıcaklık, yüksek hız, aşınma, yorulma ve korozyon gibi metalik malzemeleri çok zorlayan unsurlarla çalışabilecek kabiliyette olmalıdır. Bu noktada malzeme-tasarım-üretilebilirlik konusu ön çıkmaktadır. Çizelge 5.10 araç motorlarında kullanılan malzemeleri kullanım yerlerine göre göstermektedir.

Çizelge 5.10 Araç motorlarında kullanılan malzemeleri ve kullanım yerleri (Gönül 2001, Özdemir 2001).

Motor	
Başlıca Parçalar	Kullanılan Malzeme(ler)
Piston	AlSi12CuNi ve Etial-195
Piston Pimi	Sementasyon çeliği 15Cr3
Biyel Kolu	Ck35, 41CrMo4, DDK
Silindir Kapağı	GkAlSi12CuNiMgW ve Perlitik Gri Dökme Demir
Silindir Kafası	DDL, AlSi5CuMg
Silindir Gömleği	Etial-195, DDL
Krank Mili	Dövme krank milleri; ıslah çeliği 42CrMo4, Dökme krank milleri; GGG-60. Bunun dışında 14NiCr18, 37MnSi5, 31NiCr14, 34NiCrMo6, 41VCrMo4, 34CrS4, 34CrMo4, 30CrMoV9, 36NiCr10
Krank Kepi	DDL
Volan Dişlisi	1040, DDL, Cf45
Supaplar	Emme supapları; X45CrSi93 Egzoz supaplar; X53CrMnNiN219
Supap İticipleri	DDL
Supap Kılavuzları	DDL
Eksantrik (Kam) Mili	GGG-50, 34CrNiMo6, Cf70, 15CrMo5, Cf45, Cf53, 14NiCr14 ve Alacalı Döküm
Yatak Zarfı	DDK
Segman	DDK

Mühendislik problemler tasarımı ve malzeme seçimiyle çözülmektedir. İyi tasarım-iyi malzeme seçimi en uzun ömürlü ve sorunsuz motorların üretilebilmesi demektir. İyi tasarım

bir yere kadar başarılı olurken iyi malzeme seçimi kötü bir tasarımın eksilerini bertaraf edebilmektedir. Örneğin aşınarak çalışacak bir makine parçası tasarlanmışsa uygun malzeme kullanarak aşınma en alt düzeye çekilerek sorunsuz bir işletme sağlanabilmektedir. Tam tersi durumlar da söz konusu olabilmektedir. Çok iyi bir tasarım yeterli korozyon-yorulma-çekme dayanımı veya sertlik gibi özelliklere sahip olmadığından hizmet şartlarına bağlı olarak ileride hataya sebep olabilmektedir. Ancak bunların yanında yapılan tasarımın seçilen malzemeye hayata geçirilebilirliğe de üretilebilirliğine bağlıdır.

Çizelge 5.11 Radyatörde kullanılan Al malzemenin kimyasal içeriği (Gönül 2001, Özdemir 2001).

Radyatör								
Malzeme	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti
Al-3005	0,6	0,7	0,3	1-1,5	0,2-0,6	0,1	0,25	0,1

Çizelge 5.11 radyatör yapımında kullanılan Al-3005 malzemesini kimyasal içeriğini vermektedir. Radyatör, motoru soğutan sıvının soğutulması için kullanılan bir sistemin ana unsurudur. Taşınımın mükemmel ısı aktarımı sağlamak için çok ince hesaplanmış birçok kanatçıga sahiptir. Radyatör malzemesinden beklenen ilk özellik iyi ısı iletkenliği ve yoldan sekerek radyatörü tahrip edebilecek taşlara karşı yeterli dayanımı sağlayabilmesidir. Al; yüksek ısı iletkenliği, kolay şekillendirilebilirliği ve yeterli dayanımı sayesinde radyatör için en mantıklı seçim olmaktadır.

5.5.2 Şaside ve Gövdede Kullanılan Geleneksel Malzemeler

Şasi, aracın iskeleti gövde ise iskeleti örten bir örtü olarak anılabilir. Şasi sayesinde oluşturulan kafes özellikle kaza halinde çok büyük görevler üstlenerek araç içerisindekilerin zarar görmemesini sağlamaktadır. Bu nedenle şasinin yolcuların bulunduğu kafeste rijitlik, darbe alacak bölgeleri olan ön ve arkada ise darbeye ortaya çıkan enerjiyi sönümleyebilen daha sünek ve tok malzemeler kullanılmalıdır. Şasi ayrıca aracın yol tutuşu üzerinde de büyük etkiye sahiptir ve bu özellikler doğrultusunda şasinin burulma direnci önemlidir. Çizelge 5.12 şasi de kullanılan geleneksel malzemeleri göstermektedir.

Çizelge 5.12 Şasi de kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül 2001, Özdemir 2001).

Şasi								
Malzeme	C(max)				P(max)	S(max)	Al(min)	N(max)
DIN 17100-66R St42-1	0,25				0,08	0,05	0,02	-
TS 2162 Fe44-2	Kalınlıklarına göre(mm)				0,05	0,05	-	0,009
	≤16	>16	>30	>40				
		≤30	≤40	≤63				
DIN 17100 St44-2	0,21	0,21	0,21	0,22				

Günümüzde gövde panellerinin işlevleri değişmeye başlamıştır, markalara bağlı olarak gövde panellerinde plastik esaslı malzemeler dahi kullanılabilir. Bu paneller ağırlık tasarrufu, çökme ve bel verme gibi kıstasları karşıladıkları sürece iskelet olarak anılan şasinin üzerini bir örtü gibi örtme görevini üstlenmişlerdir. İyi şekillendirilebilirlik ve sürekli akma özelliklerini sağlanabilmesi için düşük karbonlu çelik gövde için geleneksel olarak kullanılan malzemeler. Ağırlık tasarrufu sağlaması açısından da alüminyum tercih edilir bir malzeme haline gelmiştir. Çizelge 5.13 gövde panellerinde kullanılan geleneksel malzemeleri göstermektedir.

Çizelge 5.13 Gövde panellerinde kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).

Gövde Panelleri											
Malzeme	%C(max)				%P(max)		%S(max)		%N(max)		
	Kalınlığa göre(≤16mm)										
TS 2162 Fe44-2 (DIN 17100 St44-2)	0,21				0,05		0,05		0,009		
Al Esaslı	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%V	%Ti	%Al	
2008	0,5-0,8	0,4	0,7-1,1	0,3	0,25-0,5	0,1	0,25	0,05	0,1	Kalan	
2036	0,5	0,5	2,2-3	0,1-0,4	0,3-0,6	0,1	0,25	-	0,15	Kalan	
6010	0,8-1,2	0,5	0,15-0,6	0,2-0,8	0,6-1	0,1	0,25	-	0,1	Kalan	
6053	0,7	0,35	0,1	-	1,1-1,4	0,15-0,35	0,1	-	-	Kalan	
7004	0,25	0,35	0,05	0,2-0,7	1,2	0,05	3,8-4,6	-	0,05	Kalan	

Çizelge 5.13 (Devamı) Gövde panellerinde kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).

3004	0,3	0,7	0,25	1-1,5	0,8-1,3	-	0,25	-	-	Kalan
5052	0,25	0,4	0,1	0,1	2,2-2,8	0,15-0,35	0,1	-	-	Kalan
5182	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4-5	0,1	0,25	-	0,1	Kalan

5.5.3 Aktarma Organlarında Kullanılan Geleneksel Malzemeler

Aktarma organlarında genellikle dişliler ve miller gibi hareketli ve silindirik komponentler mevcuttur. Aktarma organlarında burulma dayanımı önemlidir. Farklı durumlarda bu elemanlar özellikle burulmaya zorlanmaktadır. Dişlilerde sementasyon veya nitrasyona uygunluk bir kıstas olmaktadır. Çizelge 5.14 aktarma organlarında kullanılan malzemeleri göstermektedir.

Çizelge 5.14 Aktarma organlarında kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).

Aktarma Organları	
Parçalar	Malzemeler
Debriyaj Ayırma Plakası	DDL
Aks	20MoCr4, 20MoCrS4, 25MoCr4, 25MoCrS4, C60, 37 MnSi5
Kardan Mili	31NiCr14
Diferansiyel Kapağı	DDK
Vites Dişlileri	21NiCrMo2

5.5.4 Süspansiyon Sistemlerinde ve Direksiyon Kutusunda Kullanılan Geleneksel Malzemeler

Günümüzde süspansiyon sistemleri giderek karmaşılaşmaktadır. Süspansiyon parçaları hafif ve dayanımlı olmalıdır. Korozyon dayanımı ve yorulma dayanımı bu malzemeler için özellikle önemlidir. Çizelge 5.15 süspansiyon sistemlerinde ve direksiyon kutusunda kullanılan malzemeleri göstermektedir. Direksiyon kutusunda ise nispeten yüksek dayanımından ötürü küresel grafitli dökme demir tercih edilmiştir.

Çizelge 5.15 Aktarma organlarında kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül 2001, Özdemir, 2001).

Süspansiyon Sistemi			
Parçalar		Malzeme	
Helisel Yay		55Si7, 65Si7 ve 60SiMn5	
Süspansiyon Kolu		DDK	
Süspansiyon Parçaları		6063 Al	
Direksiyon Kutusu			
Malzeme	% S	% P	% Mn
DDK	0,25	0,15	0,34

5.5.5 Fren Sisteminde Kullanılan Geleneksel Malzemeler

Fren sistemlerinde sürtünme önemli olduğu için sürekli ısı üretimi de söz konusu olmaktadır bu nedenle hidrolik fren sistemlerinde kullanılan fren sıvılarının yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi gerekmektedir. Ayrıca fren sistemi elemanlarının aşınmaya karşı dayanıklı olmaları arzu edilmektedir. Çizelge 5.16 fren sistemlerinde kullanılan malzemeleri göstermektedir

Çizelge 5.16 Fren sisteminde kullanılan geleneksel malzemeler (Gönül, 2001, Özdemir, 2001).

Fren Sistemi	
Parçalar	Malzeme
Fren Kampanası	DDL
Kampana Ön Travers Ağırlığı	DDL
Fren Diski	DDL
Fren Kundağı	DDK
Porya	DDK
Kampana Çemberi	DDL
Fren Kutusu	Al-Si5Cu3

6. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN METAL MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİNE GÖRE KAYNAK PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ

Otomobil üretiminde birçok farklı metalsel malzeme kullanılmaktadır. Her malzemenin özelliği birbirinden farklıdır bu nedenle her yöntem her malzeme için kullanılamaz. Kullanılabilecek olursa bile farklı özelliklere göre farklı kaynak parametreleri belirlemek gerekmektedir. Elektrik esaslı yöntemlerde malzemenin elektrik iletkenliği, ergitme esaslı yöntemlerde ise ısı iletkenliği parametrelerin belirlenmesi için bir unsur olabilmektedir. Malzeme üzerindeki kaplama, elektrik akımı, ilerleme hızı, basınç, soğuma hızı, koruyucu gaz cinsi ve hızı parametrelerden birkaçıdır.

6.1 Direnç Nokta Kaynak Parametreleri

Elektrot kuvveti, elektrot temas yüzeyinin çapı, sıkma süresi, kaynak süresi, tutma süresi ve kaynak akımı direnç nokta kaynağı parametrelerini oluşturmaktadır. Bu parametreler sac kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 6.1 direnç nokta kaynağında uygun olan parametreleri göstermektedir.

Çizelge 6.1 Kaynak parametreleri için hedef değerler (www.robot-welding.com).

Sac Kalınlığı, t (mm)	Elektrot Baskı Kuvveti, F (kN)	Kaynak Akımı, I (A)	Kaynak Süresi (çevrim)	Tutma Süresi (çevrim)	Elektrot Çapı, d (mm)
0.63 + 0.63	2.00	8 500	6	1	6
0.71 + 0.71	2.12	8 750	7	1	6
0.80 + 0.80	2.24	9 000	8	2	6
0.90 + 0.90	2.36	9 250	9	2	6
1.00 + 1.00	2.50	9 500	10	2	6
1.12 + 1.12	2.80	9 750	11	2	6
1.25 + 1.25	3.15	10 000	13	3	6 7
1.40 + 1.40	3.55	10 300	14	3	6 7
1.50 + 1.50	3.65	10 450	15	3	6 7
1.60 + 1.60	4.00	10 600	16	3	6 7
1.80 + 1.80	4.50	10 900	18	3	6 7

Çizelge 6.1 (Devamı) Kaynak parametreleri için hedef değerler (www.robot-welding.com).

2.00 + 2.00	5.00	11 200	3x7+2	4	7 8
2.24 + 2.24	5.30	11 500	3x8+2	4	7 8
2.50 + 2.50	5.60	11 800	3x9+3	5	8
2.80 + 2.80	6.00	12 200	4x8+2	6	8
3.00 + 3.00	6.15	12 350	4x9+2	6	8
3.15 + 3.15	6.30	12 500	4x9+2	6	8

6.1.1 Elektrot Baskı Kuvveti

Elektrot kuvvetinin amacı metal levhaları sıkarak birbirleriyle birleştirmektir. Bu işlem büyük elektrot kuvvetleri gerektirmektedir aksi takdirde kaynak kalitesi yeterli seviyede olmayacaktır. Ancak bu kuvvet başka problemlere yol açacak kadar da büyük olmamalıdır. Elektrot kuvveti artırıldığında birleşme için gerekli olan ısı enerjisi azalacaktır. Bu ise daha büyük elektrot kuvvetleri ve daha büyük kaynak akımlarının gerekmesi demektir. Akımın çok büyük olduğu durumlarda levha ve elektrot arasında sıçramalar meydana gelmektedir. Bu sıçramalar elektrotların levhaya saplanıp kalmasına neden olmaktadır.

Sağlıklı birleşmeler için hedeflenen elektrot basınç değeri 90 N/mm^2 'dir. Problemlerden bir diğeri ise kaynak sırasında temas yüzey alanının artmasıdır. Bütün kaynak işlemi sırasında aynı şartları sağlayabilmek için elektrot kuvveti kademeli olarak artırılmalıdır. Burada daha da zor olan; elektrotların mantarlaşma hızlarıyla kuvveti artırma hızlarının aynı oranda değiştirilebilmesi zorluğudur ve genellikle ortalama değerler seçilmektedir (www.robot-welding.com).

6.1.2 Elektrot Temas Alanı Çapı

Elektrot temas yüzeyi çapı $5 \cdot t^{1/2}$ 'dir (t = çelik levhanın kalınlığıdır). Bu nedenle herbiri 1 mm kalınlığında olan iki levhanın nokta kaynağı yapılırken çekirdek çapı $5 \cdot t^{1/2}$ kuralına göre 5 mm olmalıdır. Elektrot temas yüzeyi çapı çekirdek çapından ufak bir miktar daha büyük olmalıdır. Örnek olarak 1 mm'lik levhaların birleştirilmesinde 6 mm'lik elektrot çapı gerekmektedir. 6 mm'lik temas çapı 0,5–1,25 mm kalınlığındaki levha kalınlıkları için standartlaşmıştır. Bu temas çapı yeni elektrotlar için ISO standartlarına uymaktadır (www.robot-welding.com).

6.1.3 Sıkma Süresi

Sıkma zamanı, elektrotun uyguladığı ilk kuvvet zamanıyla akımın ilk verildiği zaman arasındaki süredir. Sıkma zamanı, elektrot kuvvetinin istenilen seviyeye gelmesine kadar kaynak akımının geciktirilmesi için gereklidir (www.robot-welding.com).

6.1.4 Kaynak Süresi

Kaynak süresi, kaynak akımının metal levhaya uygulandığı sürece geçen zamandır. Kaynak zamanı ölçülür ve hat voltajının çevrimleri içerisinde ayarlanır. 50 Hz'lik güç sistemlerinde bir çevrim saniyenin 1/50'si dir (Amerika'da 60 Hz kullanılır).

Kaynak süresi nokta kaynağı için fazla veya eksik ise uygun kaynak süresi için kesin bir değer vermek zordur. Örneğin:

- Kaynak süresi mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır.
- Kaynak akımı mümkün olan en yüksek kaliteyi vermelidir.
- Seçilen kaynak parametreleri elektrotlarda mümkün olan en küçük aşınmayı verecek şekilde seçilmelidir.
- Kalın levhaların kaynağı sırasında kaynak süresi düğme çapının artmasına neden olacaktır.
- Kaynak donanımının, kaynak akımı ve elektrot kuvveti gereksinimlerini karşılayamaması durumu için kaynak süresi ayarlanmalıdır. (Daha uzun bir kaynak süresine ihtiyaç duyulabilir.)
- Elektrot çapı mümkün olduğunca küçük olmalıdır aksi takdirde elektrot girintileşmeye neden olacaktır. (Daha kısa kaynak zamanıyla girintileşme önlenabilir)
- Elektrot temas yüzeyinin sabit tutulduğu bir değerde otomatik uç değiştirme ile kaynak süresi ayarlanmalıdır. (Bu daha kısa kaynak süresi demektir.)

2 mm'den daha kalın levhaların kaynağı sırasında kaynak süresini darbe sayılarına bölmek ısı enerjisinin artışı önlemek amacıyla elverişli olabilir. Bu yöntem iyi görünümlü fakat düşük dayanımlı direnç nokta kaynakları verecektir.

Levha kalınlıklarının 10 ile çarpılmasıyla kaynak süresi için yeterli değerler elde edilebilir. Her biri 1 mm kalınlığında olan levhaların kaynağı için uygun kaynak süresi 50 Hz’de 10 periyot olmalıdır www.robot-welding.com

6.1.5 Tutma-Soğuma Süresi

Tutma süresi kaynağı soğutmak için elektrotların levhaya hala uygulandığı kaynak sonrası süredir. Kaynak tekniğı açısından düşünöldüğünde tutma süresi en ilginç kaynak parametresidir. Tutma süresi kaynaklı parçaların çıkarılması öncesi kaynak düğmesinin katılaşması için gerekli bir süredir. Ancak bu sürenin aşırı uzun olması kaynak noktasındaki ısının elektrotta yayılıp elektrotu ısıtmasına neden olabilmektedir. Bu durumda elektrot aşınmaya daha çok maruz kalacaktır ve dahası karbon içeriğinin %0,1’den daha büyük olması durumuna kaynakta gevreklik olacaktır. Galvanizli karbon çeliğini kaynaklarken daha uzun tutma süresi önerilmektedir (www.robot-welding.com).

6.1.6 Kaynak Akımı

Kaynak akımı, kaynağı gerçekleştirmek için devreden geçen akımdır. Kaynak akım miktarı iki şeyle kontrol edilmektedir; birincisi trafo ayar şalteri, ikincisi kaynağı yapmak için elverişli akımın yüzdesinin kontrolüdür. Düşük yüzdeli akım ayarları normalde kaynak kalitesi düştüğü için tavsiye edilmemektedir. Ayar şalteriyle ve %70–90 elverişli akımla doğru akım miktarını elde etmek mümkündür.

Kaynak akımı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Kullanılacak akım belirlenirken metal ve levha arasında sıçramalar görölene kadar akım kademeli olarak arttırılır. Doğru kaynak akımına ulaşıldığı böyle anlaşılır (www.robot-welding.com).

6.2 Direnç Dikiş Kaynağı Parametreleri

Nokta direnç kaynağındaki belirgin kavramlar direnç dikiş kaynağını açıklamak için de kullanılabilir, çünkü dikiş kaynağı genellikle bir seri nokta kaynağının üst üste bindirilmesinden oluşmaktadır. Nokta kaynağı benzeşiminden, düşük karbonlu çeliklerin dikiş kaynağındaki her bir nokta için uygun süre, deneye dayalı olarak denklem 1’den yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$T = 0.0292 \cdot S^2 \quad (6.1)$$

S (mm) kaynak edilecek olan sacların toplam kalınlığı ve T (sn) uygun kaynak süresidir. Kaynak süresinin bu değerden küçük olması durumunda nüfuziyet için düzgün ısı akışı yetersiz olacaktır. Kaynak adiyabatik karakter sergileyerek kaynak çekirdek boyutu kararsızlık gösterecek ve ısının yüzeyden atılması söz konusu olabilecektir. Kaynak süresinin uygun değerden büyük olması durumunda ise elektrotların ısınması söz konusudur. Isınma kaynağın geç soğumasıyla, elektrotun saplanmasıyla ve kaynak yüzeyinde metalurjik süreksizliklerin ortaya çıkmasına neden olabilir.

Dikiş kaynağındaki uygulamalar için uygun kaynak süresi ortaya konmalıdır. Kaynak süresi, kaynak üzerinde verilen bir noktanın tekerlekle süre olarak ne uzunlukta temasta olacağı demektir. Pratikte ilerleme hızı ve elektrot iz uzunluğu L , kontrollü olmalıdır ki $0,0292S^2$ kuralı sağlanmış olsun. Müteakip eşitlikler bazı değişkenleri sabitlemek ve bu kabullerden sonuçlanan diğer değişkenleri hesaplamak için kullanılmaktadır (Metals Handbook V06, 1993).

Düşük karbonlu çelikler için bindirme kaynakları için eşitlik 6.1, eşitlik 6.2'deki hale dönmemektedir

$$T = N / F = 0.0292 \cdot S^2 \quad (6.2)$$

N : kaynak bölgesi içinde oluşan çekirdeklerinin sayısı, F : uygulanan akımın darbe frekansıdır. İşlemin kontrolü ve sızdırmazlık sağlamak için çekirdek açıklığı eşitlik 6.3'deki gibi bir kuralla tanımlanmıştır;

$$1.7S \leq D \leq 2,5S \quad (6.3)$$

D : kaynak çekirdeği açıklığıdır (mm) ve V (mm/sn) kaynak hızı olmak üzere eşitlik 6.4;

$$V = D \cdot F \quad (6.4)$$

Ne var ki uygun kaynak hızını tahmin edebilmek için öncelikle temas izinin uzunluğu L (mm) bilinmelidir;

$$L = D \cdot N \quad (6.5)$$

İstenilen L 'nin D 'den ve N 'den hesaplanması için tekerlek çapının, bastırma kuvvetinin ve akımın belirlenmesi de ayrı bir yöntemdir. Eşitlik 6.5 ve 6.3'ü eşitlik 6.4'de yerine koyarak;

$$V = L \cdot F / N \quad (6.6)$$

Ve

$$L_{MAX} = 2,5N \cdot S \quad (6.7)$$

Eşitlik 6.2'yi tekrar düzenleyerek;

$$N = 0,0292F \cdot S^2 \quad (6.8)$$

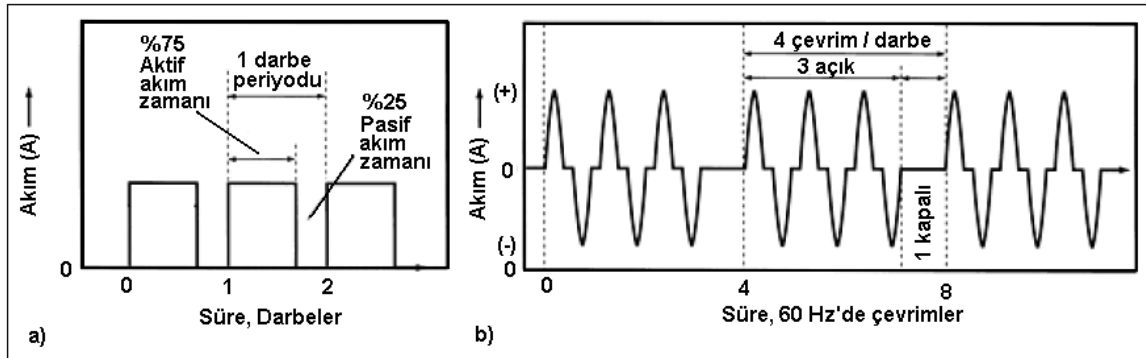
Ve

$$V_{MAX} = L_{MAX} \cdot F / N \quad (6.9)$$

Böylece V_{MAX} hesaplanabilir;

$$V_{MAX} = 85,6 \cdot N / S \quad (6.10)$$

Akım sahası, darbeleri tipte darbesiz (sürekli akım) tipten daha büyüktür. Diğer kaynaklarla kesişim gibi zor kaynak şartları altında daha sağlam nüfuziyet sağlamak için ekstra akım sahası görülmektedir.



