

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KORUYUCU GAZ KAYNAĞINDA BİRİM DİKİŞ
ENERJİSİ – ISI ETKİSİ ALTINDAKİ ALAN
İLİŞKİSİNİN İNCELENMESİ**

Makine Mühendisi Oktay ŞAHİN

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Nurullah GÜLTEKİN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK İŞLEMİNİN TANIMI TARİHSEL GELİŞİMİ	3
2.1 Kaynağın Tanımı	3
2.2 Kaynak İşleminin Tarihsel Gelişimi	3
2.3 Kaynağın Sınıflandırılması	6
3. KORUYUCU GAZ KAYNAĞI VE YÖNTEMLERİ	9
3.1 Ergimeyen Elektrodla Yapılan Gazaltı Kaynak Yöntemleri	9
3.1.1 Tungsten İnert Gaz Kaynak Yöntemi (TIG)	9
3.1.1.1 TIG Kaynak Donanımı	11
3.1.1.2 TIG Kaynak Elektrodları	12
3.1.1.3 TIG Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gazlar	13
3.1.2 Ark Atom Kaynağı	13
3.2 Ergiyen Elektrodla Yapılan Gazaltı Kaynak Yöntemleri	15
3.2.1 Metal Asal Gaz Kaynağı (MIG) ve Metal Aktif Gaz Kaynağı (MAG)	15
3.2.1.1 MIG-MAG Kaynak Donanımı	15
3.2.1.2 MIG - MAG Yönteminde Kullanılan Tel Elektrodlar	16
3.2.1.3 MIG - MAG Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gazlar	17
4. GAZALTI KAYNAK YÖNTEMLERİNDE ISI GİRDİSİ	19
4.1 Isı Girdisinin Ölçülmesi	19
4.2 Isı Girdisini Etkileyen Temel Faktörler	20
4.2.1 Kaynak Akımı	20
4.2.2 Kaynak Gerilimi	22
4.2.3 Kaynak Hızı	25
4.2.4 Kullanılan Yöntemin Verimi	27
4.3 Isı Girdisini Etkileyen Diğer Faktörler	30
4.3.1 Koruyucu Gazların Etkileri	30
4.3.1.1 Argon	30
4.3.1.2 Helyum	31
4.3.1.3 Karbondioksit	31

4.3.1.4	Karışım Gazlar.....	31
4.3.2	Kutuplamanın Etkisi	33
4.3.3	Kaynak Metali Transfer Tipinin Etkisi	34
4.3.3.1	Kısa Devre İletim (Kısa Ark)	34
4.3.3.2	İri Damla İletimi (Uzun Ark).....	35
4.3.3.3	Sprey İletimi	37
4.3.4	Serbest Elektrot Uzunluğunun Etkisi	40
4.3.5	Elektrot Açılarının Etkisi	40
4.4	Isı Girdisi ile Kaynak Bölgesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	43
4.4.1	Isı Girdisiyle Kaynak Boyutunun Arasındaki İlişkinin İncelenmesi.....	43
4.4.2	Isı Girdisiyle Soğuma Hızı Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	44
4.4.3	Isı Girdisi ile Tepe Sıcaklığı Arasındaki İlişkinin İncelenmesi.....	45
4.4.4	Isı Girdisiyle Kaynak Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	47
4.4.5	Isı Girdisiyle Kaynak Kalitesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	49
5.	GAZALTI KAYNAK YÖNTEMLERİNDE KAYNAK BÖLGESİNİN İNCELENMESİ.....	51
5.1	Erime Bölgesi (Kaynak Metali).....	51
5.1.1	Katılma	52
5.2	Geçiş Bölgesi	54
5.3	Esas Metal.....	54
5.4	Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	55
5.4.1	Alaşımli Malzemelerde ITAB	57
5.4.2	Soğuk Şekil Değiştirme Uygulanmış Malzemelerde ITAB	59
5.4.3	Çökelme Sertleştirilmesi Uygulanmış Malzemelerde ITAB	60
5.4.4	Dönüşme ile Sertleştirilmiş Malzemelerde ITAB	62
5.4.4.1	İri Taneli Bölge.....	62
5.4.4.2	İnce Taneli Bölge.....	63
5.4.4.3	Kısmen Dönüşmüş Bölge	63
5.4.4.4	Temperlenmiş Bölge.....	64
5.4.5	Soğuma Hızının ITAB'a Etkisi	65
5.4.6	Isının Tesiri Altında Kalan Bölgedeki Isıl Çevrimler	68
5.4.7	Isı Tesiri Altındaki Bölgenin Genişliğinin Hesaplanması	69
5.4.8	Isı Tesiri Altındaki Bölgenin Genişliğinin Hesaplanmasında Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	73
5.4.8.1	Malzeme Ergime Sıcaklığı (T _m)	73
5.4.8.2	Malzemenin Özgül Isınma Isısı	74
5.4.8.3	Malzemenin Isı İletim Katsayısı.....	75
5.4.8.4	Malzemenin Kalınlığı	78
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	79
6.1	Deney Numunelerinin Kaynak İşlemine Hazırlanması	79
6.2	Deney Numunelerine V Kaynak Ağzı Açılması ve Kaynak Aparatlarının, Talaşlı İşlemle Hazır Hale Getirilmesi	80
6.3	Kaynak İşleminin Gerçekleştirilmesi	82
6.4	Kaynak Sonrası Numunelerin Hazırlanması	82
6.5	St37 Numunelerin Kaynak İşlemleri	83
6.5.1	40° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı.....	84
6.5.1.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı.....	84