Şekil 6.1 Direnç dikiş kaynağı için akım profilleri. A) ideal darbe şekli B) anlık darbe

Şekil 6.1 direnç dikiş kaynağı için akım profillerini göstermektedir. Şekil 6.1 a) ideal darbe tipini göstermektedir darbe periyodunun %75'i aktif %25'i pasif akımdır. Şekil 6.1 b) anlık darbe şekli tipik olarak karmaşıktır ve ideal değildir, bu özel durumda darbeler tek fazlı alternatif akım kaynağıyla sağlanmaktadır (3Aktif/1Pasif). Farklı kalınlıklardaki malzemelerin kaynağı durumunda uygun kaynak süresi en ince sac için uygun kaynak süresinden daha büyük olmamalıdır ve matematiksel olarak;

$$T = 4(0,0292) \cdot (TOS)^2 \quad (6.11)$$

TOS farklı kalınlıktaki sacların kaynağındaki toplam sac kalınlığıdır (mm). Farklı kalınlıktaki sacların kaynağında amaç, eşitlik 6.1 ile verilen toplam sürede kaynak yapabilmektir ancak bunu başarabilmek için darbeli-aktif akım durumunda sürenin eşitlik 6.11’de belirtilen süreden büyük olmaması gerekmektedir. N ’yi arttırmak için darbe frekansı iyi belirlenmelidir. Darbeleme avantajlı olsa bile, özellikle; farklı kalınlıklardaki sacların kaynağında ince olan sacın zarar görmeden dikiş kaynağıyla birleştirilmesi mümkün olmayabilir. Bu durum kalınlık oranlarının 3/1 olduğu durumlarda dikkate alınmalıdır (Metals Handbook V06, 1993).

6.3 Projeksiyon Direnç Kaynağı İçin Parametreler

Nokta direnç kaynağıyla karşılaştırıldığında projeksiyon direnç kaynağında daha küçük kuvvetler ve süreler gerekmektedir. Yumuşak çelikler ve düşük alaşımlı nikel bazlı alaşımlar projeksiyon kaynağı için ideal malzemelerdir. Çünkü kendi oksitlerini kolayca çözebilirler ve yeterli dayanım, sıcaklık ve direnç özelliklerine sahiptirler. Paslanmaz çelikler ve daha yüksek alaşımlı nikel bazlı malzemeleri kaynak etmek biraz daha zordur, çünkü daha stabil krom ve alüminyum oksitlerin oluşumu arttırılmış yüksek sıcaklık özellikleri ve daha büyük dirençleri beraberinde getirmektedir (Metals Handbook V06, 1993).



Şekil 6.2 a) kabartıların merkezleri arasındaki mesafe, b) üst üste bindirme teması (Metals Handbook V06, 1993)

SAE 1005-1010 çelikleri mekanik özellikleri doğrultusunda otomotiv sektöründe kullanılabilen çeliklerdir. Çizelge 6.2’de yer alan veriler, çekme dayanımları 290-380 MPa olan SAE 1005-1010 çelikleri içindir. Şekil 6.2 a) iki kabartının merkezleri arasındaki mesafeyi, b) ise temas halindeki üst üste bindirmeyi göstermektedir. Kaynak öncesinde çeliğin yüzeyinde az miktarda yağ olabilir ancak yüzey gres yağından, kirden ve çapaklardan arınmış olmalıdır (Metals Handbook V06, 1993).

Çizelge 6.2 Düşük karbonlu çeliklerin projeksiyon direnç kaynağı için işlem gereklilikleri
(Metals Handbook V06, 1993)

USS Ölçü No.	Malzeme Kalınlığı, x (mm)	Kabartı Ölçüsü		Merkezden Merkeze Min. Mesafe (mm)	Minimum Temas Bindirmesi (mm)
		Çap (mm)	Yükseklik (mm)		
25	0,559	2,29	0,635	9,65	6,35
23	0,711	2,29	0,635	9,65	6,35
21	0,864	2,79	0,889	12,7	9,65
19	1,09	2,79	0,889	12,7	9,65
18	1,24	3,56	0,965	19,1	12,7
16	1,55	3,81	1,07	19,1	12,7
14	1,96	4,57	1,22	22,4	12,7
13	2,34	5,33	1,27	26,9	15,7
12	2,72	6,10	1,40	31,8	19,1
11	3,12	6,86	1,47	38,1	20,6
10	3,43	7,62	1,57	41,4	22,4

Kaynak sırasında kullanılacak akım 60 Hz frekansa sahiptir. Çizelge 6.3’de A ile gösterilen parametreler malzeme üzerinde birden fazla kabartının olduğu durumlarda akım azaltılırsa kullanılabilir ancak kaynağın bozulmasıyla sonuçlanabilir ve güç talebi B veya C’ dekinden daha fazla olacaktır. B ile gösterilen parametreler malzeme üzerinde 3’den daha fazla kabartı olduğu durumda kullanılabilir ancak güç talebi C’de gösterilenden daha fazla olabilir. C ile gösterilen parametreler ise 3 ‘ten daha az kabartıyı yüzeyinde barındıran malzemeler için kaynak akımının % 15 arttırılmasıyla mümkündür (Metals Handbook V06, 1993).

Çizelge 6.3 Farklı sayıdaki kabartı için kaynak parametreleri, A:tek bir kabartı, B:1 ile 3 tane kabartı, C:3 kabartı olduğu durumdaki parametreleri belirtir (Metals Handbook V06, 1993).

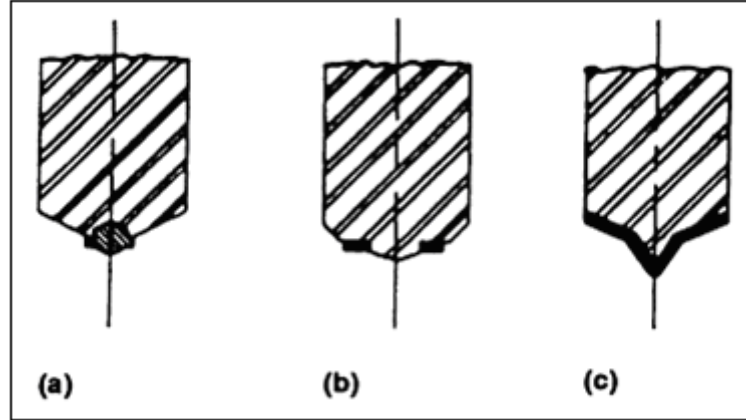
USS ÖLÇÜ NO	Kaynak Süresi(Çevrim)			Elektrot Kuvveti (kN)			Kaynak Akımı (A- amper)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
25	3	6	X	0,67	0,67	X	4400	3850	X
23	3	6	8	0,87	0,67	0,45	5500	4450	3300
21	3	6	11	1,1	0,67	0,56	6600	5100	3800
19	5	10	15	1,5	0,93	0,71	8000	6000	4300
18	8	16	19	1,8	1,2	0,98	8800	6500	4600
16	10	20	25	2,4	1,6	1,5	10300	7650	5400
14	14	28	34	3,6	2,4	2,1	11850	8850	6400
13	16	32	42	4,5	3,0	2,7	13150	9750	7200
12	19	38	50	5,6	3,7	3,3	14100	10600	8300
11	22	45	60	6,7	4,5	4,0	14850	11300	9200
10	24	48	60	7,3	4,9	4,5	15300	11850	9900

6.4 Saplama Kaynağı Parametreleri

Özel uygulamalarda diğer çelik sınıfları kullanılabilmesine rağmen ASTM A-108 sınıfına uyan C1010 - C1020 düşük karbonlu çeliklerden yapılmış saplamalar kullanıldığında yüksek dayanımlı kaynaklar elde edilmektedir. Paslanmaz çelik saplamalar tipik olarak hem normal karbon hem de düşük karbonlu, AISI 302,302 HQ, 304, 305, 308, 309, 310, 316, 321 ve 347'yi kapsayan östenitik serilerden yapılmaktadır. 303 paslanmaz çelik saplama için kabul edilmemiş bir alaşımdır. Alüminyum saplamalar genellikle 5183, 5356, 5556, 5086 ve 5456'yı kapsayan Al-Mg alaşımlarından üretilmektedir.

Çapı 6,4 mm'den daha büyük olan ark kaynaklı çelik ve paslanmaz çelik saplamaların kaynağında arkı stabilize etmek ve kaynak bölgesini deokside etmek için kaynak flaksı kullanılmaktadır. En çok kullanılan flaks ticari saflıktaki alüminyumdur. Bu flaks, saplamanın

kaynak edilecek ucuna, termal spreyleme ile veya bağlayarak monte edilir yada üzerinde matkapla açılmış bir delik bulunan levhaya sıkıştırma ile yerleştirilir (Şekil 6.3). 6,4 mm ve daha küçük çaptaki saplamalar genellikle flaks istememektedir.



Şekil 6.3 a) Sac metal içine sıkıştırma, b) saplamaya bağlama, c) kaplama-termal spreyleme (Metal Handbook V06, 1993)

Alüminyum saplamalar için flaks kullanmak zorunlu değildir. Saplamanın kaynaklanacak ucu konik yada silindirik şekle sahip olabilir. Ancak bunun yerine saplama kaynak edilecek sac içinde şekillendirilebilir ve bu, arkı başlatmaya ve ark boyunu kontrol altında tutmaya yardımcı olur. Alüminyumun saplama kaynağında oksitlenmeyi ve gevrekleşmeyi önlemek için kaynak bölgesi inert bir gazla temizlenmelidir. Helyum gazı kullanılabilmesine rağmen çoğunlukla argon gazı kullanılmaktadır. Farklı çaplardaki alüminyum saplamalar için tipik gaz debileri Çizelge 6.4 de verilmiştir.

Çizelge 6.4 Saplama çapına göre gaz debisi, koruyucu gaz %99,95 saflıkta Argon

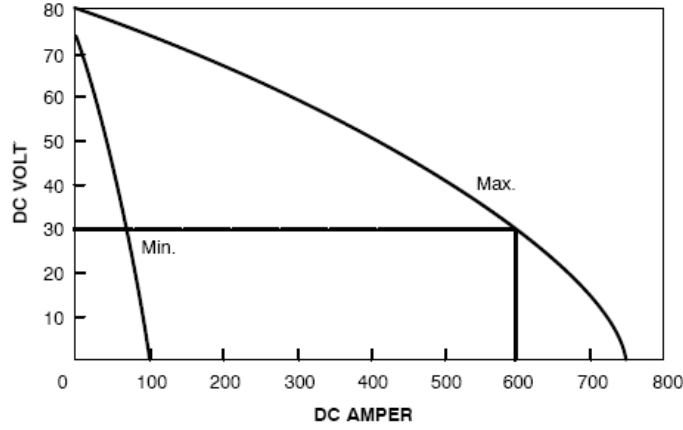
Saplama Çapı	mm	6,4	7,9	9,5	11,1	12,7
Koruyucu gaz debisi	l/dak	7,1	7,1	9,4	9,4	9,4

Düşük karbonlu çelikleri ve paslanmaz çelik saplamaları kaynak ederken saplama (elektrot) negatif (-) olmalıdır. Alüminyum saplamaları kaynak ederken saplama pozitif (+) olmalıdır.

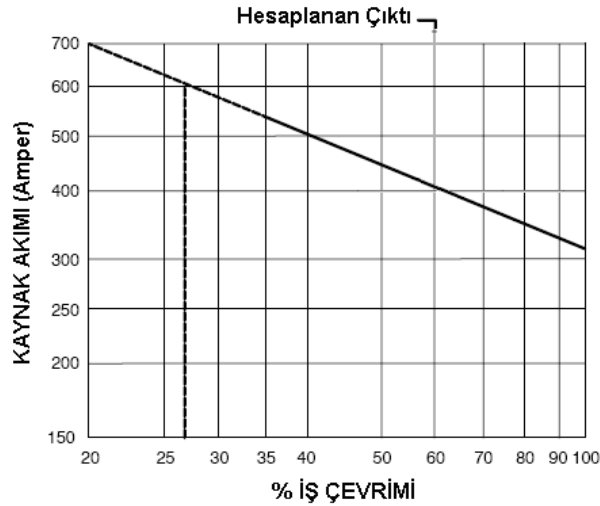
Diş açılmış saplamalar için kesit alanı, efektif diş alanının ortalama bir değeridir ve 6.12 eşitliğiyle hesaplanmaktadır

$$As = 0,7854 \cdot [D - (0,9743 / N)]^2 \quad (6.12)$$

D: saplamanın anma çapıdır ve N: inch başına diş sayısıdır. Saplama kaynağında güç üreteçleri yüksek kararlılıkta akım üretebilmelidir. Ani yükselebilen akım süreci gerekmektedir. Göreceli olarak kısa zaman periyotlarında yüksek çıkış akımı arzu edilmektedir, açık devre voltajı doğru akımla sağlanır ve 70-100 Volt arasındadır (www.millerwelds.com).



Şekil 6.4 Sabit akımlı güç kaynağı için akım-gerilim eğrisi (www.millerwelds.com).



Şekil 6.5 Sabit akımlı güç kaynağı için işlem çevrimi (www.millerwelds.com).

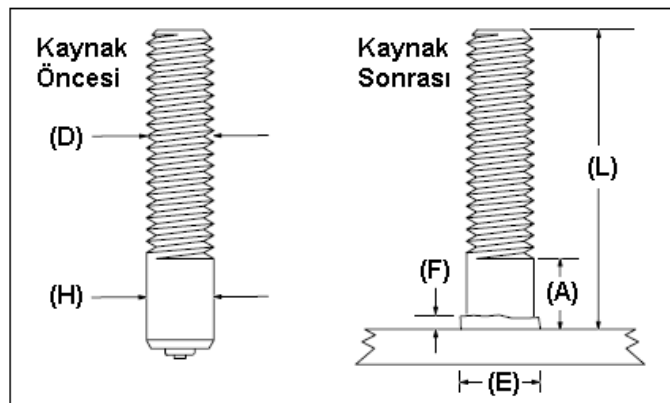
Sabit akımlı bir güç kaynağı kullanılırken saplama kaynağı için anma gerilimi 30 Volt ise iş çevrimini belirlemek için Şekil 6.4'deki 30 volt değerinden yatay eksene paralel bir çizgi çizildiğinde, bu çizgi maksimum çizgisi üzerinde 600 Ampere denk gelmektedir. 600 Amperlik değer Şekil 6.5'de değerlendirildiğinde iş çevriminin %26 olduğu belirlenmektedir.

Çizelge 6.5’de çeliklerin ark saplama kaynağı için tavsiye edilen parametreler verilmiştir. Ancak saplama kaynağı yapmak için güç kaynağı burada verilen değerlerle ayarlanmak zorunda değildir. Bu değerler çalışma sahası içindeki ortalama değerlerdir benzer sonuçlar daha az voltaj daha uzun kaynak süresiyle yada daha çok voltaj daha kısa kaynak süresiyle de elde edilebilir. Mevcut şartlardaki kaynak parametreleri kıyaslanacağı zaman kablo çapı, kablo uzunluğu, malzemenin durumu ve saplama tipleri dikkate alınmalıdır (www.millerwelds.com).

Çizelge 6.5 Çeliklerin saplama kaynağı için tavsiye edilen parametreler
(www.millerwelds.com).

Saplama Ölçüsü (mm)	Akım (A)	Süre (sn)
6	350	250
6	420	310
10	580	430
12	720	500
14	880	590
16	1040	660
20	1440	780
24	1990	850

Saplama tabancası, üretici tavsiyesiyle uyumlu olarak ayarlanmalıdır. Kontrol devresi üzerindeki zamanlama cihazı ve güç kaynağı Çizelge 6.5’deki değerlerle yaklaşık olarak ayarlanabilir.



Şekil 6.6 Çizelge 6.7’de verilen ölçülerin gösterimi (www.millerwelds.com).

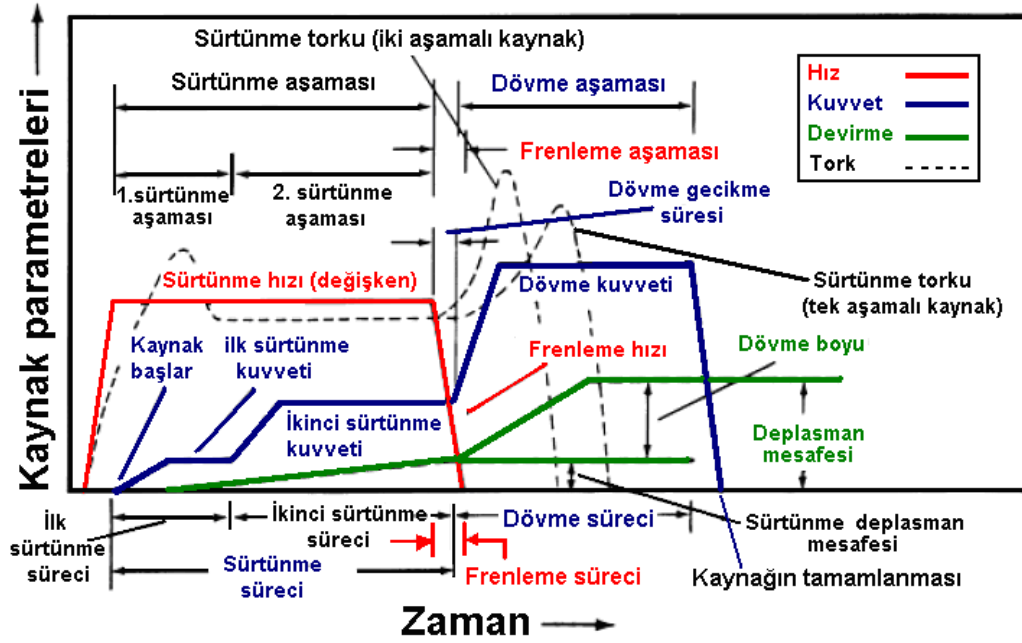
Saplama üreticilerinin katalogları çeşitli saplamaların özelliklerini ve ölçülerini listelemektedir. Kaynak parametreleri ayarlanırken çap, amperaj ve sürenin saptanması için belirleyici unsur olmaktadır. Vida dişli bağlayıcılarda çap diş çapından küçük olmalıdır. Çizelge 6.6'da saplama özelliklerini belirleme tablosu verilmiştir. Tabloda verilen tanımların gösterimleri ise Şekil 6.6'da çizim olarak verilmektedir.

Çizelge 6.6 Saplama özellikleri belirleme tablosu (ölçüler inch cinsinden)

Çap - Vida Dişi sayısı (D)	Kaynak sonrası min. uzunluk (A)	Saplama Kökünün Çapı (H)	Kaynak sonrası min. uzunluk (L)	Kaynak noktası ölçüleri (E)
1/4-20	1/4	0,217	5/8	5/16 3/32
5/6-18	1/4	0,275	5/8	13/32 7/64
3/8-16	1/4	0,312	5/8	7/16 7/64
7/16-14	1/4	0,375	3/4	1/2 1/8
1/2-13	5/16	0,437	3/4	19/32 9/64
5/8-11	5/16	0,500	7/6	11/16 5/32
3/4-10	1/2	0,625	1-1/8	7/8 3/16
7/8-9	1/2	0,750	1-3/8	1 3/16
1-8	5/16	0,875	1-7/8	1-1/8 3/16

6.5 Sürtünme Kaynağı Parametreleri

Dönel sürtünme kaynağının karakterini üç parametre kontrol etmektedir; dönme hızı, dönme süreci ve eksenel kuvvet. Kaynakta sadece parça boyunda bir kısalma yoktur aynı zamanda dönmeye karşı sürtünme torkunun direnci vardır ve bu direnç kaynak sırasında değişmektedir. Parça boyundaki kısalmaya deplasman denilmektedir. Şekil 6.7 tüm kaynak işlemi boyunca meydana gelen farklı olaylardaki değişimleri göstermektedir. Sürtünme tork eğrisinin şekline bağlı olarak işlemi üç ana aşamaya bölmek uygun olacaktır (Metals Handbook V06, 1993).



Şekil 6.7 Sürtünme parametrelerinin zamana bağlı değişimi (Metals Handbook V06, 1993).

Birinci aşama başlangıç sürtünmesidir, ikinci aşama sürtünmeye bağlı ısınma aşamasıdır ve üçüncü aşama deplasmanın gerçekleştiği dövme aşamasıdır.

Birinci aşamada işlemin başlamasından sonra tork aniden artarak pik yapmaktadır ve tork değeri düşüp yatay hale geldiğinde birinci aşama bitmektedir. Torkun ani artışı ve kademeli düşüşü, parçaların birbirine kenetlenmesi, malzeme sertliklerinin kırılması ve sürtünme ısıyla karşılıklı malzeme yüzeylerindeki yumuşamayla ilgilidir.

Sürtünme torkunun ikinci aşamada bir süre sabit kalması; sürecin, gerinme sertleşmesi etkisi ile ısıl yumuşama etkisi arasında bir dengeye ulaştığını göstermektedir. İki parçanın birbirlerine birleştirilmesi için karşılıklı yüzeyler ve hemen bitişiğindeki malzemenin yeteri miktarda ısınmasına izin verilmektedir.

Tahriğin devreden çıkarılması ve frenleme sürecinde başlayan dövme, üçüncü aşamada yer almaktadır. Üçüncü aşamada mil dönme devri derhal düşürülmektedir ve yavaşlama frenleme süresine bağlıdır. Yavaşlama miktarı farklı malzemelerin kaynağında değişmektedir. Ancak, frenleme ani olursa tork üçüncü aşamanın başlangıcında beklenmedik şekilde düşebilir. Bu, dönmekte olan milin neredeyse anında durmasına neden olmaktadır ve dönen mil durduktan sonra daha büyük itme kuvveti uygulanmaktadır. Bu durumda burulma nedenli dövme yoktur ve deplasman sayesinde dövme gerçekleşmektedir.

Dövmeye etki etmek için üçüncü aşamada genellikle aksel itme kuvveti arttırılmaktadır. Keskin bir şekilde sıfıra düşmeden önce başka bir pik yapan sürtünme torku bu aşamanın başında tekrar artmaktadır. Bu pik yavaşlama ve uygulanan aksel kuvvetle değişmektedir. Bazı durumlarda bu son pik, dövme kuvveti başlangıcının gecikmesi sayesinde göz ardı edilebilir.

Bu, sadece dönen milin frenleme ile durması sonrasında yada sırasında yapılmaktadır. Bu durumda, dövme, burulma nedeni dövme olmaksızın sadece deplasmanla gerçekleştirilmektedir. Doğrudan tahrikli sürtünme kaynağında daha çok iki aşamalı kaynak uygulanmasına rağmen özellikle araştırma amaçlı işlemlerde tek aşamalı kaynak zaman zaman kullanılmaktadır.

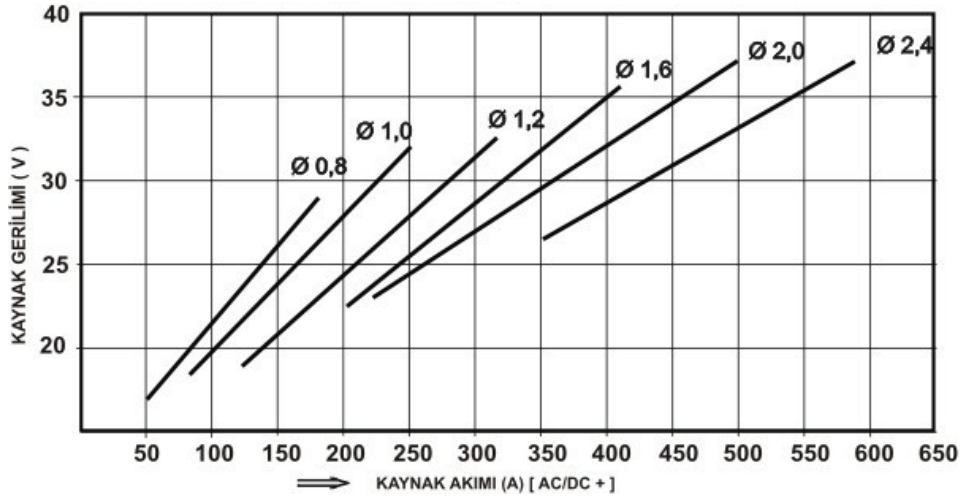
Eksel kuvvet değişmeden kaldığında daha küçük yavaşlama (azaltılmış frenleme ile daha uzun frenleme süresi) daha yüksek pik vermektedir. Üçüncü aşamada aksel kuvvet arttırılırsa frenleme süresi kısaltılır ancak daha büyük kuvvet uygulandığından pik hala artmaktadır. Üçüncü aşamada artan sürtünme torku, sürtünme kaynağının bir özelliğidir ve deplasman nedeni geleneksel dövmeden daha verimli olan burulma dövmesine katkıda bulunmaktadır. Üçüncü aşama, milin dönmesi bittikten az sonra bitmektedir. Bu dövme periyodu yada deplasman süresi de dördüncü kaynak parametresi olarak düşünülebilir (Metals Handbook V06, 1993).

6.6 Gazaltı Ark Kaynağı Parametreleri

Ark kaynağı işleminde boyutu, şekli, kaliteyi ve kaynak sürekliliğini etkileyen birçok parametre vardır. Kaynağı etkileyen ana parametreler akım, voltaj ve ilerleme hızıdır. Gazaltı ark kaynağı için elektrot boyutları ve tipi ark voltajı ve amperaj gereksinimlerini belirlemektedir. Akım doğru veya alternatif olabilir ancak kaynak işleminin karmaşık değişkenlerine cevap verebilmek için güç kaynağı kontrol edilebilir olmalıdır. Doğru akım elektrotları düşük amperajda iyi performans gösterirken genellikle ince metallerin kaynağı için kullanılmaktadırlar. Birçok örtülü elektrot en derin nüfuziyeti pozitif kutuplama (ters polarite) ile vermektedir. Negatif kutuplama ile daha yüksek ergitme hızlarına ulaşılmaktadır. Elektrotun iş parçasına açısı, elektrotun kendi içindeki açıları, flaks tabakasının kalınlığı ve ark boyu ikincil değişkenlerdir (www.robot-welding.com).

6.6.1 Akım ve Ark Voltajı

Belirli bir elektrot için doğru amperajın belirlenmesi elektrot boyutuna ve sınıfına bağlıdır. Ağız şekli ve kaynak pozisyonu da dikkate alınmalıdır. Hem ana metalin belirli bir miktarının, hemde elektrotun ergimesini sağlayacak yeterli elektrik akımı gerekmektedir. Daha yüksek akım daha derin nüfuziyet demektir. Yüksek akım kullanılması aşırı sıçrama, elektrotun aşırı ısınması ve çatlak oluşumu gibi problemlere neden olabilir www.robot-welding.com



Şekil 6.8 Düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için gerilim-akım ilişkisi
(www.oerlikon.com.tr)

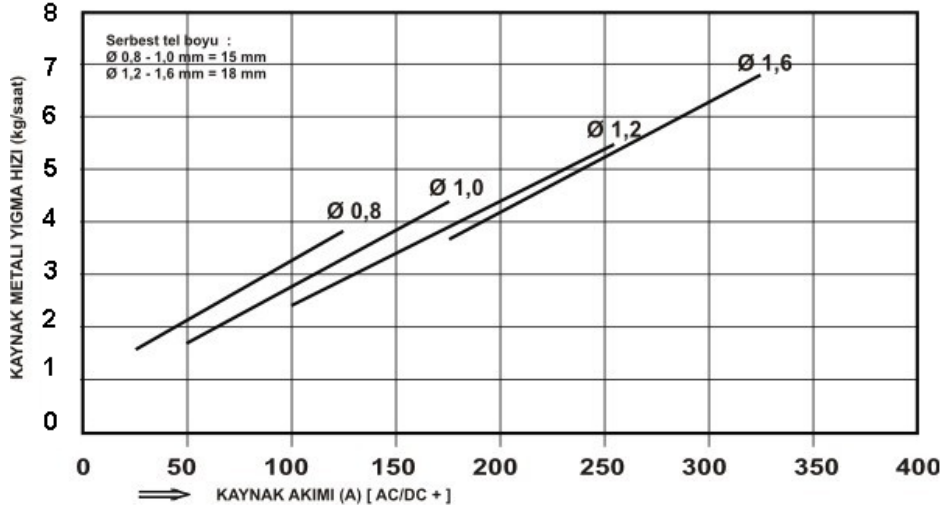
Şekil 6.8 düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için farklı tel çaplarına bağlı olarak MIG/MAG kaynak gerilimi ve kaynak akımı ilişkisini göstermektedir. Koruyucu gaz DIN EN 439'a göre M 12 olarak adlandırılmaktadır ve bileşimi % 97,5 Ar + % 2,5 CO₂'dir.

Ark voltajı kaynak akımından daha dar limitler içinde değişmektedir. Damla genişliği ve şekli üzerinde etkisi vardır. Daha yüksek voltajlar damlanın daha geniş ve düzgün olmasını sağlar. Aşırı yüksek ark voltajından kaçınılmalıdır çünkü çatlakla neden olabilir. Voltaj çok düşük ise çok dar damla oluşacaktır www.robot-welding.com

6.6.2 İlerleme Hızı

Dikiş boyunca elektrotun ilerleme hızı; damla şekli, ergime derinliği, dış görüntü ve ana metale olan ısı girdisi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Daha yüksek ilerleme hızları daha düşük nüfuziyete sahip ve daha dar damlalar üretmektedir. Minimum nüfuziyetin istendiği ve küçük damlaların olduğu sac metal kaynaklarında bu bir avantajdır. İlerleme hızı aynı

zamanda kaynak edilen metalin metalurjik yapısını değiştiren ısı girdisini etkilemektedir. Soğuma hızı ilerleme hızıyla orantılı olarak artmakta veya azalmaktadır. Aynı zamanda ITAB boyut olarak büyüyecek ve soğuma hızı düşecektir. Hız çok fazla ise yanma oluğu ve porozite eğilimi ortaya çıkmaktadır çünkü kaynak çabucak katılaşmaktadır www.robot-welding.com



Şekil 6.9 Düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için tel yığma hızı-akım ilişkisi
(www.oerlikon.com.tr)

Şekil 6.9 düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler için farklı tel çaplarına bağlı olarak MIG/MAG kaynağı için kaynak akımına bağlı olarak kaynak metali yığma hızlarını vermektedir. Koruyucu gaz DIN EN 439'a göre M 21 olarak adlandırılmaktadır ve bileşimi % 82 Ar + % 18 CO₂'dir.

Düşük alaşımlı çeliklerin kaynağı söz konusu olduğunda Çizelge 6.7'deki TIG kaynağı parametreleri kullanılabilir. Karbon oranı % 0,3'den daha küçük olan yumuşak ve düşük çelikleri genellikle ön ısıtmaya ihtiyaç duymamaktadırlar. Cr-Mo çelikleri gibi düşük alaşımlı çelikler ön ısıtma sıcaklığı çok düşüğe kaynak sonrasında sert bir ITAB'a sahip olmaktadır. Bu durum ana malzemenin ani soğuması sonrasında martenzit yapısının oluşumuyla açıklanmaktadır. 180-380 °C arasında ön ısıtma yapılırsa soğuma hızı düşecektir ve martenzit oluşumu önlenecektir (www.ckworldwide.com).

Çizelge 6.7 Yumuşak ve düşük karbonlu çelikler için TIG kaynağı parametreleri (www.ckworldwide.com).

Sac Kalınlık (mm)	Ağız Şekli	Elektrot Çapı (mm)	İlave Malzeme Çapı (mm)	Koruyucu Gaz Tip	Debi (lt/dak)	Basınç PSI	Akım (A)	İlerleme Hızı (mm/dak)
1,6	Alın	1,6	1,6	Argon	7	20	95 - 135	384
3,2	Alın	1,6	1,6	Argon	7	20	145 - 205	282
4,8	Alın	2,4	3,2	Argon	6,5	20	210 - 260	256
6,4	Alın	3,2	4,0	Argon	8,5	20	240 - 300	256

6.6.3 Ark Boyu

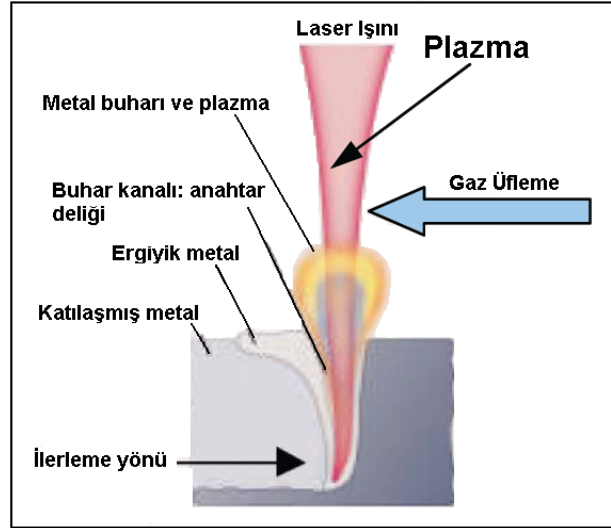
Ark boyu elektrot çekirdeğinin ergimiş uç kısmıyla kaynak havuzunun arasındaki mesafedir. Genellikle elektrot boyutunun ve amperajın artışıyla ark boyu artmaktadır. Elektrot çekirdek çubuğunun çapıyla ark boyunun sınırlandırılması iyi bir yöntemdir (www.robot-welding.com).

6.7 Laser Kaynak Parametreleri

Laser ile çalışılırken güç, kaynak hızı, odak noktası, kullanılan gaz dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Öncelikle güç belirlenir ve buna uygun kaynak hızı seçildikten sonra diğer üç parametre de daha sonra belirlenir.

- Laser kaynağında güç yoğunluğu 10^6 – 10^8 W/cm² olarak değişmektedir.
- Odaklama önemlidir yanlış yapılırsa parça çarpılır mümkün olduğunca $z = 0$ seçilmeye çalışılır (Tam yüzeyde odaklama).
- Oluşan plazmayı süpürmek için kaynak hızı sabit tutulur gaz olarak Ar/He veya He kullanılır laser gücü arttırılır.
- Laser ile elde edilen kaynak dikiş genişliği diğer ergitme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, çok daha dar dikişler elde etmek mümkündür. Bunun sonucunda ısıdan etkilenen bölgeler de dar sınırlarda olur (Erhardt, Heine ve Prommersberger, 1993).

Alaşımlı çeliklerin ve farklı malzemelerin laser Kaynağında 10^8 W/cm² güç yoğunluğuna çıkılmaktadır. Bu güç yoğunluğunda plazma oluşumu söz konusudur. Plazma durumunda ışın hangi açıyla gelirse gelsin malzeme yüzeyinde çok büyük bir ısı artışı meydana gelmektedir. Ergiyik ve buhar fazdan çıkan atomlarla karşılaşan gazlar parçalanıp iyonlaşırlar. Gaz iyonları ve atomlardan oluşan topluluk plazmayı oluşturur (Şekil 6.10).



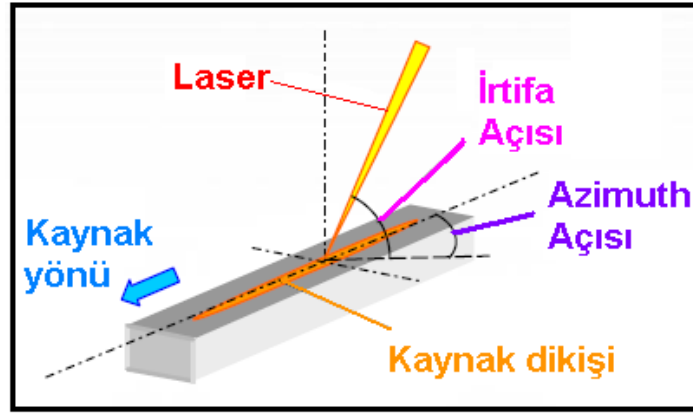
Şekil 6.10 Gaz üflenerek plazmanın süpürülmesi ve anahtar deliği oluşumu (Chang, 2007).

Bu iyonlarla atomla gazların karşılaşmaması için inert Argon veya Helyum gazı kullanılmaktadır. Plazma genişliği arttığında ışın verimi ve nüfuziyet derinliği düşmektedir. Çözüm; plazma süpürücü gaz hızını arttırmak, kaynak hızını düşürmek veya laser gücünü arttırmaktır. Bunların hepsi uygun şartlar altında aynı anda uygulanabilir.

Plazma varlığında *anahtar deliği* (key hole) oluşur. Plazmanın yüksek sıcaklığı nedeniyle ergime vardır ve kaynak dikişinin iç tarafında girdap oluştuğunda dikiş dışarıya doğru genişler, bu şekil anahtar deliğine benzetilmektedir.

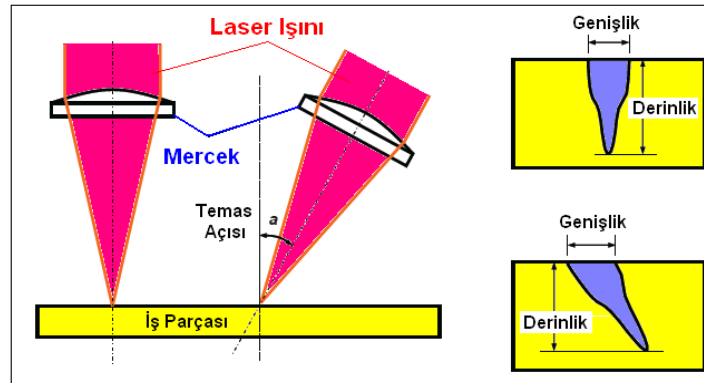
6.7.1 Laser Açısı Toleransı

Laser ışını kaynaktan çıktıktan sonra iş parçası üzerine çarpmaktadır, ancak bu çarpmadaki yüzeyle daima 90⁰ açı yapmamaktadır. Laser ışının iş parçası yüzeyine çarptığı yüzeyle ışının yaptığı açıya *irtifa* açısı denilmektedir. Aynı ışının çarpma noktasıyla yatayda yaptığı açıya ise *Azimuth* açısı denilmektedir. Şekil 6.11 de irtifa açısı ve Azimuth açısı gösterilmektedir.



Şekil 6.11 Laser ışını için İrtifa açısının ve Azimuth açısının gösterimi (Tarui vd. ,2007)

Özellikle uzaktan laser kaynağında her bir kaynak noktası için irtifa açısı ve Azimuth açısı farklı farklı olmaktadır. İrtifa açısını 90 dereceye tamamlayan açıya da *temas* açısı denilmektedir. Bu açılardaki farklılık kaynak dikişinin genişliğini ve nüfuziyet derinliğinin doğrudan etkilemektedir (Şekil 6.12).

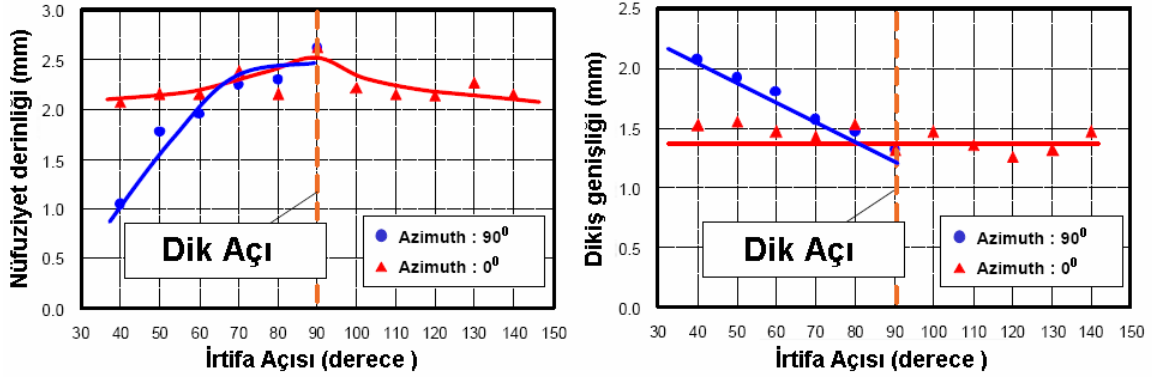


Şekil 6.12 Kaynak dikişinin genişliği ve derinliği-temas açısı (Chang, 2007).

Bu etkiler göz önünde bulundurularak birçok farklı noktadaki kaynak dikişlerinde bir standartizasyon sağlamak için her bir nokta için farklı odaklama yapılarak güç yoğunlukları değiştirilebilir. Farklı odaklama için kaynak robotları mesafe/açı ilişkisi göz önünde bulundurularak programlanmalıdır.

6.7.2 Laser Kaynağında Nüfuziyet Genişliği ve Derinliği

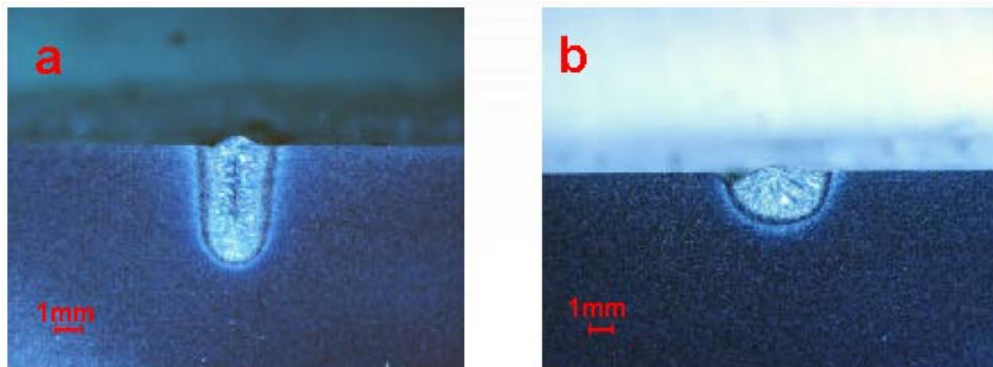
Nüfuziyet derinliği ve kaynak dikişinin genişliği laser açılarının değişiminden etkilenmektedir. Şekil 6.13 Azimuth açısının 0° ve 90° olduğu durumlarda farklı irtifa açılarıyla nüfuziyet derinliğinin ve dikiş genişliğinin ne kadar değiştiğini göstermektedir.



Şekil 6.13 İrtifa açısının değişimiyle nüfuziyet derinliğinin ve dikiş genişliğinin değişimi (Tarui vd ,2007)

Şekil 6.13'e bakıldığında, tahmin edildiği üzere irtifa açısının 90^0 olduğu durumda en büyük nüfuziyet derinliğine ulaşılmıştır çünkü ışının yansıma olasılığı bu dik açı durumunda en küçüktür. Burada en büyük ergime derinliğine ulaşılabilmektedir.