6.5.1.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	85
6.5.1.3	Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri	86
6.5.1.4	40° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	87
6.5.2	45° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı	89
6.5.2.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	90
6.5.2.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	90
6.5.2.3	Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri	92
6.5.2.4	45° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	93
6.5.3	50° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı	94
6.5.3.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	95
6.5.3.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	95
6.5.3.3	Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri	97
6.5.3.4	50° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	98
6.5.4	55° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı	99
6.5.4.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	100
6.5.4.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	100
6.5.4.3	Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri	102
6.5.4.4	55° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	103
6.5.5	60° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı	104
6.5.5.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	105
6.5.5.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	105
6.5.5.3	Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri	107
6.5.5.4	60° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	108
6.6	Kaynak Açıklarına Göre St37 Numunelerin Nüfuziyetlerinin Karşılaştırılması	109
6.7	AlMgZn Numunelerin Kaynak İşlemleri	111
6.7.1	40° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı	112
6.7.1.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	112
6.7.1.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	112
6.7.1.3	40° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	113
6.7.2	45° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı	115
6.7.2.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	116
6.7.2.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	116
6.7.2.3	45° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	117
6.7.3	50° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı	119
6.7.3.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı	119
6.7.3.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	119
6.7.3.3	50° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	120

6.7.4	55° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı	122
6.7.4.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı.....	122
6.7.4.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	122
6.7.4.3	55° Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	123
6.7.5	60° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı	125
6.7.5.1	Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı.....	125
6.7.5.2	Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı	125
6.7.5.3	60° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi	126
6.8	Kaynak Uygulamalarında Meydana Gelen Hatalar ve Nedenleri	128
7.	SONUÇLAR.....	131
KAYNAKLAR.....		134
ÖZGEÇMİŞ.....		136

SİMGE LİSTESİ

c_m	Malzemenin özgül ısınma ısısı
c_s	Suyun özısı katsayısı
d	Elektrot çapı
G	Bir metre kaynak dikişi başına kg olarak yığılan kaynak metali
H	Isı girdisi
h	Yığılma verimi
I	Akım
m_m	Ergitilen malzeme kütlesi
m_s	Birim zamanda boru içinden geçen suyun kütlesi
ρc_m	Volumetrik özgül ısı
ρ	Malzemenin yoğunluğu
R	Soğuma hızı
q	Birim dikiş enerjisi
Q	Isı girdisi
Q_m	Malzemeyi ergitmek için gerekli ısı miktarı
t	Malzeme kalınlığı
T_m	Malzemenin ergime sıcaklığı
T_o	Malzemenin ilk sıcaklığı
$T_{\text{ön}}$	Ön tavlama sıcaklığı
T_p	Tepe sıcaklığı
U	Ark gerilimi
V_e	Elektrot besleme hızı
V_k	Kaynak hızı
W	Kaynak dikişi genişliği
Y	Ergime sınırından uzaklık
η	Verim katsayısı
ΔT_m	Malzemenin ortam ile ergime sıcaklığı arasındaki fark
ΔT_s	Giriş ve çıkıştaki suyun sıcaklık farkı