Dikiş genişliği Azimuth açısı 0^0 olduğunda hiç değişmemektedir ancak Azimuth açısı 90^0 olduğunda irtifa açısının artışıyla dikiş genişliğinin azaldığı görülmektedir. Dar dikişli kaynaklar genelde tercih edilmektedir. Genel sonuç olarak irtifa açısının ve Azimuth açısının 90^0 olduğu durum en çok tercih edilen durumdur ve bu; dik açı olarak adlandırılır. Şekil 6.14 farklı açılarla kaynak edilmiş numuneleri göstermektedir

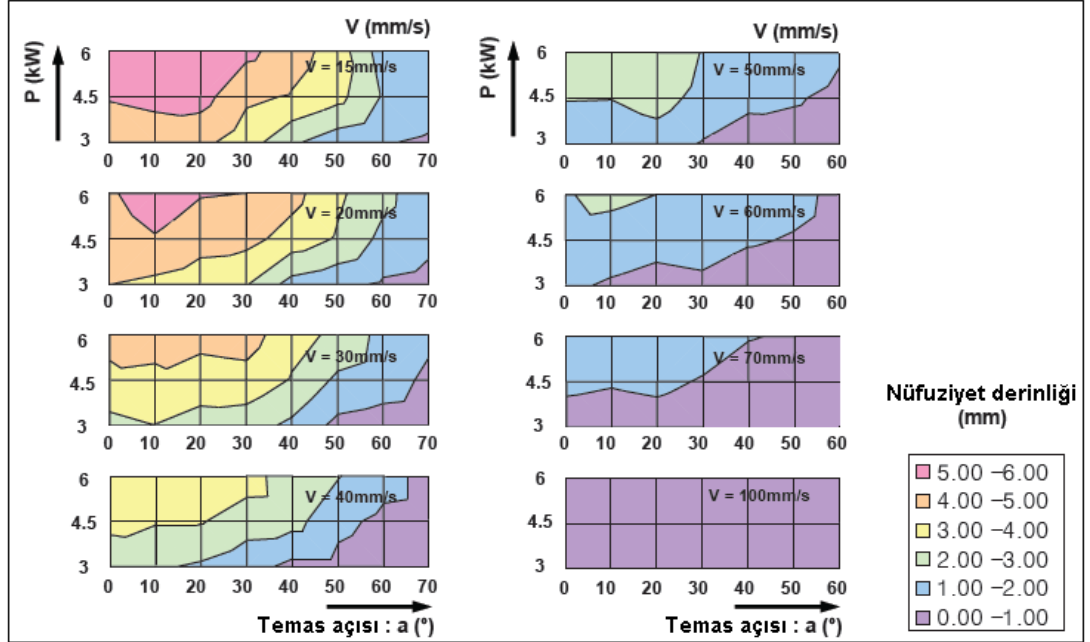


Şekil 6.14 a) İrtifa açısının ve Azimuth açısının 90^0 olduğu durum, b) İrtifa açısının 40^0 , Azimut açısının 90^0 olduğu durum (Tarui ve Hasegawa ve Mori, 2007)

6.7.3 Laser Kaynağının Optimizasyonu

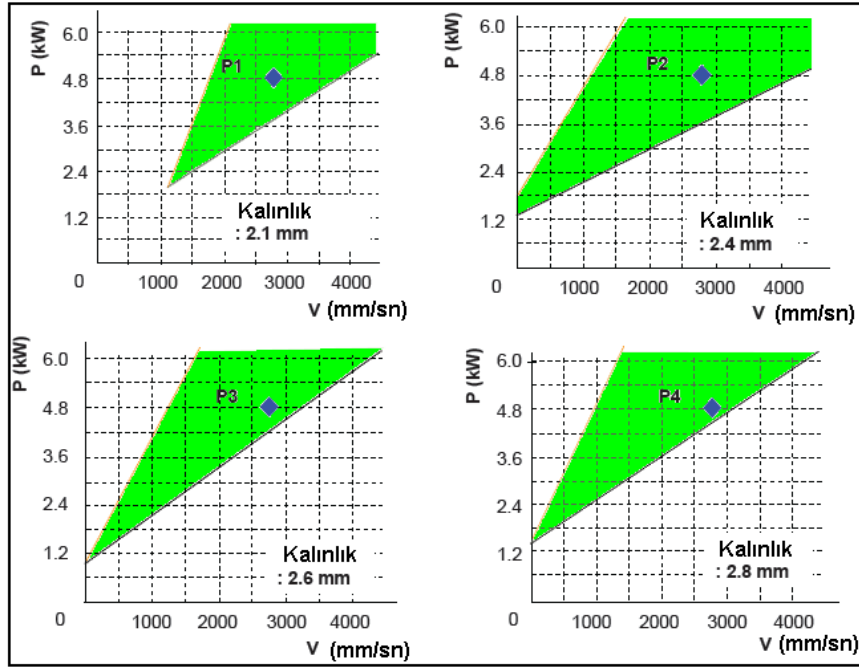
Laser temas açısının irtifa açısının tümleyeni olduğu yukarıda belirtilmişti. Laser kaynağında nüfuziyet derinliği işlem sırasında ortaya çıkan anahtar deliği nedeniyle çok önemlidir çünkü

anahtar deliği oluşumu nüfuziyeti büyük oranda etkilemektedir. Ancak değişken laser gücü, laser ilerleme hızı ve laser temas açısı da nüfuziyet derinliği üzerinde büyük etkiye sahiptir. Şekil 6.15 laser gücünün, laser ilerleme hızının ve temas açısının değişimini aynı grafik üzerinde göstermektedir.



Şekil 6.15 Laser gücü, temas açısı ve ışının ilerleme hızına bağlı olarak nüfuziyet derinliğinin değişimi (Chang, 2007).

Tatminkâr birleşmelerin eldesinde nüfuziyet derinliği önemli rol oynamaktadır. Şekil 6.16 laser gücü – laser ilerleme hızı ilişkisini göstermektedir. Yeşil taranmış bölge ise toplam sac kalınlıkları için optimum kaynak şartlarını göstermektedir.



Şekil 6.16 Farklı nüfuziyet derinlikleri için optimum kaynak parametreleri (Chang, 2007).

Şekil 6.16 incelendiğinde laser gücünün azaldığı durumda kaynak hızının da azalması gerektiği görülmektedir. Laser gücü azaltıldığı taktirde ışının bir noktayı aynı hızda geçmesi düşük dayanımlı kaynaklar oluşabilir. Bu sebeple laser ilerleme hızı da azaltılmaktadır. Ters durumda laser hızı arttırılmaz ise bu defa da kaynak dikişinde çok büyük bir ısı girdisi olacaktır ki bu laserin tüm avantajlarını götürecektir. Büyük ısı girdisi kaynak bölgesini ve dolayısıyla ITAB bölgesinin genişlemesine neden olarak mekanik özelliklerine kötüleşmesiyle sonuçlanacaktır.

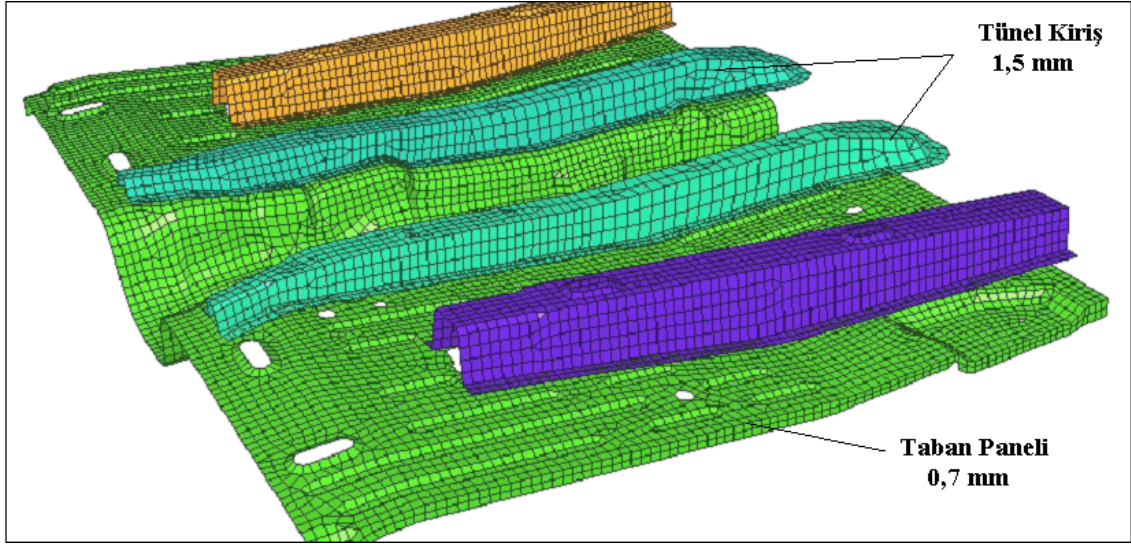
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar bölümünde otomotiv sektöründe kullanılan dört farklı kaynak yönteminin düşük karbonlu çelik sacların özellikleri üzerindeki etkilerinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Burada kullanılan malzeme soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu ve soğuk haddeli çeliktir. Sıcak daldırma galvanizleme işlemiyle yüzeyleri Zn kaplanmıştır. Çelik saclar genellikle konvansiyonel yöntem olan nokta kaynağıyla kaynaklanırlar. Konvansiyonel yöntem olması sebebiyle diğer yöntemlerle kaynak edilmiş malzemeler ile karşılaştırma yapılırken punto kaynaklı malzemenin referans olacağı kabul edilmiştir. Bir diğer kaynak yöntemi ise TIG kaynağıdır. TIG yöntemi ince sacların kaynak işlemine elverişli olduğu için ve kaynak sırasında kaynak banyosunu üstün şekilde koruduğundan seçilmiştir. TIG kaynağı nokta kaynağının araç konstrüksiyonu üzerinde mümkün olmadığı bölgelerde ve bazı komponentlerin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Burada söz konusu olan TIG kaynağı ilave malzemesiz olarak gerçekleştirilmiştir. Diğer iki yöntem ise Laser kaynağı ve uzaktan laser kaynağıdır. Modern yöntemler olarak adlandırılacak olan bu yöntemler sektörde kendine yer bulmaya başlamıştır ve diğer yöntemlere göre üstünlükleri sayesinde tercih edilir olmuşlardır. Bu sebeplerle modern yöntemlerin doğurduğu sonuçlarla geleneksel yöntemlerin verdiği sonuçların ortaya konması amaçlanmıştır.

7.1 Parçalara Uygulanan İşlemler ve Testler

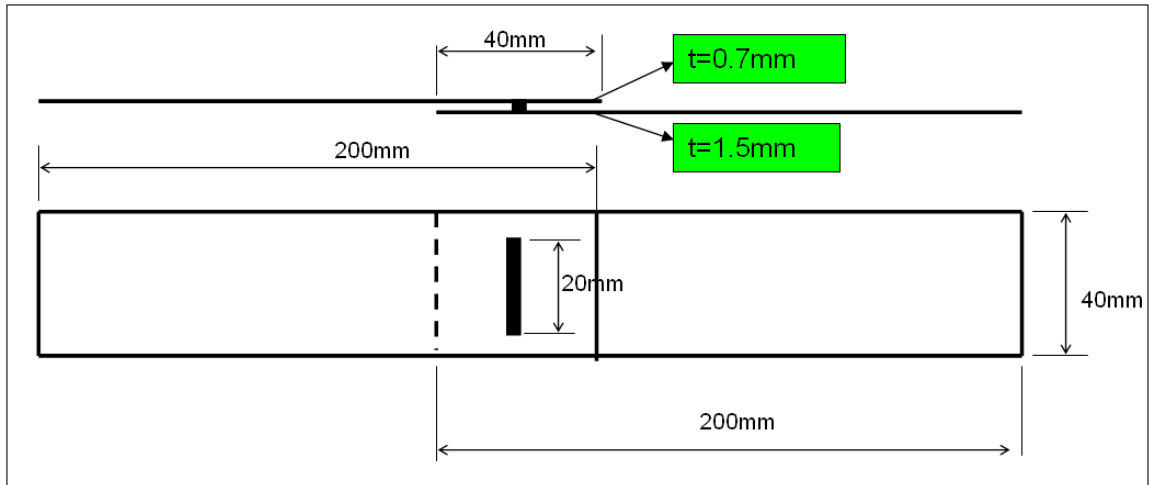
Amaçların ortaya konması doğrultusunda kaynaklı numuneler karakterize edilmişlerdir. Tüm işlemler öncesinde parçaların makro fotoğrafları alınmıştır. Parçalar laboratuvar incelenmesi için mekanik testere ile uygun boyutlara getirilmiştir. Kaynak edilecek parçaların kimyasal analizleri yapılmış üzerilerindeki çinko kaplama kalınlığı ve malzemelerin sertlikleri ölçülmüştür. Kaynak işlemi sonrasında numuneler metalografik olarak hazırlanarak Tarama Elektron Mikroskopunda (SEM) incelenmişlerdir. Aynı numuneler kaynak dikişlerinden çekiçe kırılarak kırılma yüzeylerinin görüntüleri de SEM’de alınmıştır. Daha sonrasında Ana Malzeme-ITAB-Kaynak Dikişi arasındaki sertlik profili microvickers sertlik cihazı kullanılarak titizlikle çıkarılmıştır.

Kaynak edilen parçalar araç tabanında kullanılan malzemelerdir. Yük taşıyıcı kiriş 1,5 mm kalınlığındadır. Alt tabanı oluşturacak olan sac malzemesi ise 0,7 mm kalınlığa sahiptir Şekil 7.1’ de yük taşıyıcı kiriş ile taban paneli gösterilmektedir.



Şekil 7.1 Yük taşıyıcı kiriş ve taban panelinin bilgisayar destekli tasarımı

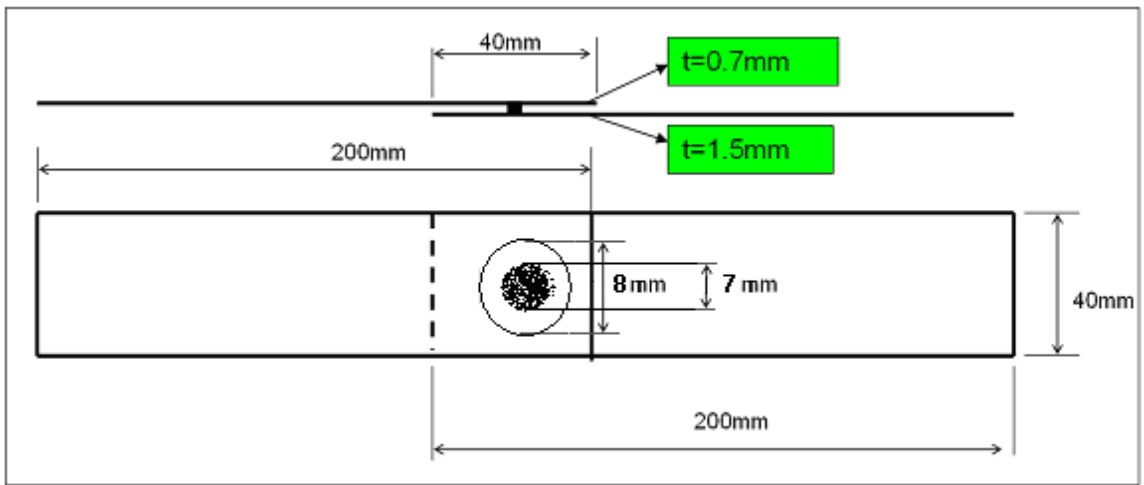
Bilgisayar destekli tasarımdan da görülen formları oluşturmak için plastik şekil verme işlemleri uygulanmıştır. Aracın bu bölgelerinde kullanılan sac malzemeler dört farklı yöntemle bindirme kaynağı Şekil 7.2’de görülen ölçülerde kaynak edilmiştir.



Şekil 7.2 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesini uzaktan laser kaynağı için ölçülendirilmesi. Laser dikişi 20 mm uzunluğundadır.



Şekil 7.3 Uzaktan laser dikişinin gerçek görüntüsü

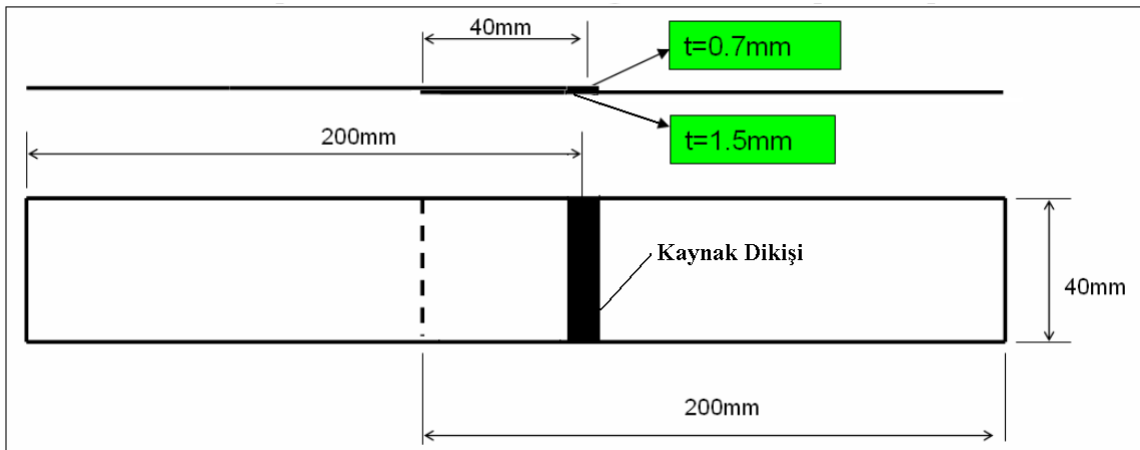


Şekil 7.4 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesini nokta kaynağı için ölçülendirilmesi. nokta çapı 7 mm dir.



Şekil 7.5 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesinin nokta kaynağı gerçek görüntüsü.

TIG kaynağı ve laser kaynağı el ile yapıldığından TIG kaynağı ve laser kaynağı “Tek dikişli L” kaynağı şeklinde yapılmıştır. Şekil 7.7’deki iki kaynaklı parçadan üstteki laser kaynaklı, alttaki ise TIG kaynaklıdır. Şekil 7.6 laser ve TIG kaynaklarının dikiş profilini göstermektedir.



Şekil 7.6 Laser ve TIG kaynağının dikiş profili



Şekil 7.7 Yük taşıyıcı kiriş ile taban panel malzemesinin TIG kaynağı ve Laser kaynağı gerçek görüntüsü.

7.1.1 Ana Malzemenin Kesilmesi

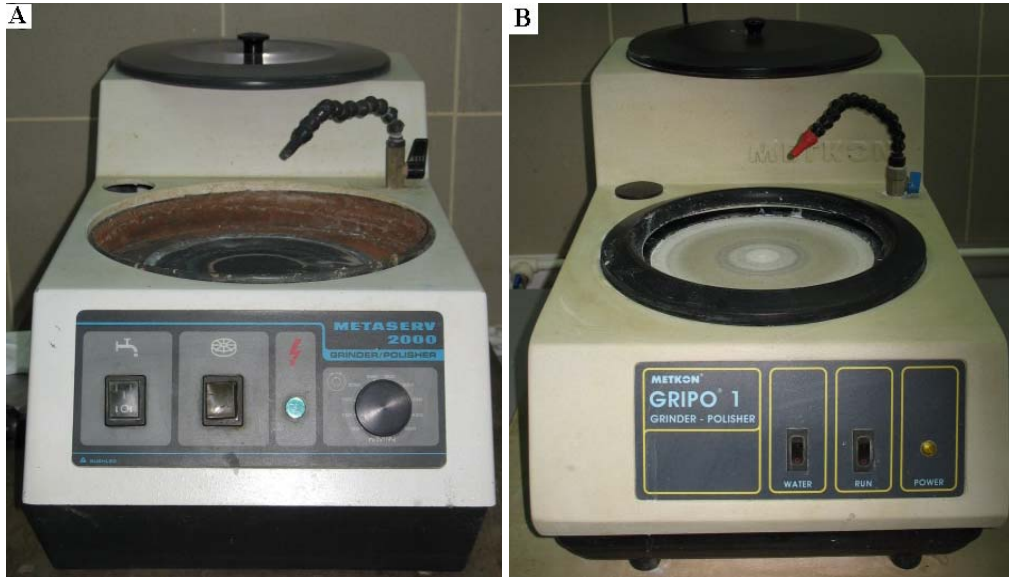
Dört farklı yöntemle birleştirilen çinko kaynaklı numuneler metalografik inceleme, çinko kaplama kalınlığı ölçümü, sertlik ölçümü, kimyasal analiz ve görüntü çekimi yapılmak üzere Şekil 7.8’de görülen *Standart* marka mekanik testere ile laboratuvar incelemelerine uygun hale getirilmiştir.



Şekil 7.8 Standart marka mekanik testere

7.1.2 Ana Malzemenin Metalografik Hazırlığı

Metalografik hazırlama sırasında tutuş kolaylığı sağlamak amacıyla farklı yöntemlerle kaynaklanmış olan parçalardan çıkarılan numuneler önce soğuk monte yapılmıştır. Soğuk monte işlemi için öncelikle monte kalıbı yağlanır; daha sonra sıvı haldeki monte malzemesi ve sertleştirici madde bir kaptaki karıştırıldıktan sonra, kalıp içine yerleştirilen numunelere bu karışım boşaltılarak montenin sertleşmesi için 3 saat beklenmiştir. Kalıptan çıkarılan monteler Şekil 7.8 A’da görülen *Metaserv 2000* marka zımpara cihazında zımparalanmıştır. Zımparalama işleminde sırasıyla 120–240–320–400–800–1000 meshlik zımparalar kullanılmıştır. Zımparalamanın ardından Şekil 7.9 B’de görülen *Metkon Gripo 1* marka parlatma cihazında numuneler 3-6-9 μm ’lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır ve SEM incelemesi için Nital 2 (%2 HNO_3 , %98 Etil alkol) ile dağlanmıştır.



Şekil 7.9 Metalografik hazırlık cihazları a) Zımparalama cihazı b) Parlatma cihazı

7.1.3 Ana Malzemenin Kimyasal Analizi

Farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilmiş malzemeler metalografik olarak hazırlanarak *Hilger Analytical* marka optik emisyon spektrometresinde kimyasal analiz yapılmıştır. Optik emisyon spektrometresine ait görüntü Şekil 7.10’da verilmiştir. Spektrometre metallerin içerdikleri alaşım elementi yüzdesini ölçmeye yarayan cihazdır. Spektrometre, alaşımın içindeki metal yüzdesini elektrotlar arasından verilen elektronun oksijeni yakmasını önlemek için argon gazı atmosferinde ölçer. Elektronun enerji seviyesindeki değişim sonucunda ortaya çıkardığı radyoaktif dalganın konkav yüzeyden geçerken kırılma açısından yararlanarak, daha önceden girilmiş referanslara göre element yüzdeleri saptamaktadır.



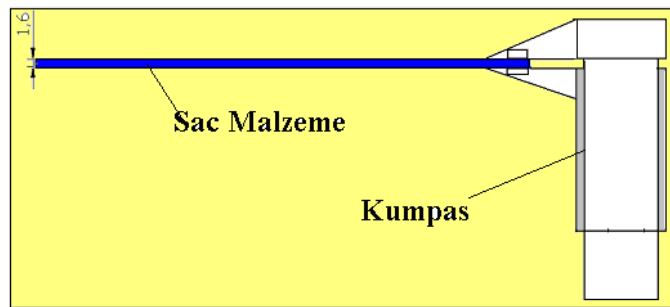
Şekil 7.10 *HILGER Analytical* marka Optik Emisyon Spektrometresi

Üzerinde işlem yapılacak malzemenin yüzeyinin pürüzsüz olması gerektiği için numune yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmalıdır.

Kaynaklı parçalar çinko kaplamalı oldukları için kimyasal analiz öncesinde kaplamalı kısım mekanik yöntemlerle kaldırılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları sadece çelik bileşimini vermektedir.

7.1.4 Ana Malzeme Kaplama Kalınlığı Ölçümü

Mekanik testere ile laboratuvar inceleme boyutuna getirilen parçalar metalografik olarak hazırlanmıştır. Metalografik hazırlık sonrasında malzemeler Nital 2 (%2 HNO₃, %98 Etil alkol) ile dağlanmıştır. SEM’ deki çalışma öncesinde mikroskobunun görüntü ölçeği kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonrası daldırma yöntemiyle düşük karbonlu çelik üzerine çinko kaplanmış tabaka SEM’de açıkça görülür hale gelmiştir.



Şekil 7.11 Sac malzeme kalınlığının kumpasla ölçülmesi

Sac malzeme kalınlığı kumpasla ölçüldüğünde teknik resimde 1,5 mm olan kalınlığın 1,6 mm olduğu görülmüştür. Kumpasla yapılan ölçüm sonrasında 0,1 mm'lik kalınlık farkının kaplamadan kaynaklandığı daha sonra SEM incelemesinde doğrulanmıştır.