KISALTMA LİSTESİ

BS	British Standards
EN	European Norms
DAEN	Doğru Akım Negatif Kutuplama
DAEP	Doğru Akım Elektrot Pozitif Kutuplama
FGHAZ	Kısmen Dönüşmüş İnce Taneli Isı Tesir Bölgesi
HAZ	Heat Affected Zone
HSLA	High Strength Low Alloy Steel
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
LBZ	Localized Brittle Zones
M.Ö.	Milattan Önce
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
PMP	Pülverize Metal Püskürtme
RHZ	Yeniden Tavlı Bölge
RHZ _w	Yeniden Tavlı Bölge Ara Paso
TIG	Tungsten Inert Gas
TS	Türk Standardı
WIG	Wolfram Inert Gas

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Silindirik parçalarda TIG kaynak uygulaması.....	10
Şekil 3.2 Dolgu metali kullanarak TIG kaynak uygulaması	10
Şekil 3.3 Ark uzunluğu ile kaynak dikiş genişliği ilişkisi	11
Şekil 3.4 TIG kaynak donanımı blok şeması.....	11
Şekil 3.5 Çeşitli TIG kaynak elektrot tipleri	12
Şekil 3.6 Ark - Atom kaynağının esası.....	14
Şekil 3.7 Ortam sıcaklığı ile hidrojen disosiasyon oranı arasındaki ilişki.....	14
Şekil 3.8 MIG kaynak yönteminde ark bölgesi	15
Şekil 3.9 MIG - MAG Kaynak donanımı	16
Şekil 4.1 Akım şiddetinin kaynak dikişinin biçim ve boyutlarına etkisi.....	21
Şekil 4.2 Kaynak akımının ergime oranına etkisi.....	21
Şekil 4.3 Akım yoğunluğunun ergime oranına etkisi	22
Şekil 4.4 Ark geriliminin kaynak dikişinin biçim ve boyutlarına etkisi.....	23
Şekil 4.5 Kaynak gerilimi – ergime oranı ilişkisi.....	24
Şekil 4.6 Kaynak geriliminin koruyucu gaz ile değişimi	24
Şekil 4.7 Kaynak hızının, kaynak dikişinin biçim ve boyutlarına etkisi	25
Şekil 4.8 Kaynak hızının kaynak dikişine etkisi.....	26
Şekil 4.9 Ergimeyen elektrotla kaynak işlemi esnasındaki enerji dağılımı	28
Şekil 4.10 Islak kalorimetre.....	29
Şekil 4.11 Soğuk kalorimetre	29
Şekil 4.12 Çeşitli koruyucu gazların dikişe etkileri.....	33
Şekil 4.13 Kısa devre metal iletimi	35
Şekil 4.14 Eksenel olmayan iri damla iletimi.....	36
Şekil 4.15 Eksenel spreyletilimi	37
Şekil 4.16 Damla iletim hızının ve damla hacminin kaynak akımıyla değişimi	38
Şekil 4.17 Serbest tel uzunluğunun dikiş formuna etkisi	40
Şekil 4.18 Hareket ve çalışma düzlemleri ve elektrot açıları	41
Şekil 4.19 Elektrot açısının ve kaynak tekniğinin etkileri.....	42
Şekil 4.20 İçköşe kaynakları için normal çalışma açısı.....	42
Şekil 4.21 Ergime çizgisinden uzaklaştıkça tepe sıcaklığında meydana gelen değişim.	46
Şekil 4.22 13 mm kalınlığındaki çelik bir levhada ITAB'da sıcaklık dağılımları	47
Şekil 4.22 Ark kaynağında ısı girdisinin soğuma hızına etkisi	49
Şekil 4.23 Gazaltı kaynağıyla farklı ısı girdileri kullanılarak kaynaklanmış iki numunenin mikroyapılarının karşılaştırılması.....	50
Şekil 4.24 Isı girdisinin gerilme dayanımına etkisi	50
Şekil 5.1 Bir kaynak bölgesinin çeşitli kısımları.....	51
Şekil 5.2 Çok pasolu kaynakta kaynak metalinde esas metal oranının değişimi;	52
Şekil 5.3 Yüzeysel ve derin bir kaynağa ait sütunlu tane yapısı;	54
Şekil 5.4 Tek paso ile kaynatılmış HSLA çeliğinde oluşan ısıdan etkilenmiş bölgenin demir – karbon (Fe_3C) diyagramı ile birlikte şematik görünüşü.....	55
Şekil 5.5 Çok pasolu bir kaynakta kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bölgelerde var olan tekrar ısıtılmış bölgelerin şematik gösterimi.....	56
Şekil 5.6 LBZ'yi (localized brittle zones) oluşturan farklı bölgelerin şematik gösterimi	57
Şekil 5.7 Soğuk şekillendirilmiş metallerde kaynaklı bölgeye komşu alanlarda yeniden kristalleşme durumu.....	59
Şekil 5.9 Çökeltme (presipitasyon) ile sertleştirilen alaşımların ısı tesiri altındaki bölgesinde oluşan alanlar	61
Şekil 5.10 Isının tesiri altında kalan bölgedeki soğuma hızı ile ısı miktarı arasındaki bağıntı	69
Şekil 5.11 ITAB'ı oluşturan bölgelerin şematik gösterimi.....	72