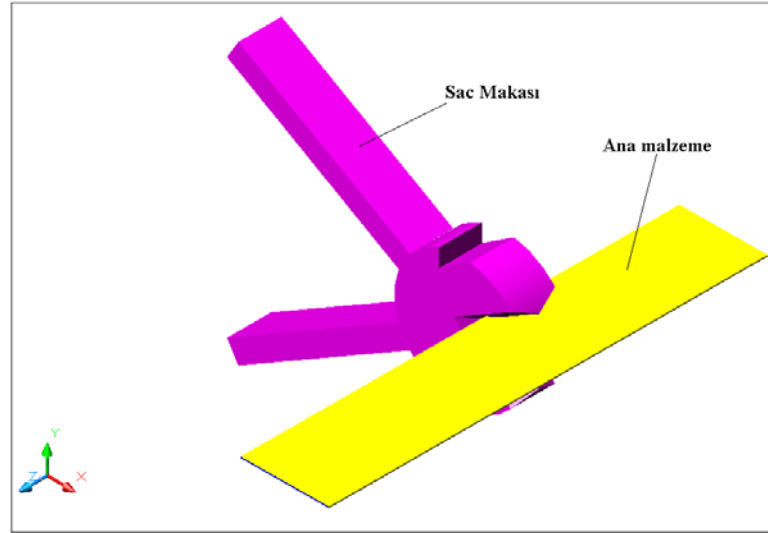
7.1.5 Ana Malzeme Görüntüsünün SEM İncelemesi

Dört farklı yöntemle kaynak edilen kaynak edilen parçalarda kullanılan ana malzeme mekanik testere, el testeresi ve makas vasıtasıyla kesilerek SEM'de incelenebilecek hale getirilmiştir. Daha sonra karbon bant üzerine yerleştirilerek Şekil 7.12'de görülen 5410 LV model kodlu JEOL marka tarama elektron mikroskobuyla mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Ana malzeme karbon bant üzerine yerleştirilerek incelenmiştir.



Şekil 7.12 Tarama elektron mikroskobu (JEOL 5410 LV)

Ana malzemeler incelenmeden önce elektron mikroskobunda incelenebilecek boyutlara indirilmesi gerekmektedir. İncelenecek olan malzemeler mekanik testereyle belirli bir boyuta getirildikten sonra sac formunda olduklarından Şekil 7.13'de görülen şekilde sac makası olarak tabir edilen makasla SEM incelemesine uygun boyutlara getirilmektedir.



Şekil 7.13 Makaslama

Sacın makasla kesilmesi işinden sonra Şekil 7.14’de görülen sac parçasının lacivertle gösterilmiş kesiti metalografik olarak hazırlandıktan sonra SEM’de görüntü alımı için incelenmiştir.



Şekil 7.14 Makasla kesilen sacın incelenen kısmı lacivertle gösterilmiştir.

7.1.6 Ana Malzeme Sertliğinin Ölçülmesi

Sertlikler Mikrovickers yöntemiyle ölçülmüştür. Sertlik ölçümünde Şekil 7.15’de görülen mikrovickers sertlik cihazı kullanılmıştır. On farklı noktadan alınan sertlikler Şekil 7.14’deki kesitten alınmışlardır. Bu kesitin tercih edilme nedeni çinko kaplamalı kısmın mantıksız sertlik değerleri verme olasılığıdır. Ölçüm, 0,2 Kp yüküyle yapılmıştır.



Şekil 7.15 MikroVickers sertlik cihazı

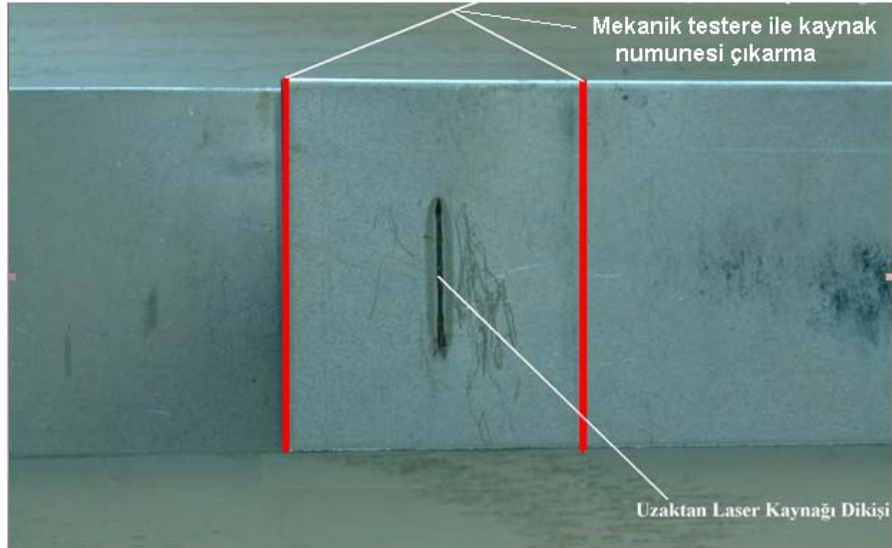
Bu cihazla ölçüm için önce yük değeri belirlenmektedir. Cihazın dijital ekranından yük değeri seçilmektedir. Cihaz belli bir süre bu yükü batıcı uçla malzemeye uygulamaktadır. Batıcı uç yükün etkisiyle malzeme üzerinde baklava dilimi şeklinde bir iz meydana getirmektedir. Cihaz aynı zamanda metal ışık mikroskoplarının sahip olduğu donanıma da sahip olduğundan batıcı ucun oluşturduğu baklava şeklindeki izin köşegen uzunlukları cihazın yardımcı elemanları sayesinde ölçülerek cihaz hafızasına kaydedilir. Cihaz normal sertlik değerini otomatik olarak hesaplayarak vermektedir. Sertlik değerleri ana malzemenin en az üç farklı bölgesinden alınmıştır ve bunların ortalaması sertlik değeri olarak kabul edilmiştir.

7.2 Kaynak Bölgesi İşlemleri

Kaynak bölgesinin incelenebilmesi için öncelikle kaynak numunesi çıkartılmış ve metalografik hazırlığı yapılmıştır. Metalografik hazırlık sonrasında SEM’ de inceleme yapılmıştır ve kaynak bölgesi sertliği ölçülmüştür.

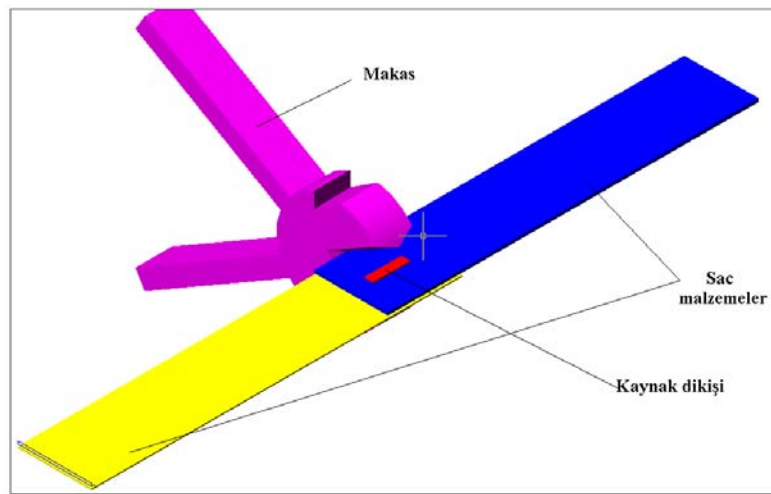
7.2.1 Kaynak Bölgesinin Çıkarılması

Şekil 7.16’da uzaktan laser ile kaynak edilmiş bindirme kaynağı görülmektedir. Kırmızı çizgiler mekanik testere ile kesilerek çıkartılan kaynak numunesini sınırlamaktadır. İki kırmızı çizgi arası kaynak bölgesini barındıran numunedir. Şekil 7.16’da görülen dik siyah çizgi uzaktan laser kaynağıyla oluşturulmuş kaynak dikişidir.



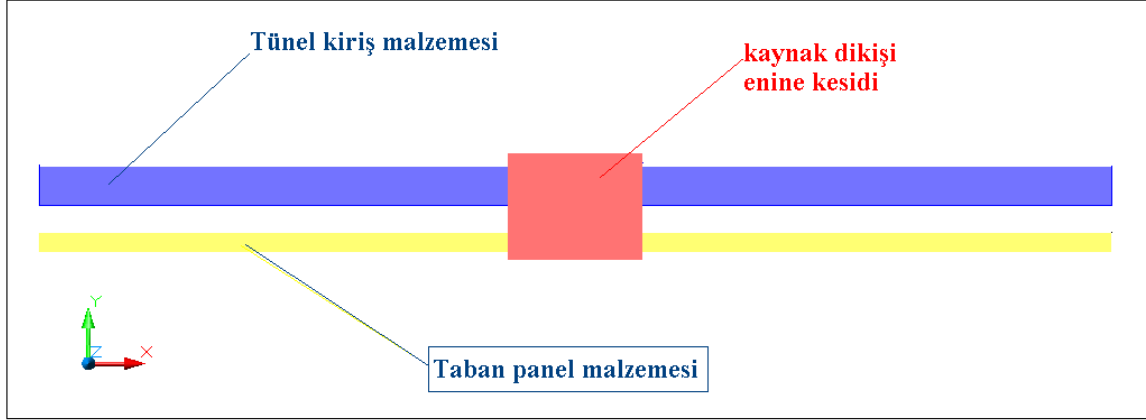
Şekil 7.16 Mekanik testere ile kaynak numunesinin çıkarılması

Şekil 7.16’da görülen kaynak numunesi Şekil 7.17’de görüldüğü şekilde kaynak dikişine dik şekilde makasla kesilmiştir. Böylece kaynak dikişinin enine kesiti alınabilmektedir. İncelemeler kaynak dikişine dik olan kesitte yapılmıştır. Kaynak dikişine dik olan kesitin incelenmesindeki amaç; kaynak dikişinden dışarı doğru kaynak işleminin etkilerini ve sertlik değişimini görmektir. Sertlik değişimi; kaynak bölgesinin merkezinden dışa doğru belirli aralıklarla sertliği ölçerek belirlenmektedir. Böylece bir sertlik profili oluşturularak konstrüksiyondaki zayıf noktalar belirlenebilmektedir.



Şekil 7.17 Kaynak dikişinin enine kesitinin çıkarılması

Şekil 7.17 deki şekilde kaynak dikişinin enine kesiti alındıktan sonra sertlik taraması ve SEM incelemesi için hazır olan kesit Şekil 7.18’ de görülmektedir. Maviyle gösterilen 1,6 mm kalınlığındaki sac malzeme, sarı ile gösterilen 0,8 mm kalınlığındaki sac malzeme olmak üzere kırmızı ile gösterilen bölge kaynak dikişinin enine kesitidir.



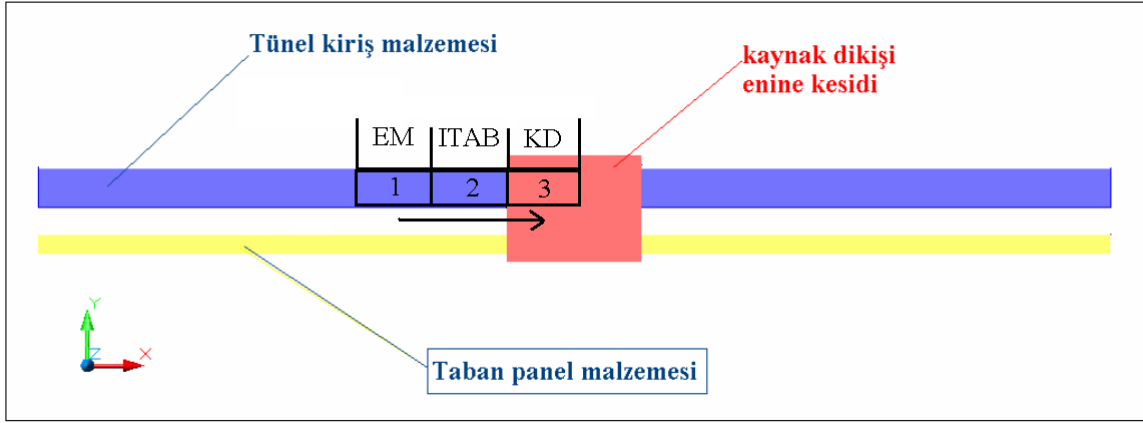
Şekil 7.18 Kaynak bölgesi enine kesiti

7.2.2 Kaynak Bölgesinin Metalografik Hazırlığı

Kaynak bölgesinin hazırlığında ana malzemenin metalografik hazırlığıyla aynı prosedür izlenmiştir. Ana malzemeyle aynı şekilde metalografik hazırlama sırasında tutuş kolaylığı sağlamak amacıyla soğuk monte yapılmıştır. Soğuk monte işlemi için monte kalıbı yağlandı ve daha sonra sıvı haldeki monte malzemesi ve sertleştirici madde bir kapta karıştırıldıktan sonra kalıp içine boşaltıldı. Montenin sertleşmesi için 3 saat beklenmiştir. Kalıptan çıkarılan monteler Şekil 7.8A’da görülen *METASERV 2000* marka zımpara cihazında zımparalanmıştır. Zımparalama işleminde sırasıyla 120–240–320–400–800–1000 meshlik zımparalar kullanılmıştır. Zımparalamanın ardından Şekil 7.9 B’de görülen *METKON GRIPO 1* marka parlatma cihazında numuneler 3-6-9 μm ’lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır ve SEM incelemesi için Nital 2 (%2 HNO_3 , % 98 Etil) alkol ile dağlanmıştır.

7.2.3 Kaynak Bölgesinin SEM’de İncelenmesi

Kaynak bölgesinin elektron mikroskopunda incelenmesinin nedeni kaynak işleminden sonra ana malzeme ile kaynak bölgesi ve ITAB arasında meydana gelen farklılıkları görmektedir. İncelemeler sırasında Şekil 7.12’de görülen JEOL marka ve 5410 LV model kodlu taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Ana malzeme ile ITAB ve kaynak dikişi arasındaki farklılıkları ortaya koyarken incelemeye ana malzeme tarafından başlanmıştır. Görüntüler Şekil 7.19’da görülmekte olan kesitten alınmıştır. Kaynak dikişi enine kesilerek incelenmiştir.

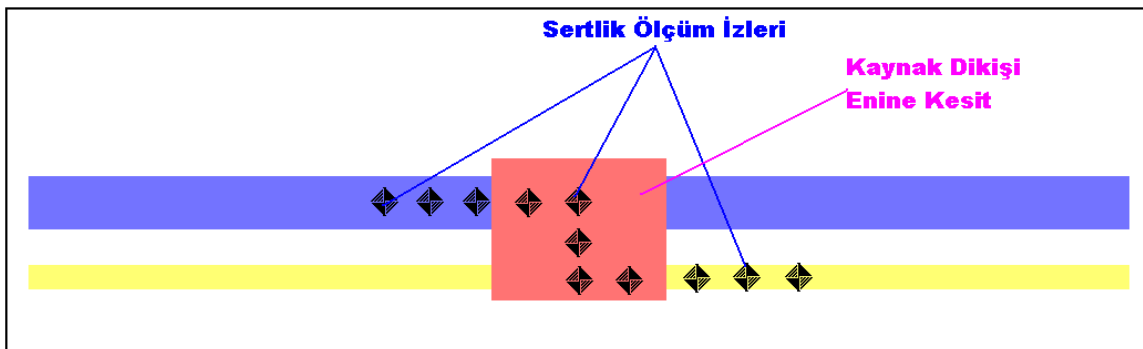


Şekil 7.19 Kaynak dikişinde SEM incelemesi. EM; Esas (ana) malzeme, ITAB; ısı tesiri altındaki bölge, KD; kaynak dikişi.

Görüntü alımına ok ile gösterilen taraftan başlanmıştır. Bölge 1’den ana malzeme, bölge 2’den ITAB, bölge 3’ten ise kaynak dikişinin görüntüsü alınarak fotoğraflanmıştır. Malzemelerin metalografik hazırlık durumlarının ve SEM’in izin verdiği çeşitli büyütmelerde görüntüler alınmıştır.

7.2.4 Kaynak Bölgesi Sertliğinin Ölçülmesi

Kaynak bölgesinin sertliğinin incelenmesinin nedeni kaynak işleminden sonra ana malzeme ile kaynak bölgesi ve ITAB arasında meydana gelen yapı farklılıklarının sonuçlarını görmektedir. İncelemeler sırasında Şekil 7.15’de görülen mikrovickers sertlik cihazı kullanılmıştır.



Şekil 7.20 Kaynak dikişinde sertlik ölçümü.

Ana malzeme, ITAB ve kaynak dikişi sertlik değerleri belirlenirken sertlik taramasına ana malzeme tarafından başlanmıştır. Sertlikler Şekil 7.20’de görülmekte olan kesitten alınmıştır. Kaynak dikişi enine kesilmiştir ve sertlik-mesafe değerleri grafik hale getirilmiştir.

8. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

Bir önceki bölümde deneysel çalışmaların hangi sırayla ve nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Bu bölümde ise bu çalışmalardan elde edilen ölçüm sonuçları, analiz sonuçları ve görüntüler verilmiştir.

8.1 Ana Malzemenin Kimyasal Analizi

Farklı yöntemlerle birleştirilmiş malzemeler *HILGER Analytical* marka optik emisyon spektrometresinde kimyasal analize tabi tutulmuştur. Optik emisyon spektrometresinde elde edilen sonuçlar Çizelge 8.1’de verilmiştir.

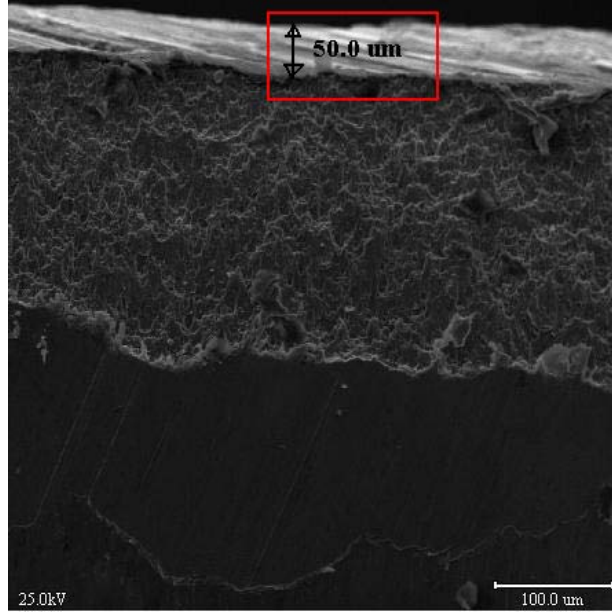
Çizelge 8.1 Düşük karbonlu çeliğinin kimyasal analizi

Düşük Karbonlu Çeliğin Kimyasal Analizi									
% Fe	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Al
99,08	0,102	0,081	0,243	0,0161	0,0224	0,022	0,014	0,017	0,049
0,006	0,0008	0,010	0,032	0,008	0,0029	0,025	0,000	0,000	0,069
% As	% B	% Co	% Cu	% Nb	% Pb	% Sn	% Ti	% V	% W

8.2 Ana Malzemenin Kaplama Kalınlığının Ölçümü

Büyütme miktarıyla orantılı olarak görüntüye eklenen ölçek çubuğu farklı görüntülerin boyutlarının göreceli olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Şekil 7.10’da açık renkle görülen kısım çinko kaplamadır. Ölçek çubuğunun uzunluğuyla kaplama yüksekliğinin göreceli olarak karşılaştırılmasıyla kaplama kalınlığı belirlenmiştir.

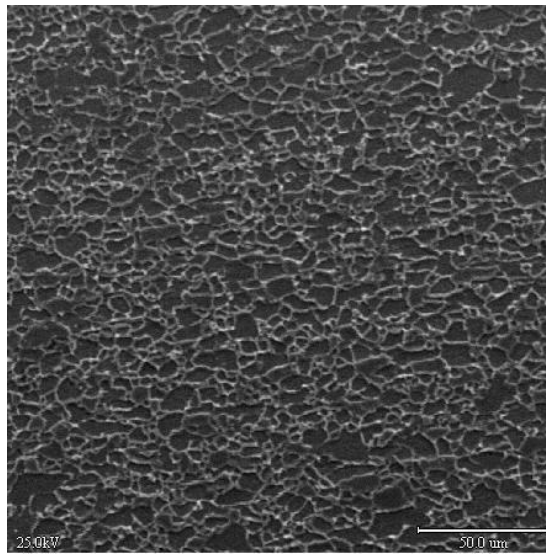
Kumpasla yapılan ölçümlerde sacın galvaniz kaplamalı halini kalınlığının 1,6 mm olduğunu göstermiştir (Şekil 7.11). Teknik çizimlerde 1,5 mm olarak görülen sacın kumpas ölçümünde 1,6 mm çıkmasını sebebi sacın her iki tarafında 50 µm’lik çinko kaplama kalınlığıdır. İki taraftaki 50 µm’lik kalınlık toplamda 100 µm’lik kalınlık vermektedir ki bu durum 1,6 mm ile 1,5 mm arasındaki farkı açıklamaktadır.



Şekil 8.1 Düşük karbonlu çelik üzerindeki çinko kaplamanın kalınlığının ölçülmesi

8.3 Ana Malzeme Görüntüsünün SEM İncelemesi

Malzemeleri SEM’de metalografik hazırlık yapmadan incelemek mümkündür ancak yapıyı detaylı olarak görmek için zımparalama, parlatma ve dağlama yapılmıştır. Metalografik hazırlık sonrasında ana malzemenin görüntüleri de 25.0 kV gerilim altında, 500 büyütmede ve BSE (Back Scattered Electrons) modunda alınmıştır. Back scattered electrons modunda malzemedan geri saçılan elektronlarla görüntü oluşturulmaktadır (Şekil 8.2).



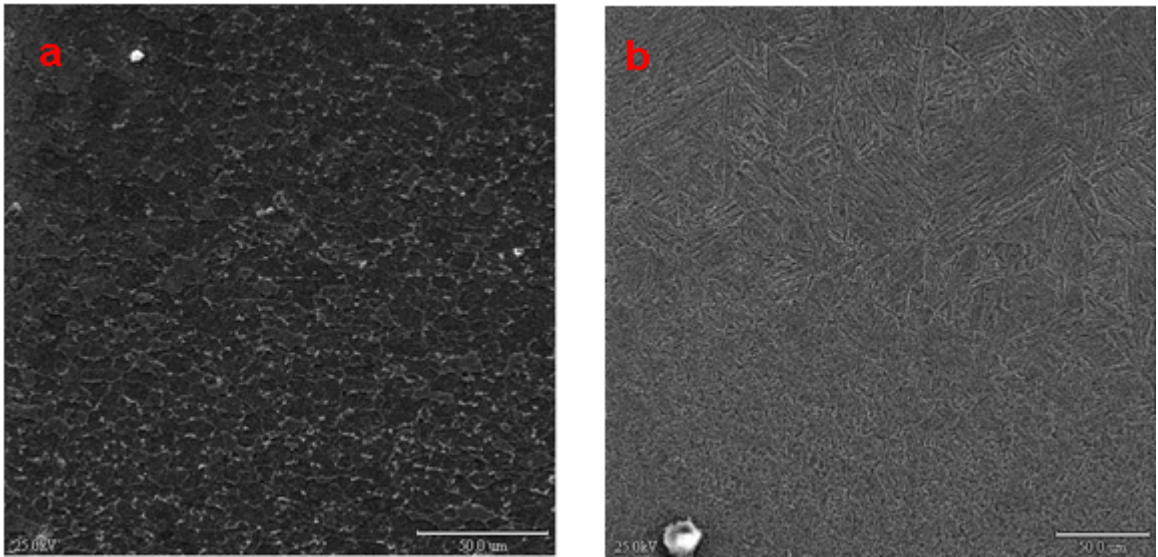
Şekil 8.2 Ana malzemenin görüntüsü 25 kV, 500X

8.4 Kaynak Bölgesinin SEM’de İncelenmesi

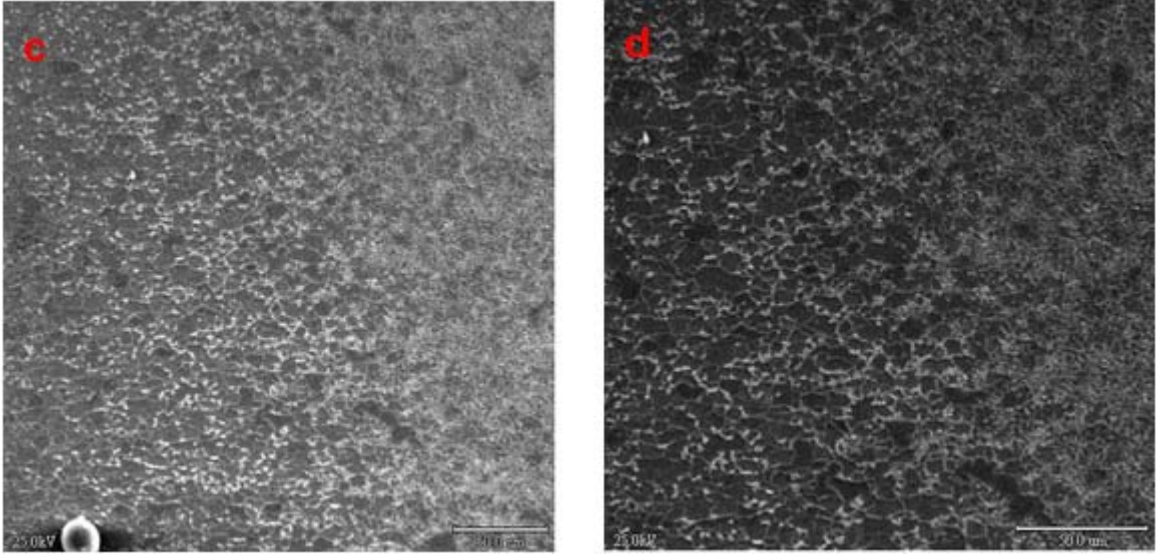
Kaynak bölgesi ana malzemenin, ITAB’ın ve kaynak dikişinin birbirine komşu olduğu bölgedir. Her bir yöntemde inceleme ana malzemeden başlar ve kaynak dikişinde son bulur. Böylece mikroyapılardaki farklılıklar ortaya konabilmektedir.

8.4.1 Nokta Kaynağının İncelenmesi

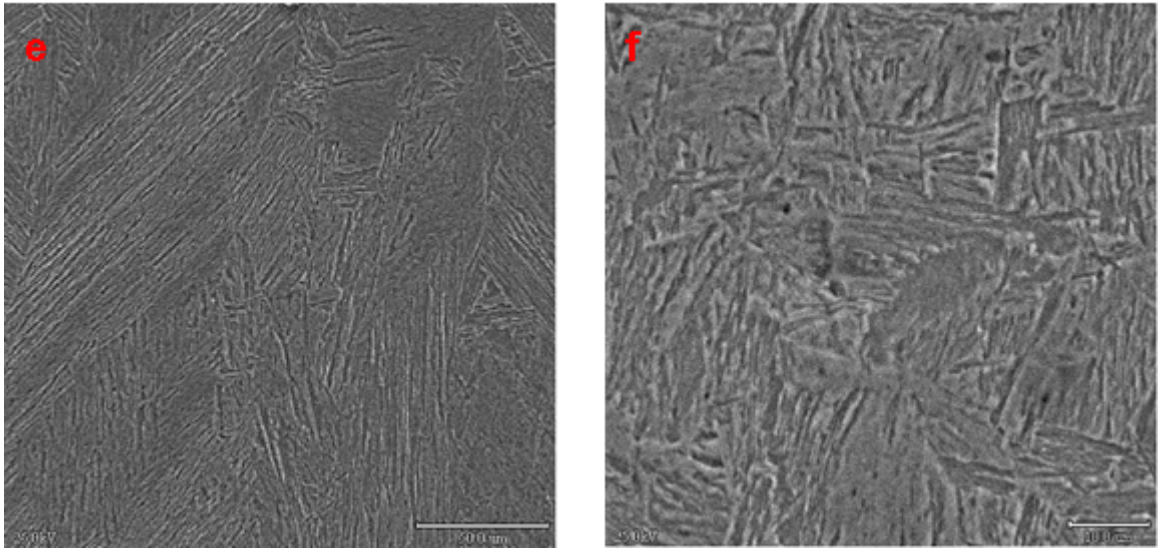
Konvansiyonel yöntemlerle araç üretimi yapıldığında bir binek araç için yaklaşık 5000 adet nokta kaynağı yapılmaktadır. Bu birleştirme işlemlerinde birçok özellik doğrultusunda kaynak parametreleri seçilmektedir. Kaynak tabancaları transformatörler içermektedir. Bu transformatörlerde birincil (primer) ve ikincil (sekonder) sargılar bulunmaktadır. Birincil sargı da yaklaşık 450 Volt’luk gerilim ve küçük akım şiddetli alternatif akım mevcuttur. Transformatör birincil sargıdaki bu büyük gerilimi küçük gerilime ve küçük akımı da büyük akıma çevirmektedir. Mikroyapıları aşağıda görülen 0,7 mm’lik ve 1,5 mm’lik malzemelerin kaynağı 10,3 kA (kiloamper) akım şiddeti, 10 çevrim kaynak zamanı ve 2630 N (Newton) elektrot baskı kuvvetiyle yapılmıştır.



Şekil 8.3 a)Ana malzeme, b)Ana malzeme ile Kaynak bölgesinin geçişi 350X



Şekil 8.3 (Devamı) c) Ana malzeme-Geçiş bölgesi-Kaynak noktası 350 X, d) Ana malzeme-Geçiş bölgesi-Kaynak noktası 500 X



Şekil 8.3 (Devamı) e) Kaynak noktası 500X, f) Kaynak noktası 1500X

Şekil 8.3’de görülen mikroyapılar 25 kV gerilim altında alınmıştır. Mikroyapıların sol tarafı ana malzeme tarafıdır sağa doğru ilerlenerek kaynak noktasında gelinmiştir.

Nokta kaynağı mikro yapılarında çok belirgin bir geçiş bölgesi görülmemektedir. Geçiş bir hat şeklindedir ve bu hat çok dardır. Bu husus, nokta kaynağının doğasıyla açıklanabilmektedir. Nokta kaynağında akım kaynak edilecek malzemeler vasıtasıyla diğer elektrota iletilmektedir. Akım bir elektrottan çıktıktan sonra yoğunlaşma eğiliminde

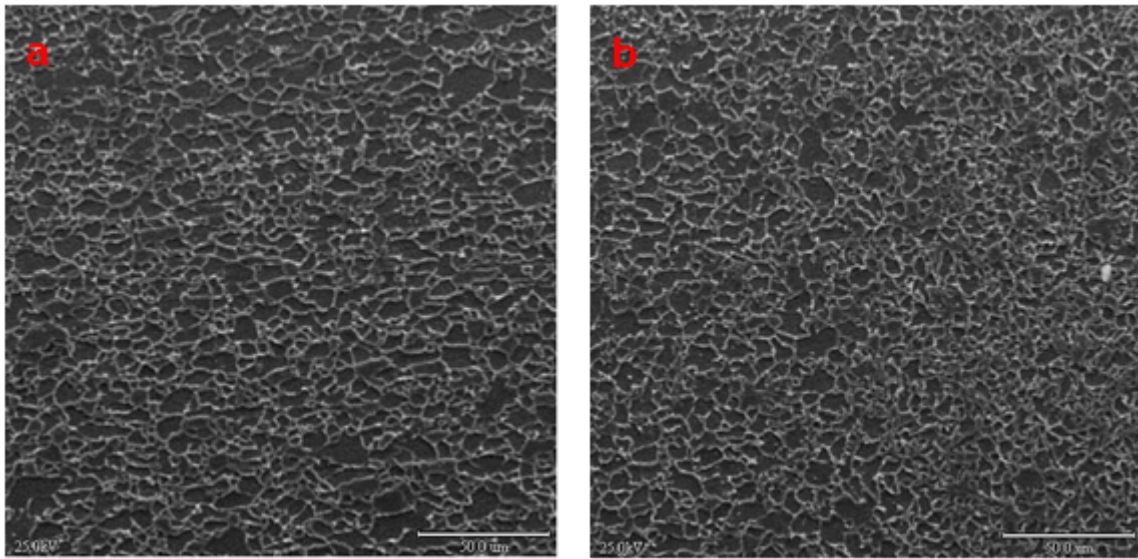
olmaktadır ve iki malzemenin birleştii noktada en yoğun halini almaktadır. Akım çizgilerinin şekli; tepe noktaları birbirine yapışık iki koni gibi olmaktadır. Akımın yoğun olduğı bölge ile akımın olmadığı bölge arasında keskin bir çizgiyle ayrılmış bölgeler vardır ve dolayısıyla geçiş bölgesi mikroyapılardan da görüldüğü gibi oldukça dardır.

Akımın yoğun olduğı bölgelerde (Şekil 8.3 e,f) martenzit oluşmuştur. Kaynak edilen malzeme düşük karbonlu çelik olduğundan iğne martenzit oluşmuştur. Martenzit, difüzyonsuz katı hal dönüşümünün bir sonucu olarak oluşan bir fazdır. Martenzitik reaksiyon zamana değil sıcaklığa bağlıdır. Östenit sahasındaki sıcaklıklardan çok hızlı soğuma ile martenzitik yapı oluşmaktadır. Sac malzemenin büyük yüzey alanı sayesinde hızlı soğuma olasıdır.

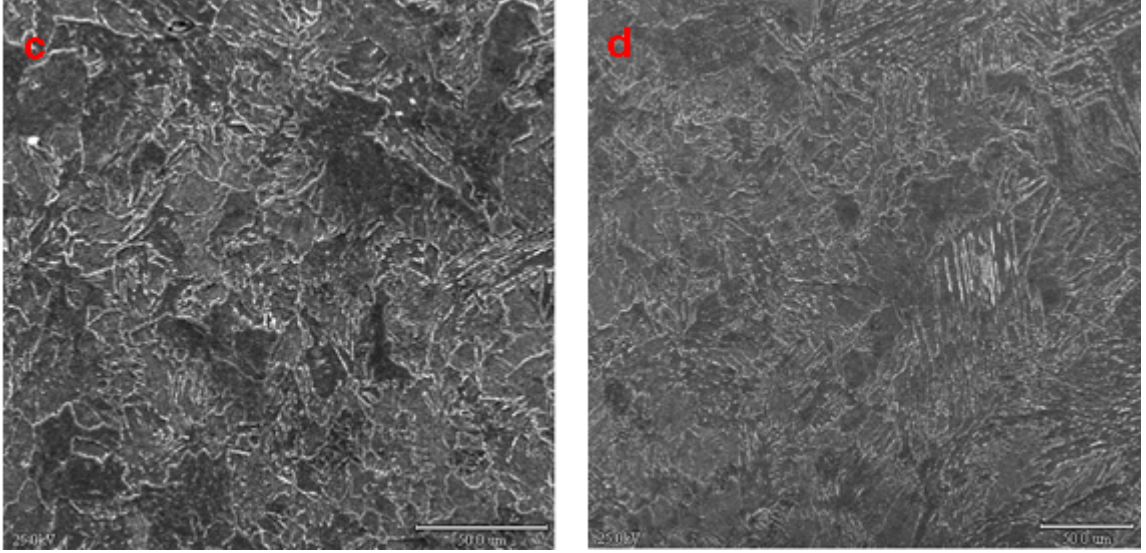
8.4.2 TIG Kaynağının İncelenmesi

Otomotiv sektöründe TIG kaynağı genellikle gövde üzerinde nokta kaynağı uygulanamayacak bölgeler için uygun bir yöntemdir. Kaynak işlemi tek dikişli “L” kaynağı şeklinde yapılmıştır.

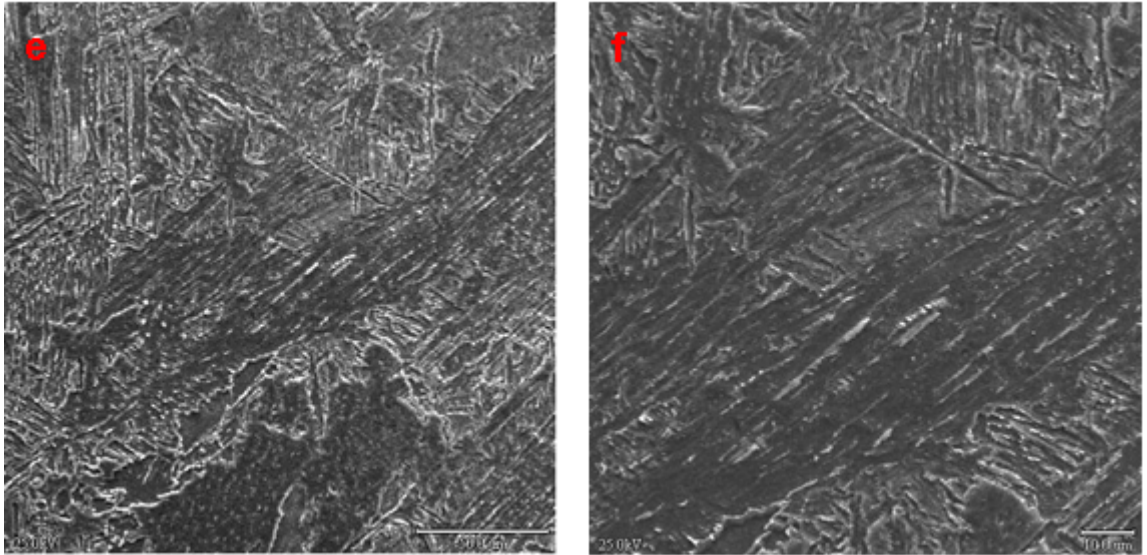
Kaynak sırasında ilave malzeme kullanılmamıştır kaynak hızı 0,5 mm/sn, koruyucu argon gazı sarfiyatı 4 lt / dak seçilmiştir. Akım şiddeti 95 amperdir, doğru akım kullanılarak (-) kutuplama yapılmıştır ve kaynak işlemi tek pasoda tamamlanmıştır. Kaynak edilen malzemeler ince olduğu için elektrot (+) kutba malzeme (-) kutba bağlanmıştır. Elektrot (+) malzeme (-) kutba bağlandığında derin kaynak nüfuziyeti elde edilemez; saclar yeterince ince olduğundan böylesi bir kutuplama ile yeterli kaynak kabiliyeti sağlanabilmiştir.



Şekil 8.4 a) Ana malzeme 500X, b) Ana malzeme ile ITAB'ın geçişi 500X



Şekil 8.4 (Devamı) c) ITAB 500X, d) ITAB-Kaynak dikişi geçişi 350 X



Şekil 8.4 (Devamı) e) Kaynak dikişi 500X , f) Kaynak dikişi 1000X

Şekil 8.4 a’da ana malzeme b’de ise ana malzeme-ITAB geçişi görülmektedir. Şekil 8.4 b ‘de ana malzemedan ITAB’a doğru tane boyutunun küçüldüğü görülmektedir. Kaynak dikişinde iğne martenzit oluşumu görülmüştür.

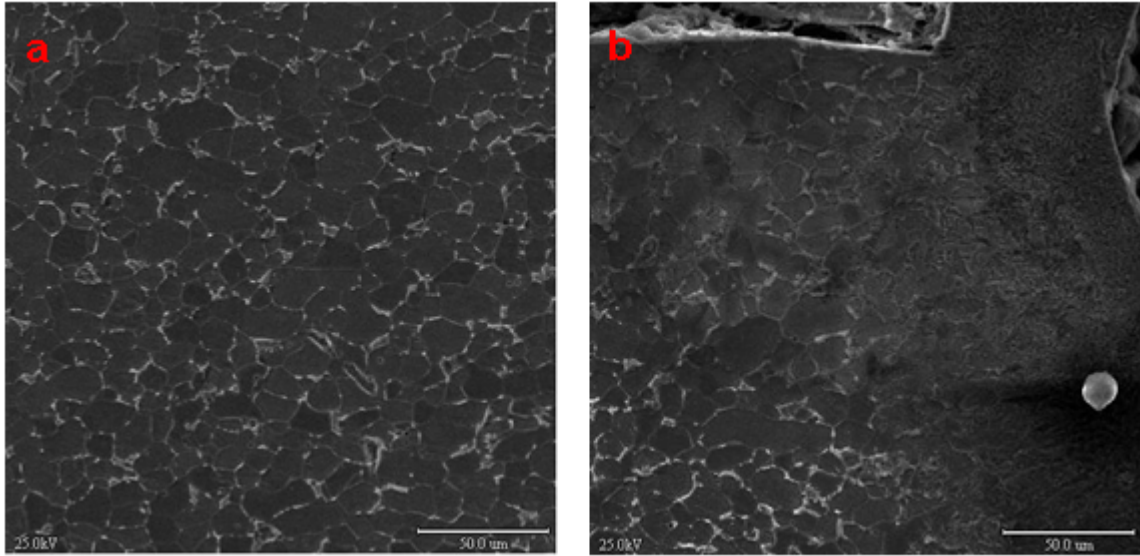
Ayrıca kaynak dikişi tarafında Widmanstätten yapıya da rastlanılmıştır. Widmanstätten ferrit Ac_3 sıcaklığına yakın sıcaklıklarda oluşabilir ve bu yüzden sadece 50 J/mol kadar serbest enerji değişimi gerektiren alt soğumayla ortaya çıkabilir. Bu değer difüzyonsuz dönüşüm için gerekli olandan çok daha küçüktür. Bu büyüme mekanizması gerilim ve yüzey enerjilerini

minimize eder ve daha hızlı büyüme sağlar. Widmanstätten, özellikle iğnesel şekil oluşturduğunda yapıda kırılabilirlik meydana gelmektedir.

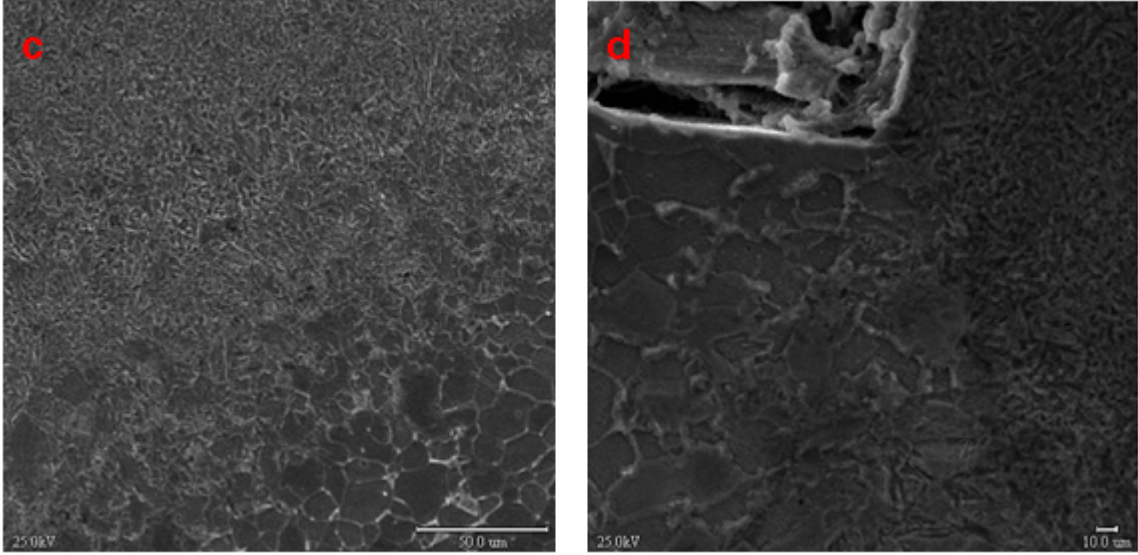
8.4.3 Laser Kaynağının İncelenmesi

Otomotiv sektöründe laser kaynağı genellikle gövde üzerinde dayanım açısından kritik olan bölgeler için uygun bir yöntemdir. Laser ana malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki yapmadığından özellikle taşıyıcı kirişlerin birleştirilmesinde tercih edilir. Kaynak işlemi TIG kaynağındaki gibi tek dikişli “L” kaynağı şeklinde yapılmıştır.

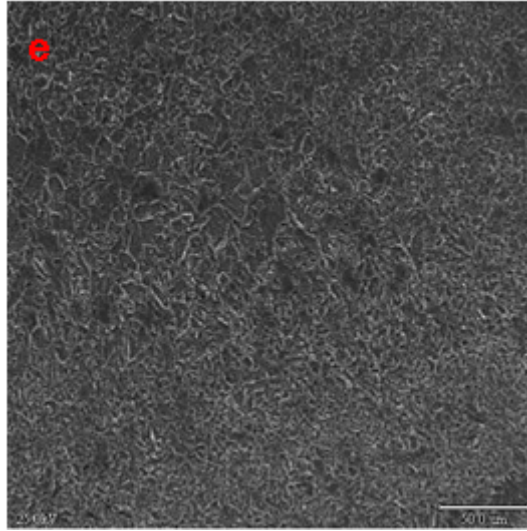
Kaynak sırasında ilave malzeme kullanılmamıştır kaynak hızı 35 mm/sn, koruyucu argon gazı debisi 15 lt/dak seçilmiştir. Laser gücü 950 Watt’dır, tam yüzeyde odaklama ($z=0$) yapılmıştır, odak çapı 340 μm ’dir ve güç yoğunluğu $\sim 1045 \text{ KW/cm}^2$ ’dir.



Şekil 8.5 a)Ana malzeme 500 X, b)Ana malzeme-ITAB-Kaynak dikişi 500X



Şekil 8.5 (Devamı) c) Ana malzeme-ITAB-Kaynak dikişi 500X, d) ITAB-Kaynak dikişi 1000X



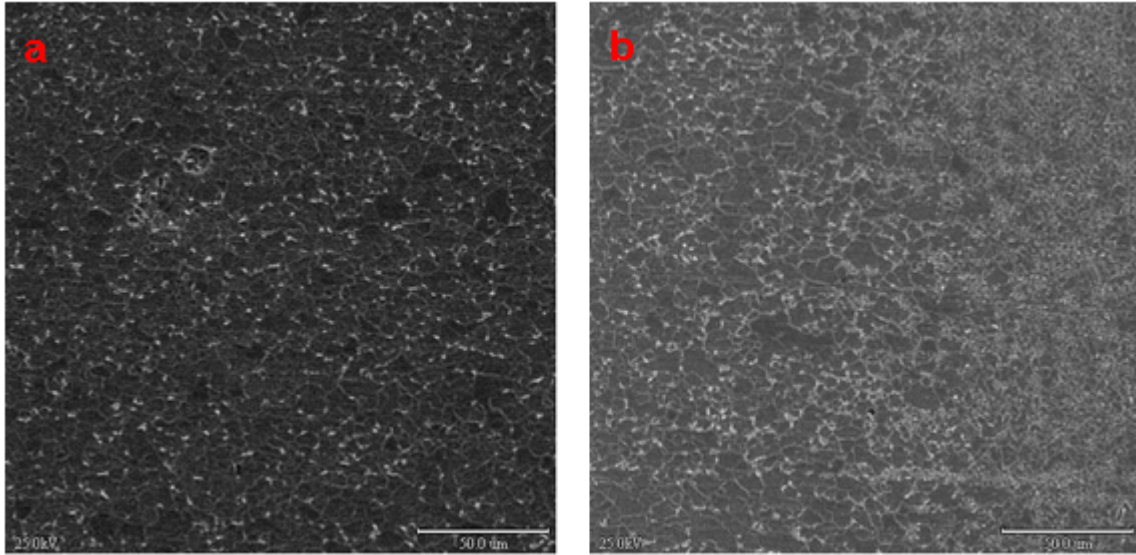
Şekil 8.5 (Devamı) e) Kaynak dikişi 500X

Şekil 8.5 a’da ana malzeme b’de ise ana malzeme-ITAB-kaynak dikişi birlikte görülmektedir. Şekil 8.5.b ‘de üç farklı bölgenin birlikte görülmesinin nedeni ITAB’ın çok dar olmasıdır. Kaynak dikişinde iğne martenzit oluşumu görülmüştür. Yüksek güç yoğunluğu hızlı sıcaklık yükselmesi bu yüksek sıcaklığa bağlı olarak hızlı buharlaşmayı beraberinde getirmiştir. Çinko buharı ve çelik buharı ortamdan uzaklaşırken ortamdan ısıyı da götürmektedir ve hızlı ısı çekişine bağlı olarak iğne martenzit oluşmaktadır.