Şekil 6.1 Alüminyum ve alaşımlarının gazaltı kaynağında uygun kaynak ağızları (TS EN ISO 9692 – 3).	80
Şekil 6.3 Kaynak öncesi kaynağa hazırlanmış numune örneği	82
Şekil 6.4 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.	87
Şekil 6.5 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	88
Şekil 6.6 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.	89
Şekil 6.7 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.	92
Şekil 6.8 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	93
Şekil 6.9 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.	94
Şekil 6.10 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.	97
Şekil 6.11 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	98
Şekil 6.12 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.	99
Şekil 6.13 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.	102
Şekil 6.14 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	103
Şekil 6.15 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.	104
Şekil 6.16 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.	107
Şekil 6.17 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	108
Şekil 6.18 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.	109
Şekil 6.19 Kaynak edilmiş St37 numunelerin nüfuziyetlerinin karşılaştırılması.	110
Şekil 6.20 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	114
Şekil 6.22 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	117
Şekil 6.24 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	121
Şekil 6.26 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	124
Şekil 6.28 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.	127
Şekil 6.19 Kaynak edilmiş AlMgZn numunelerin nüfuziyetlerinin karşılaştırılması.	129

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Kaynak teknolojisinde kullanılan yöntemlerin tarihsel gelişimine toplu bakış	5
Çizelge 3.1 TIG kaynağında elektrot çapı kaynak akımı ilişkisi.....	12
Çizelge 3.2 Çeşitli metallerin TIG kaynağı için önerilen koruyucu gazlar	13
Çizelge 3.3 Endüstride kullanılan gazlar	18
Çizelge 4.1 Gazaltı kaynak yöntemlerinde verim katsayıları.....	28
Çizelge 4.2 Çeşitli elektrot tipleri için iri damladan spreye geçiş akımları.....	39
Çizelge 4.3 MIG - MAG kaynağında kaynak parametrelerinin dikiş boyutlarına etkisi	44
Çizelge 4.4 Artan ısı girdisinin malzeme özellikleri üzerine etkisi.....	48
Çizelge 5.1 Çeşitli metal ve alaşımlarının ergime sıcaklıkları	74
Çizelge 5.2 Çeşitli elementlerin özgül ısınma ısıları.....	75
Çizelge 5.3 Çeşitli metal ve alaşımların ısı iletim katsayıları	77
Çizelge 6.1 AlMgZn Alaşımı kimyasal bileşimi.	79
Çizelge 6.2 St37 Kimyasal bileşimi.	79
Çizelge 6.3 St37 Malzeme özellikleri.....	83
Çizelge 6.4 St37 Kimyasal içeriği.	84
Çizelge 6.5 Kaynak elektrodu kimyasal içeriği.....	84
Çizelge 6.6 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.	84
Çizelge 6.7 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	86
Çizelge 6.8 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.....	87
Çizelge 6.9 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.....	88
Çizelge 6.10 St37 Numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.....	89
Çizelge 6.11 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	91
Çizelge 6.12 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.....	92
Çizelge 6.13 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.....	93
Çizelge 6.14 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.	94
Çizelge 6.15 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	96
Çizelge 6.16 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.....	97
Çizelge 6.17 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.....	98
Çizelge 6.18 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.	99
Çizelge 6.19 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri....	101
Çizelge 6.21 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.....	103
Çizelge 6.22 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.	104
Çizelge 6.23 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri....	106
Çizelge 6.24 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.....	107
Çizelge 6.25 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.....	108
Çizelge 6.26 AlMgZn Malzeme özellikleri.....	111
Çizelge 6.27 AlMgZn Alaşımı kimyasal içeriği.....	111
Çizelge 6.28 Kaynak elektrodu kimyasal içeriği KOBATEK MIG ALSI 5.....	112
Çizelge 6.29 40° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.....	112
Çizelge 6.30 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	113
Çizelge 6.31 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.....	114
Çizelge 6.32 45° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.....	115
Çizelge 6.33 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	117
Çizelge 6.34 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama	

sonuçları.....	118
Çizelge 6.35 50° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.....	119
Çizelge 6.36 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	120
Çizelge 6.37 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.....	121
Çizelge 6.38 55° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.....	122
Çizelge 6.39 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	123
Çizelge 6.40 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.....	124
Çizelge 6.41 60° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.....	125
Çizelge 6.42 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.....	126
Çizelge 6.43 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.....	127

ÖNSÖZ

Koruyucu gaz kaynak yöntemleri son 20 yıl içerisinde gelişmiş olup, çeşitli üstünlüklerinden dolayı endüstriyel alanda geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır.

Kaynakla birleştirme yöntemi imalat sektöründe geniş bir uygulama alanına sahip olan bir üretim metodudur. Her yöntemde olduğu gibi, teknolojiye meydana gelen gelişmelerden kaynak yöntemi de olumlu olarak etkilenmektedir. Buna rağmen kaynak yönteminde uygulamada meydana gelen sakıncalar tam olarak giderilememiştir. Bu sakıncalardan birisi de kaynak sonrası ITAB bölgesinde meydana gelen oluşumlardır.

Yapılan bu çalışmada koruyucu gaz kaynağında birim dikiş enerjisi ile ITAB arasındaki ilişki teori ve uygulama yönünden incelenmiş ve ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasının, koruyucu gaz kaynağında ITAB’da meydana gelen oluşumlarla ilgili olarak, bundan sonra bu konu hakkında yapılacak diğer çalışmalara yol göstereceğini düşünüyorum.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca danışmanlığımı yapan ve çalışmalarım esnasında her zaman yanımda olup, beni destekleyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Nurullah GÜLTEKİN’e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI’ya teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım benden yardımını esirgemeyen dostum Mak. Yük. Müh. Emir İNÇAL’a ve İnçal Müh. A. Ş. çalışanlarına teşekkür ederim. Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı’ndaki mesai arkadaşlarıma bilgi, tecrübe, destek ve sabırlarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın büyük bir bölümünde yanımda olan ve beni destekleyen aileme ve kadim dostum Anıl ÖNAL’a saygılarımı sunarım.

Ve sevgili arkadaşım N. Sevgi YALÇIN’a, desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

ÖZET

Her yöntemde olduğu gibi, teknolojide meydana gelen gelişmelerden kaynak yöntemi de olumlu olarak etkilenmektedir. Buna rağmen imal edilen parça ve malzeme türlerinin çeşitlenmesi, kaynak yöntemlerinde de uygulamalarda meydana gelen sakıncaların araştırma konusu olma durumunu korumaktadır. Bu sorunlardan birisi de kaynak sonrası ITAB bölgesinde meydana gelen oluşumlardır.

İmalat sanayiinde geniş bir uygulama alanı bulunan kaynak yöntemi kendi içerisinde de birçok yöneme ayrılmaktadır. Bu yöntemler arasında en önde gelenlerden birisi de uygulamada sağladığı çeşitli üstünlük ve kolaylıklardan ötürü koruyucu gaz kaynak yöntemidir.