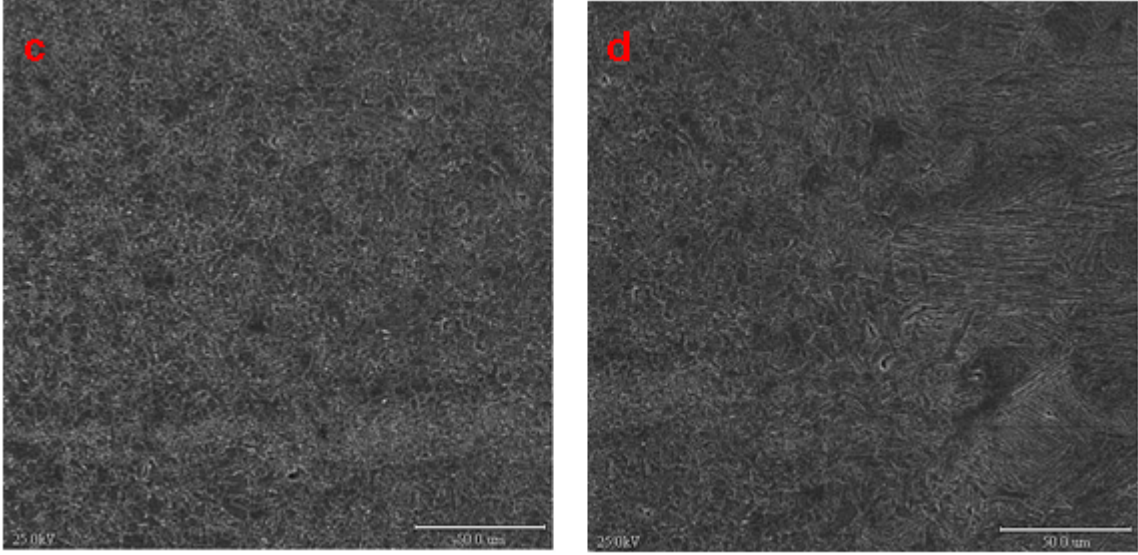
8.4.4 Uzaktan Laser Kaynağının İncelenmesi

Uzaktan laser kaynağı esnek ve hızlı üretime olanak verdiğinden tercih edilmeye başlamış yeni bir yöntemdir. Uzaktan laser ile birleştirilmeleri yapılacak olan araç gövdeleri bu yöntemle üretim esas alınarak tasarlanmalıdır. Kaynak işlemi bindirme kaynağı şeklinde yapılmıştır.

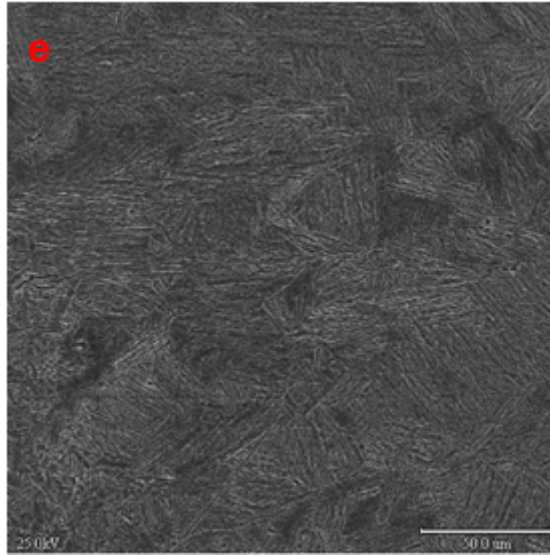
Kaynak sırasında ilave malzeme ve koruyucu gaz kullanılmamıştır kaynak hızı 125 mm/sn seçilmiştir. Laser gücü 4000 Watt'dır, tam yüzeyde odaklama ($z=0$) yapılmıştır, odak çapı 600 μm 'dir ve güç yoğunluğu $\sim 1415 \text{ KW/cm}^2$ 'dir. Kaynak edilen saclar arasındaki aralık 0,3 mm'dir ve laser kafası ile iş parçası arasındaki mesafe 1500 mm'dir. Tam yüzeyde odaklama yapılmasının nedeni parçada oluşabilecek çarpımalardır. Yüzey üzerinde yapılan odaklamalarda ışın daha büyük bir alanı etkilediğinden ısı gerilmelerin oluşması muhtemeldir. Yüzey altında odaklama yapıldığında ise plazma oluşma olasılığı mevcuttur. Plazma çok yüksek sıcaklıktadır ve yüzey üzerindeki odaklama durumuna benzer olarak ısı gerilme olasılığı yüksektir. Geleneksel Laser sistemlerinde oluşan plazmayı süpürmek için gaz hızı arttırılabilir ancak, uzaktan Laser sistemlerinde iş parçası ile kafa arasındaki mesafenin uzunluğundan dolayı genellikle gaz kullanılmaz. Sistemde gaz olmadığından ya kaynak hızı arttırılır yada laser gücü düşürülür ve saclar arasında verilen aralık ile plazma uzaklaştırılır.



Şekil 8.6 Uzaktan Laser kaynaklı malzeme kaynak bölgesi a) Ana malzeme 500 X, b) Ana malzeme-ITAB geçişi 500 X



Şekil 8.6 (Devamı) c)ITAB 500 X, d)ITAB-Kaynak dikişi geçişi 500 X



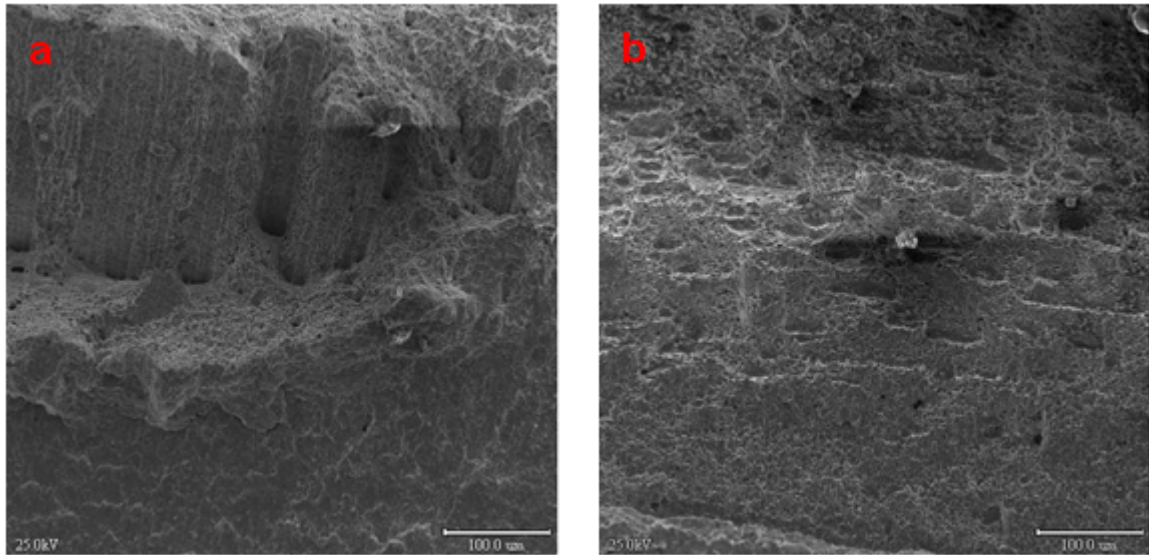
Şekil 8.6 (Devamı) e) Kaynak dikişi 500 X

Şekil 8.6 a'da ana malzeme b'de ise ana malzeme-ITAB görülmektedir. 8.6.b 'de ana malzemeden ITAB'a doğru gidildikçe tane boyutları küçülmektedir. Geleneksel laser sistemine benzer olarak uzaktan laser sisteminde de ITAB bölgesi dardır. Teoride ITAB çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri etkilemektedir ancak Buradaki gibi dar ITAB mevcut ise mekanik özelliklerdeki farklılıklar göz ardı edilebilecek boyuttadır. Kaynak dikişinde iğne martenzit oluşumu görülmüştür. Güç yoğunluğu geleneksel laserdekinden daha yüksek olmasına rağmen oluşan martenzit iğnelerin uzunlukları daha fazladır. Hızlı buharlaşma kavramı burada da mevcuttur ancak buradaki laser ışın çapının daha büyük olması

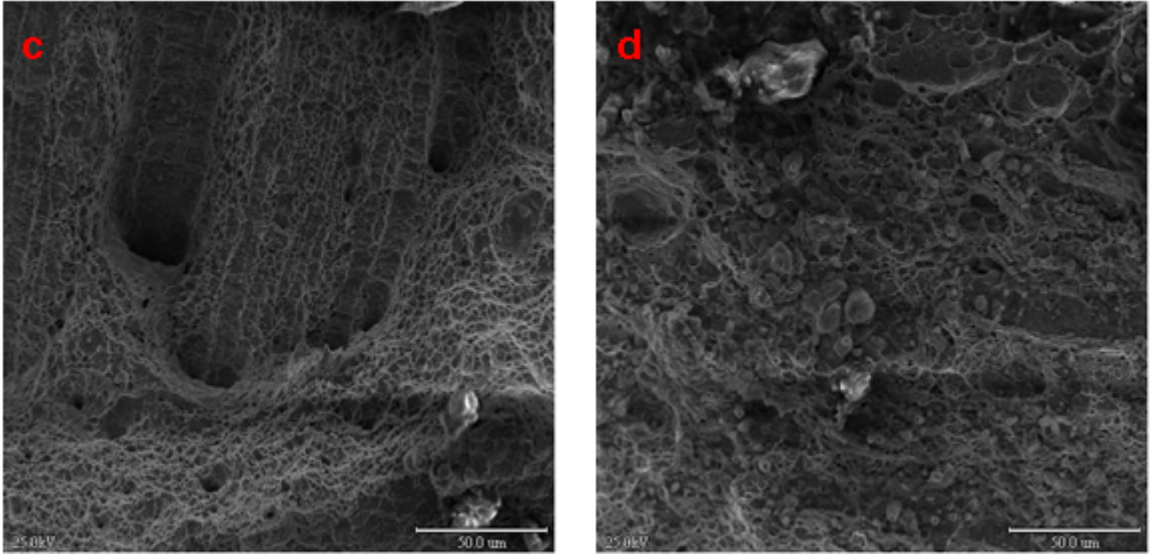
dikiş çevresini ısıttığından ısı kaçış hızı daha küçük olmuştur. Kaynak hızının da geleneksel laser kaynağından büyük olması sayesinde ısı girdisi dengelendiğinden geleneksel lasere göre daha az plazma ve buharlaşma oluşumu söz konusu olmuştur. Martenzit iğnelerinin boyutları arasındaki farklar bu şekilde açıklanabilmektedir.

8.5 Geleneksel Yöntem ile Modern Yöntemin Kırılma Yüzeyleri Açısından Karşılaştırması; TIG Kaynağı – Uzaktan Laser Kaynağı

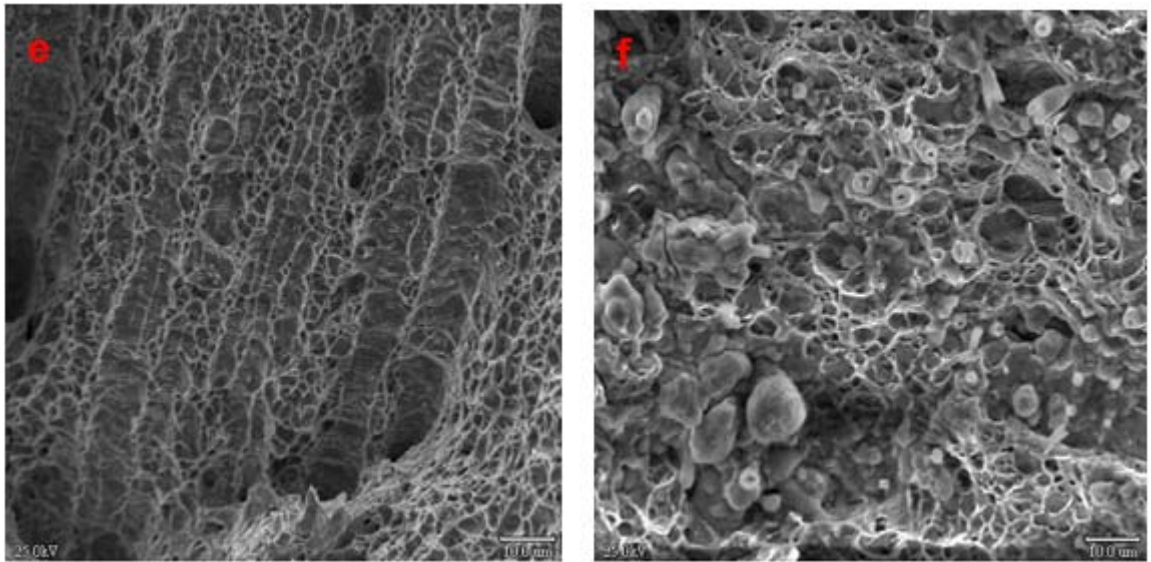
Aşağıda uzaktan laser ile ve TIG yöntemi ile kaynak edilmiş düşük karbonlu çelik malzemelerin kaynak dikişlerindeki kırılma yüzeyleri gösterilmektedir. Görüntüler malzemelerde oluşabilecek kırılma durumunda kaynak dikişlerinin davranışlarını hakkında fikir vermektedir. TIG yöntemi geleneksel kaynak yöntemini, uzaktan laser kaynağı (ULK) ise yüksek güç yoğunluklu modern yöntemleri temsil etmektedir.



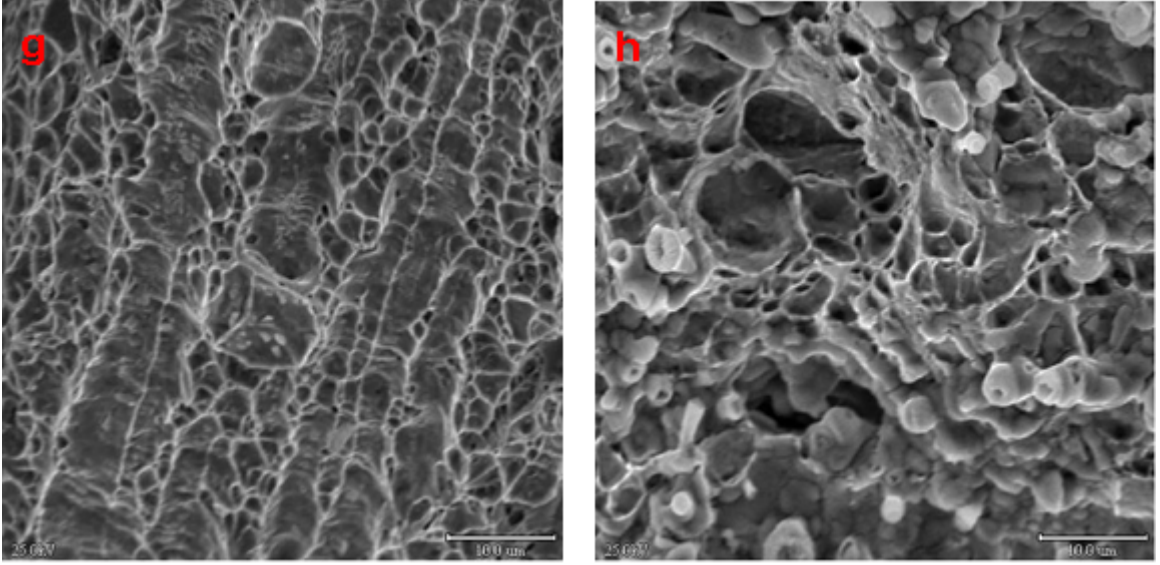
Şekil 8.7. Kırılma yüzeyleri, a)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 200X, b)ULK kırılma yüzeyi 200X



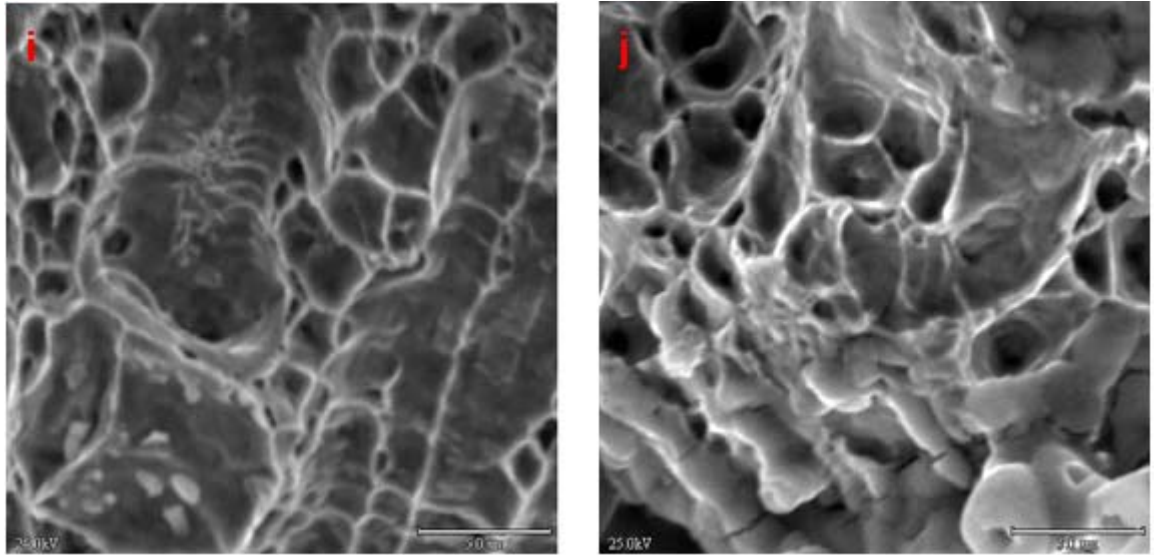
Şekil 8.7. (Devamı) c)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 500X, d)ULK kırılma yüzeyi 500X



Şekil 8.7. (Devamı) e)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 1000X, f)ULK kırılma yüzeyi 1000X



Şekil 8.7. (Devamı) g)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 2000X, h)ULK kırılma yüzeyi 2000X,



Şekil 8.7. (Devamı) i)TIG Kaynağı kırılma yüzeyi 5000X, j)ULK kırılma yüzeyi 5000X

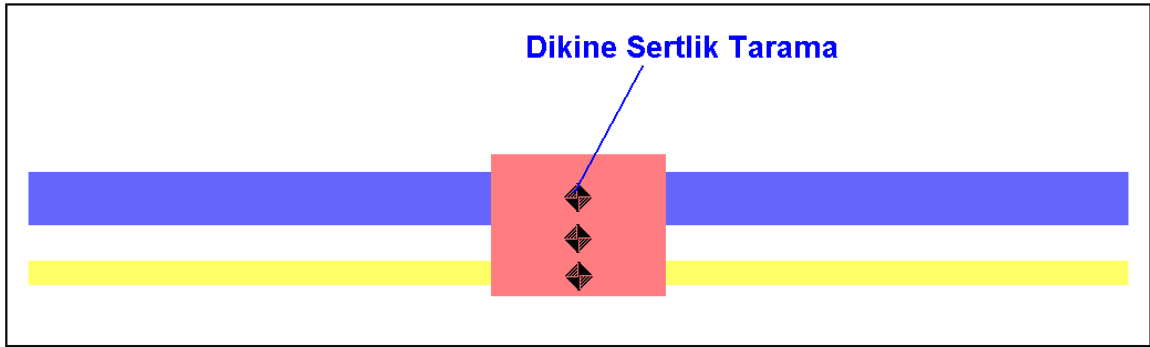
Görüntüler incelendiğinde iki yöntemin yapılar arasında çok büyük farklar oluşturmadığı gözlemlenmektedir. Kaynak dikişinin başına ve sonuna metal testere ile çentik açılmıştır. Çentik açma nedeni kaynaklı birleşmede kırılmanın dikişte gerçekleşmesinin arzu edilmesidir. Kaynak edilmiş parçalar çekiçle hızla kırılmıştır ve böylece ani kırılma elde edilebilmiştir.

İki numunede de gevrek kırılma karakteristiği görülmektedir. Gevrek kırılmanın en büyük nedeni hiç şüphesiz ki kaynak sırasında oluşan iğnesel martenzit yapısıdır. Ancak TIG kaynaklı yapının uzaktan laser kaynaklı yapıya oranla daha sünek (lifli yapı) kırıldığı

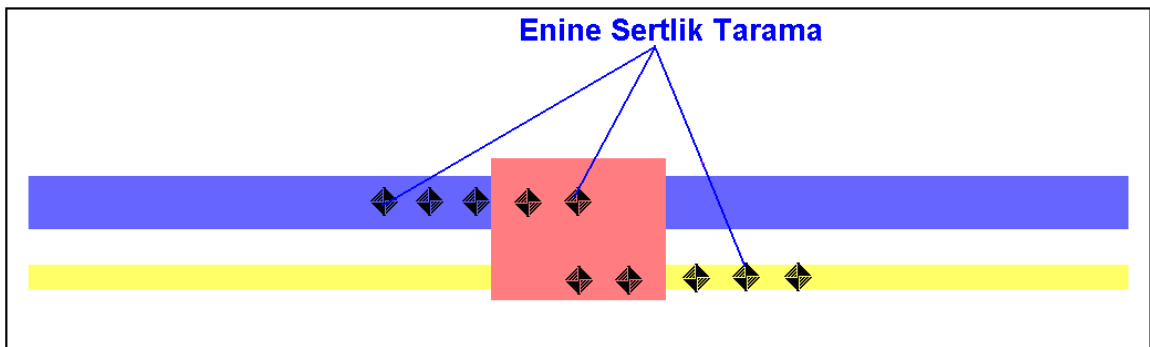
gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırma özellikle Şekil 8.7 c ile Şekil 8.7 d'nin ve Şekil 8.7 e ile Şekil 8.7 f' nin dikkate alınmasıyla yapılmıştır. Kırılma yüzeyinde bulunan lifli yapının aksine pürüzlü (kristalin) olan yapılar daha büyük çekme dayanımına işaret etmektedir. Buradan şu sonuca varılabilir; uzaktan laser kaynaklı yapıyı kırmak için daha küçük enerji ve tokluk söz konusu iken daha yüksek dikiş dayanımı söz konusudur. Bir sonraki başlıkta sunulacak olan sertlik profilleri de bu durumu kanıtlamaktadır.