Bu çalışmada, koruyucu gaz kaynağında birim dikiş enerjisi ile ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmanın ilk safhasında genel itibariyle koruyucu gaz kaynak yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bunu takip eden bölümlerde de ITAB'ın yapısı ve ITAB'ta kaynak sonrası meydana gelebilecek oluşumlar hakkında literatür taramasından elde edilen bilgilere yer verilmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmında 60°, 55°, 50°, 45°, 40° olmak üzere V kaynak ağızları açılan 200x160x15 boyutlarındaki St37 numunelere MAG ve AlMgZn numunelere MIG kaynak yöntemi uygulanmıştır. Kaynak sonrası numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda ITAB bölgesinin genişliği, kaynak bölgesinin sertliği ve en iyi nüfuziyetin elde edildiği V kaynak ağız tipi tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinin sertliği Vickers mikrosertlik cihazında yapılan ölçümler sonucunda, ITAB genişlikleri kumpasla yapılan ölçümler neticesinde, nüfuziyet ise numunelerin makro resimlerinden faydalanarak belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda, St37 numunelerin teorik uygulama aşamasında hesaplanan ITAB genişliklerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. AlMgZn numunelerin ise ITAB genişlikleri ölçülemediğinden böyle bir karşılaştırma yapılamamıştır. Numunelerin sertliklerine bakıldığında ise teoride öngörülen sonuçlarla deneysel uygulama sonucunda elde edilen sonuçlar büyük bir oranla örtüşmekte olduğu görülmüştür. Tez çalışması, teorik araştırma ve deneysel uygulama sonuçlarının karşılaştırılması ile sonuçlandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: ITAB, birim dikiş enerjisi, MIG, MAG, St37, AlMgZn.

ABSTRACT

Welding processes have been also affected positively by technological developments as all engineering processes. However in practice, due to the variety manufactured materials and material types, problems occurred during welding processes have been still investigated. One of the problems is the occurrence of formations on the heat affected zone after welding process.

Welding process which has wide range of application in manufacturing industry consists of several methods. One of the premier methods is the Gas Metal Arc Welding process because of its provision of several advantages and facilities in practice.

In this study, the relation between heat input and heat affected zone for gas metal arc welding process is analyzed. In the first stage of the study, gas metal arc welding processes are defined generally. In the following stages, information provided from the literature about the structure of heat affected zone and probable occurrence of the formations on the heat affected zone after welding process are presented.

In the experimental part of the study, the V welding edge of 60°, 55°, 50°, 45°, 40° were implemented respectively for St37 and AlMgZn samples with the dimensions of 200x160x15 mm. MAG (Metal Active Gas) welding process was applied to St37 sample and MIG (Metal Inert Gas) welding process was applied to AlMgZn sample. After the implementation of welding process on these samples, the width of heat affected zone, the hardness of heat affected zone and the most feasible V welding edge that provides the best penetration were determined. The hardness of welding zone was measured by Micro Vickers Hardness Tester. The widths of the heat affected zones were measured by vernier calipers and the penetration was determined by the macro aspects of the samples.

Finally the results obtained from the experimental study were compared with the theoretical calculations. It is seen that the width of heat affected zone of St37 sample obtained from the experiment is relatively similar to the result obtained from the calculations. The width of heat affected zone of AlMgZn samples could not be measured so comparison could not be made for these samples. It is observed that the hardness of the samples obtained from the experiments is relatively similar to the predicted values in the theory. Consequently in this thesis the theoretical and experimental results are compared.

Keywords: HAZ, heat input, MIG, MAG, St37, AlMgZn

1. GİRİŞ

Kaynak, birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini birden kullanarak, aynı türden bir malzeme katarak veya katmadan yapılan birleştirme işlemidir.

Koruyucu gaz kaynağı günümüz endüstrisinde ülkemizde ve dünyada çok yaygın olarak kullanılmakta olan bir kaynaklı birleştirme türüdür. Prosesin, diğer kaynak yöntemlerine göre kullanım ve maliyetler yönünden avantajlı oluşu yöntemin bu denli kullanılmasına neden olmuştur.

Gazaltı kaynağında iyi bir kaynak dikişi elde edebilmek için proses parametrelerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Proses parametrelerinin uygun seçilmesi kaynak için yeterli ve kontrol altında tutulabilecek bir ısı girdisi eldesini mümkün kılar. Isı girdisinin en önemli karakteristik özelliği soğuma hızını kontrol ederek ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinin mikroyapısını belirlemesidir. Kaynak mikroyapısında meydana gelen değişiklikler kaynaklı yapının mekanik özellikleri üzerine direkt etki etmektedir. Bu yüzden ark kaynak yöntemlerinde kaynak kalitesini belli bir seviyede tutmak ve kaynaklı bölgedeki riskleri azaltabilmek için, ısı girdisini kontrol altında tutmak gerekmektedir. Kaynak bölgesine gereğinden fazla ısının sevk edilmesi, kaynak banyosunun büyümesine dolayısıyla ITAB'ın büyümesine, distorsiyonun artmasına ve dayanımın düşmesine neden olacaktır. Bu da başarısız bir kaynak dikişi oluşması anlamına gelmektedir.