8.6 Sertlik Profilleri

Kaynaklı numuneler için sertlik taramaları Şekil 7.23'te gösterildiği şekilde yapılmıştır. Aynı sac malzeme için kaynak dikişinin hem sağından hem de solundan ölçüm alınmamıştır. Bunun nedeni malzemenin kaynak dikişinin sağındaki ITAB ile solundaki ITAB'ının aynı yapıda ve dolayısıyla aynı sertliklerde olacağının düşünülmesidir.



Şekil 8.8 Kaynak dikişinin sertliğinin dikine taranması



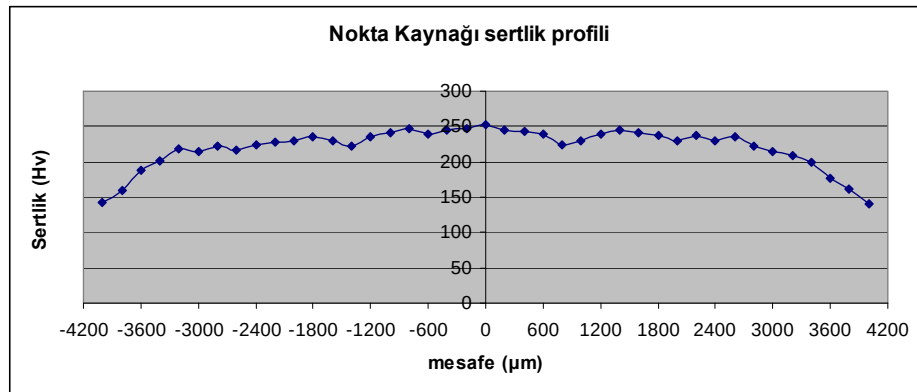
Şekil 8.9 Kaynak dikişinin sertliğinin enine taranması

Kaynak dikişi hem boyuna hem de enine taranmıştır ve değerler mesafe sertlik çizelgelerinde belirtilmiştir (Şek.8.8- Şek.8.9). Ölçüm alınan noktalar arasındaki mesafelerin mümkün olduğunca eşit olması için titizlik gösterilmiştir. Kaynak dikişinin orta noktası 0 noktası

olarak kabul edilmiştir ve sertlikler Vickers sertliği (HV), mesafeler ise (μm) olarak verilmiştir. Grafikler hazırlanırken yatay ve dikey taramanın tutarlı değerleri birleştirilmiş ve tek bir grafikte gösterilmiştir. Nokta kaynağında sadece yatay tarama yapılmıştır.

8.6.1 Nokta Kaynağında Sertlik Dağılımı

Nokta kaynağı mikro yapılarında çok belirgin bir geçiş bölgesi görülmemiştir. Geçiş bir hat şeklindeydi ve bu hat çok dardı. Bu dar alanın etkisi sertlik profilinde de görülmektedir. Akımın akıp geçtiği bölgede ergime ve hızlı katılaşma gerçekleşmiştir. Ana malzemenin on farklı bölgesinden alınan ölçümler sonucunda ortalama malzeme sertliği 142 HV olarak ölçülmüştür. Bu ergime sonrasında oluşan yeni tane yapısı sertliğin kaynak noktasında sertliğinin ortalama 240 HV olmasına neden olmuştur. Akım geçen bölgeden uzaklaşıp ana malzemeye yaklaştıkça sertlik düşmüştür (Şekil 8.10).

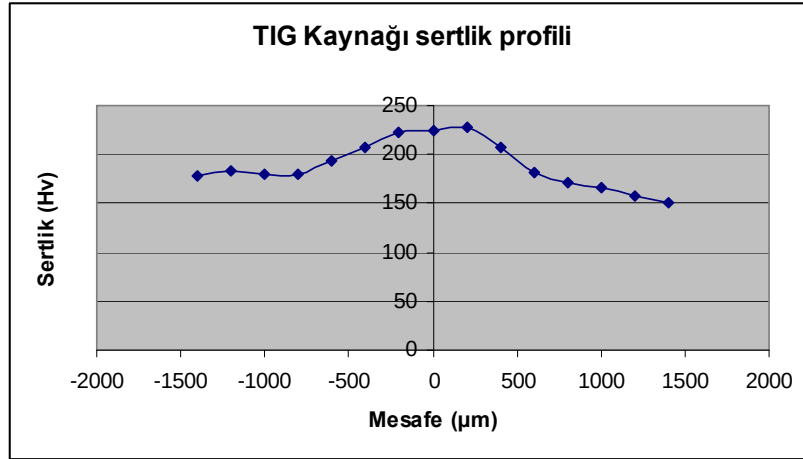


Şekil 8.10 Nokta kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi

Nokta kaynağındaki nokta çapı yaklaşık 7 mm'dir. Nokta çapı aynı zamanda dikiş genişliğidir. Tüm dikişi taramak ve dikiş ile ana malzeme arasındaki farkı ortaya koyabilmek için kaynak bölgesinde 40'a yakın ölçüm yapılmıştır.

8.6.2 TIG Kaynağında Sertlik Dağılımı

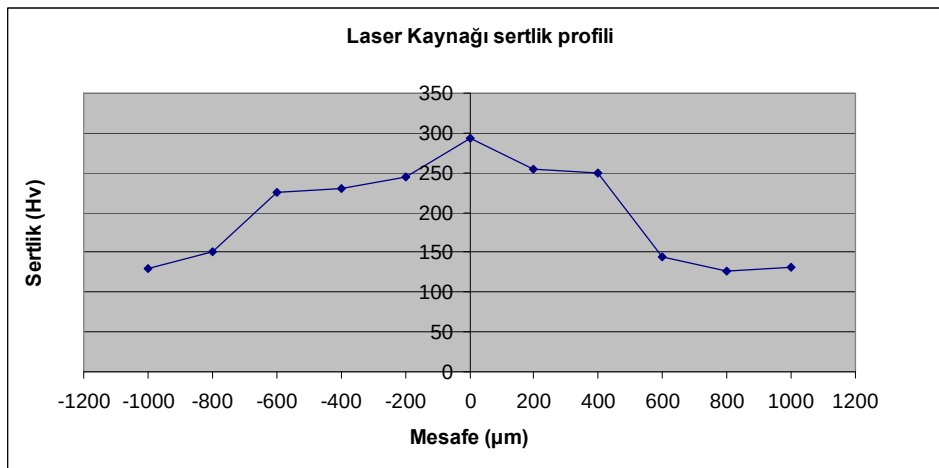
TIG kaynağı buradaki diğer kaynak yöntemlerine göre doğası gereği daha büyük ısı girdisine sahiptir. Şekil 8.4 d, e ve f de görüldüğü gibi kaynak dikişinde oluşan martenzit ve Widmanstätten yapı ile kaynak dikişinde daha yüksek sertlik elde edilmiştir. Kaynak sırasında üstte bulunan sacdaki sertliklerin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir çünkü bu malzeme alttaki malzemeye göre daha hızlı soğumuştur ve başlangıçta aynı sertliğe sahip olan malzemelerin sertlikleri farklılaşmıştır (Şekil 8.11).



Şekil 8.11 TIG kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi

8.6.3 Laser Kaynağında Sertlik Dağılımı

Laser kaynağında odaklama önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır; odaklama ile çok küçük çapta ışın eldesi sağlanarak, birleşme bölgesinde çok dar bir alan ergitilmektedir. Ergitilen bölgenin dar olması sonucunda, laser ışınının malzemede etkidiği bölgeye ısı çok kısa sürede girerek, bu bölgeyi geleneksel yöntemlere göre çok kısa sürede ergitmektedir. Böylece dikiş hızlı ergiyip katılaştığından TIG yöntemine göre dönüşen miktar artmaktadır; sertlikler böylece daha yüksek çıkmaktadır. Ana malzeme sertliği 142 HV iken, kaynak dikişi genişliği yaklaşık 0,30 mm'dir ve sertliği 300 HV'dir. ITAB genişliği ise 0,4 mm'dir ve sertliği de 250 HV'dir

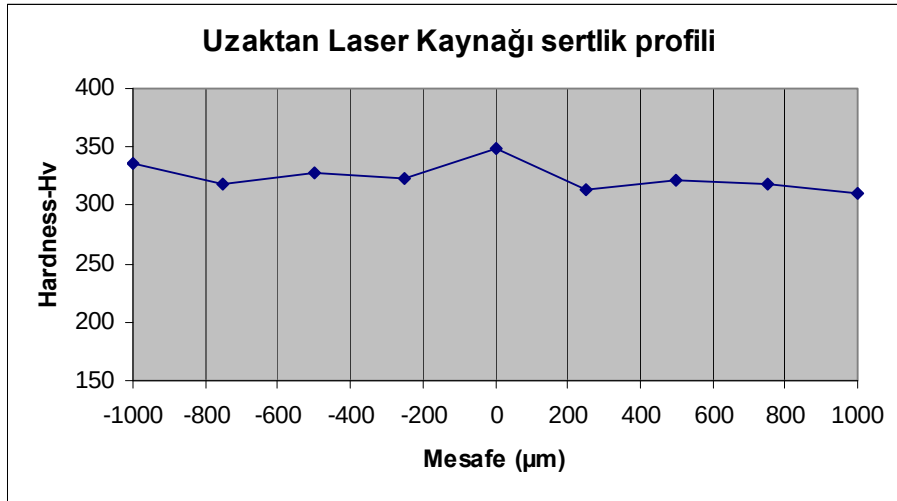


Şekil 8.12 Laser kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi

8.6.4 Uzaktan Laser Kaynağında Sertlik Dağılımı

Geleneksel laser ile kıyaslandığında uzaktan laser ile kaynak edilen malzeme ilginç sonuçlar vermiştir. Ancak sonuçlar otomotiv üreticilerinin soğuk haddeli çelikler için belirlediği sınırlar içerisinde kalmıştır. Otomotiv sektöründe genelde 380 HV'den daha büyük sertlikler gevreklik tehlikesi nedeniyle kabul edilmemektedir. Burada Şekil 8.6 d ve e'ye bakarak tahmin edilen ısı kaçış hızının geleneksel laserdeki ısı kaçış hızından daha küçük olduğu tahmin edilmekteydi ancak sertliklerin yüksek çıkması başka bir parametreyi akla getirmiştir. Bu parametre muhtemelen koruyucu gaz özellikleri olacaktır. Uzaktan laser sisteminde koruyucu gaz kullanılmamıştır. Bunun yerine kaynak edilen parçalar arasında çinko buharının ve plazmanın tahliye edilmesi için 0,3 mm aralık bırakılmıştır.

Uzaktan laser kaynağında oluşan plazma süpürülmediğinden ısı, kaynak bölgesinde daha uzun süre kalmıştır ve ısı ana malzemede daha geniş bir bölgeye yayılmıştır. Isının malzeme ile ilişkide bulunduğu süre uzun olduğundan östenit fazı içerisinde karbon çözünümü daha büyük miktarda olmaktadır ve bunun sonucunda soğuma sırasında oluşan martenzitik dönüşüm daha büyük olmaktadır. Sertlikler tüm yöntemlerden yüksek çıkmaktadır. Kaynak dikişinden 1 mm uzaklaşılması durumunda bile sertlikte bir düşüş görülmemektedir.



Şekil 8.13 Uzaktan laser kaynağında mesafeye göre sertliğin değişimi

9. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Otomotiv sektöründe kullanılan geleneksel yöntemlerle modern yöntemlerin karşılaştırılması için gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında düşük karbonlu soğuk haddeli çelik dört farklı yöntemle kaynak edilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde kaynaklı numunelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri hakkında sonuçlara ulaşılmıştır. Deneysel çalışmada kaynakta kullanılan ana malzemenin özellikleri de kaynak sonrası durumla kıyas yapabilmek için belirlenmiştir.

Çalışmaya ana malzemenin kesilmesi ile başlanmıştır ve malzemenin SEM de incelenebilmesi için metalografik hazırlık yapılmıştır. SEM incelemeleri sonucu sıcak daldırma galvanizleme işlemiyle elde edilen kaplama kalınlığı ve malzemenin içyapısı belirlenmiştir. Kaplama kalınlığının ölçümü kumpas ölçümü ile doğrulanmıştır. Daha sonra ana malzeme sertliği için on adet sertlik alınmıştır.

- Ana malzemenin kimyasal analizi sonucunda C: % 0,102, Mn: % 0,243, P: % 0,0161 ve S: % 0,0224 olduğu ortaya konulmuştur.
- Ana malzeme kaplama kalınlığı 50 μm olarak belirlenmiştir.
- Ana malzeme görüntüsünün SEM incelemesi sonucu yapının α katı çözeltisinden ve tane sınırlarında Fe_3C 'den oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Ana malzemenin ortalama sertliği 142 HV'dir.

Dört farklı yöntemle kaynak edilmiş numunelerin kaynak bölgesinde gerekli incelemeler yapmak için bu bölge mekanik testere kullanılarak çıkartılmıştır. Çıkartılan bölgelerin metalografik hazırlığı yapılarak SEM de incelemeler yapılmıştır ve kaynak bölgesinden sertlikler alınmıştır.

- Kaynak bölgesinin SEM de incelenmesiyle tüm yöntemlerde kaynak dikişinde martenzit ve TIG kaynağında ayrıca Widmanstätten oluşumu görülmüştür.
- Numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde TIG kaynağında daha sünek bir kırılma görülmüştür, sertlik değerleri de bu durumu desteklemektedir. Ancak uzaktan laser kaynağında ortaya çıkan daha kristalin kırılma yüzeyi daha düşük kırılma enerjisine işaret etmektedir.
- TIG kaynağı hariç tüm yöntemlerde maksimum sertlikler kaynak dikişinde elde edilmiştir.

- Uzaktan laser kaynağında da en yüksek sertlikler kaynak dikişinde ortaya çıkmıştır ancak en büyük sertlik değeri diğer yöntemdekilerden farklı olarak 350 HV civarındadır.
- Kaynaklı numunelere ait sertlik profillerinden yola çıkılarak en yüksek sertlik değerlerinin uzaktan laser kaynağında olduğu görülmüştür.
- Sertlik ölçümleri sonucunda ana malzeme sertlik değerlerinden en az sapmanın geleneksel TIG kaynağında olduğu görülmüştür.
- Tüm malzemelerin ITAB'larındaki tane boyutları kaynak dikişine doğru değişim göstermiştir. Kaynak dikişine doğru tane boyutu küçülmektedir.
- En homojen sertlik dağılımı nokta kaynağında gerçekleşmiştir.
- Kaynaklı birleştirmelerin dayanımı oldukça önemlidir; kaynak bölgesindeki dayanımı belirleme doğrultusunda sertlik değerlerine başvurmak mantıklı olacaktır. En yüksek dikiş dayanımı uzaktan laser kaynağında ortaya çıkmıştır. Böylece karakteristik olarak yüksek çekme dayanımı elde edilmektedir.
- Otomotiv sektöründe kaynak bölgesinde 380 HV'den büyük sertlikler gevreklik olasılığından dolayı kabul edilmemektedir. Dört farklı yöntemde de bu açıdan bir problem görülmemiştir.
- Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında uzaktan laser kaynağıyla kaynak edilen malzemelerde yüksek sertlik değerleri işlem sırasında plazmayı süpürecek koruyucu gaz kullanılmamasından kaynaklanmış olabilir.
- Koruyucu gaz kullanılmaması kaynak bölgesinde oksitlenme ihtimalini düşündürmektedir. Ancak mikroyapıda oksit'e rastlanmamıştır. Muhtemel neden; ısıнын geniş bir bölgeye yayılması sonucu östenit içerisinde karbon atomlarının yayılım için bol vakit bulabilmesi sonucu diğer yöntemlere göre daha büyük miktarda martenzit dönüşümü olmasıdır.

Bu çalışma ile otomotiv sektörü için en uygun kaynak yönteminin ve parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüksek üretim hızları ve kaynak parametreleri limitlerinden dışarı çıkılmaması nedeniyle geleneksel laser ve uzaktan laser kaynağı ön plana çıkmaktadır. Uzaktan laserin avantajı yüksek işlem esnekliği yanında yüksek dayanımlı kaynak dikişleri üretmesidir. Bunların yanında sertliğin homojen dağıldığı nokta kaynağı da otomotiv sektörü için hala çok elverişlidir. Uzaktan laser kaynağı en yüksek üretim hızını verdiğinden farklı parametreler ile tasarlandığında daha iyi sonuçlar verebilir. Muhtemel iyileşmeler aşağıda

verilen maddelerle sağlanabilir;

1. Uzaktan laser kaynağında da koruyucu Ar gazı kullanılabilir, böylece kaynak verimliliği artacaktır.
2. Numunelere uygulanan uzaktan laser kaynağında sertlikler yüksek çıktığından güç yoğunluğu geleneksel laser seviyesine çekilebilir. Bu düzeltme odaklamada değişikliğe gidilerek yapılabilir.
3. Gerekli görüldüğünde, uzaktan laser kaynağında aynı güç değeri için ışın çapı büyütülebilir.
4. Parametreler değiştirilmeden koruyucu gaz ortamında veya koruyucu gaz olmayan ortamda, laser ilerleme hızı arttırılarak ısı girdisi düşürülebilir ve daha düşük sertlikler elde edilebilir.

Elde edilen sertlik değerleri, araç gövdesi boyanmadan önceki değerleri temsil etmektedir. Boya pişirme sıcaklığı ve süresi sayesinde kaynak bölgesi tavlanarak sertliklerde düşme görülebilir.

KAYNAKLAR

- Alim, M., (1998), “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelikler”, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Bitirme Tezi; 2-10
- Anık, S., (1973), Kaynak Tekniği Cilt I-Oksi-Asetilen ve Elektrik Ark Kaynağı, İTÜ Matbaası, 960, İstanbul; 16-22
- Anık, S., (1975), Kaynak Tekniği Cilt III-Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti, İTÜ Matbaası, 1030, İstanbul; 1-15
- Anık, S., (1991), Kaynak Tekniği El Kitabı: Yöntemler ve Donanımlar, Gedik Holding, İstanbul; 10-14,125-126
- Askeland, D., R. ve Phule, P., P., (2004), Essentials of Materials Science and Engineering, Thomson, Ontario, Canada; 401-402
- Baggerud, A., (1966), Kaynak Metallurjisi-Çelikler İçin (Çev., S., Anık, K., Tülbentçi), İskender Matbaası, 670, İstanbul; 80-87
- Chang, I.,S., (2007), “ Progress with Hyundai Production Technology Remote Welding Systems”, European Automotive Laser Applications, 30-31 Jan. 2007, Frankfurt
- Çiğdem, M., İmal Usülleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul; 176-181,208-212
- Dawes, C., (1992), Laser Welding: A Practical Guide, Abington Publishing, Cambridge;16-18
- Degarmo, P.E., Black J.T. ve Kohser R.A., (1997), Materials and Process in Manufacturing, 8. edition, Wiley, New York; 130-131
- Dikicioğlu, A., (2006), Kaynaklı İmalat ve Tasarım, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Mak 418 Ders Notları; 7-13
- Erhardt, K.M., Heine, A. ve Prommersberger, H., (1993), Laser in der Materialbearbeitung, Vogel Buchverlag, ISBN: 3-8023-0480-2, S;201-204
- Fenton, J., (1996), Handbook of Vehicle Design and Analysis, SAE and Mechanical Engineering Publications, London; 199-200
- Gönül, T., (2001), “Otomotiv Sanayinde Kullanılan Önemli Dökme Demir Parçaları”, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, Bitirme Tezi; 30-76
- Metals Handbook, (1993), Volume 6, Welding Brazing and Soldering, ISBN 0-87170-377-7(V.1), USA; 692-708, 708-721, 879-893, 1042-1043
- Metals Handbook, (2004), Volume 9, Metallography and Microstructures, ISBN 0-87170-706-3 USA; 1438-1440
- Özdemir T., (2001), “Otomotiv Endüstrisinin Gelişim Sürecinde Metalurji Mühendisliği”, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, Bitirme Tezi; 32-48
- Özsoy, M. ve Kaluç, E., (2002), “Sürtünen Eleman İle Birleştirme Kaynağının Esasları”, Mühendis ve Makine, Sayı:513
- Samuels, L., E., (1999), Light Microscopy of Carbon Steels, ISBN 0871706555, 9780871706553 ASM International; 58-59
- Smith, W., F., (2001), Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Çev. N., G., Kınıkoğlu), Literatür Yayıncılık, İstanbul;11-12
- Tarui,T., Hasegawa, T. ve Mori, K., (2007), “ Latest Laser Welding Applications for Nissan Body in White”, European Automotive Laser Applications, 30-31 Jan. 2007, Frankfurt
- Tepeli, S., (2005), Otomotiv Sektöründe Kullanılan Metalik Malzemeler, Y.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Proje; 24-25

- Tsoukantas, G. ve Chryssolouris, G., (2006), “Theoretical And Experimental Analysis Of The Remote Welding Process On Thin Lap-Joined AISI 304 Sheets”, Springer, 35:9-10
- Tsoukantas, G., Salonitis, K., Stournaras A., Stavropoulos, P. ve Chryssolouris, G., (2007), “On Optical Design Limitations of Generalized Two-Mirror Remote Beam Delivery Laser Systems: The Case of Remote Welding”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 32:932-941
- Vasilash. G. S., (2002) “Remote Laser Welding: A Few Things To Know - Produce - Effects On Retooling”, Automotive Design & Production, Oct 2002
- Vural, M., (2008), İmal Usülleri, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Mak 351 Ders Notları; 5-23
- Yadeli, Z., N., (2005), Otomotiv Sektöründe Kullanılan Plastik Malzemeler, Y.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Proje; 9-28
- Yeşildal, C., ve Karaaslan, A., (2007), “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Katı Hal Kaynak Yöntemleri”, MetalurjiMalzeme, Sayı:11
- Yumurtacı, S. ve Mert. T., (2003), “Robotik Kaynak Sistemleri ve Gelişme İstikametleri”, Mühendis ve Makine, Sayı:526

İNTERNET KAYNAKLARI

- www.aluminium.matter.org.uk
- www.cetic.be
- www.chaneyelectronics.com
- www.ckworldwide.com
- www.longevity-inc.com
- www.matter.org.uk
- www.m-osaka.com
- www.oerlikon.com.tr
- www.robot-welding.com
- www.rofin.com
- www.steeluniversity.org
- www.subtech.com
- www.thyssenkrupp-steel.com
- www.twi.co.uk
- www.weldingengineer.com
- www.worldautosteel.org

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı Caner Yeşildal

Doğum tarihi 28.05.1981

Doğum yeri Samsun

Lise 1992-1999 Samsun Anadolu Lisesi

Lisans 2000-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi
Kimya Metalurji Fakültesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005 -2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı,
Malzeme Programı