Isı girdisini kontrol edebilmek için ısı girdisine etki eden faktörleri ve etkilerini bilmek gerekmektedir. Aşağıda ısı girdisine etki eden faktörler verilmektedir.

Kaynak dikişinin yeterli miktarda ısı girdisi ile oluşturulması gerekmektedir. Kaynak dikişinin oluşumunda yetersiz enerji kullanımı durumunda istenilen ergime sağlanamayacak dolayısıyla bu da dikişin zayıf olmasına neden olacaktır. Gereğinden fazla dikiş enerjisi ise daha büyük bir ITAB genişliğine dolayısıyla daha riskli bir kaynak yapısına neden olacaktır.

Isı girdisini kontrol altında tutabilmemiz için öncelikli olarak ısı girdisine dolayısıyla birim dikiş enerjisine etki eden parametreleri ve bunların ısı girdisine etkilerinin bilinmesi gerekmektedir.

Kaynak dikişini elde etmek için kullandığımız birim dikiş enerjisi miktarını ayarlayarak ITAB genişliğini kontrol edilmesi ve ITAB'da oluşacak yapıların önceden tahmin edilmesi mümkündür. Bunun için yapılması gereken tek şey optimum kaynak parametrelerini

seçmektir. Yapılan bu çalışma ve benzeri çalışmalar uygulayıcıya bu gibi durumlarda yardımcı olacaktır.

Isı girdisine etki eden faktörler ve etkileri aşağıda belirtilmiştir.

1. Kaynak gerilimi : Diğer tüm parametreler sabit tutulursa kaynak geriliminde meydana gelecek bir artış birim dikiş enerjisini arttırır.
2. Kaynak akımı : Diğer tüm parametreler sabit tutulursa kaynak akımında meydana gelecek bir artış birim dikiş enerjisini arttırır.
3. Kaynak hızı : Kaynak hızının değişmesi durumunda birim zamanda ısının transfer edildiği yüzey alanı değişmektedir. Hız azaldığı zaman, birim alana birim zamanda daha fazla ısı girdisi sağlanırken, hızın artması ile daha az ısı girdisi sağlanmaktadır.
4. Kaynak verimi : Verim katsayısı elde edilen enerjinin ne kadarının ana ve ilave metallerin ergitilmesinde kullanıldığını gösteren katsayıdır. Kaynak verimi yüksek olan bir yöntemde enerji daha verimli kullanılacağından ısı girdisinde artış olacaktır.

Bunların dışında ısı girdisini dolaylı yollardan etkileyen fakat etkisi nispeten daha az hissedilen diğer faktörler de bulunmaktadır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Koruyucu gazların etkisi,
2. Kutuplamanın etkisi,
3. Elektrot uç açısının etkisi,
4. Serbest tel uzunluğunun etkisi,
5. Torç açısının etkisi,
6. Kaynak metali transfer tipinin etkisi.

Koruyucu gaz kaynağında ısı girdisini kontrol edebilmek, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha kolaydır. Koruyucu gaz kaynağının endüstrideki yaygın kullanımının önemli nedenlerinden biri de bu durumdur.

Bu çalışmada ısı girdisinin ITAB üzerindeki etkileri farklı numuneler üzerinde yapılan uygulamalarla irdelenmiştir.

2. KAYNAK İŞLEMİNİN TANIMI TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1 Kaynağın Tanımı

Kaynak, birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini birden kullanarak, aynı türden bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmektir (Kaluç, 2004).

Birleştirilmesi öngörülen malzemelerin kaynak bölgeleri plastik veya sıvı duruma getirilebilmekte, eş iki malzemenin birleştirilmesi sonucu oluşan kaynak dikişinin özellikleri de ana malzemeninkine benzemektedir. İşlemin yapılmasında, birleştirilecek malzemelerin özellikleri, yöntemle başvuru amaçlı, kaynak olayındaki oluşumlar ve konstrüksiyonun türü gibi faktörlere göre, belirli önlemlere de başvurulması gerekebilmektedir. Ergitme esaslı kaynak uygulamalarında kaynak bölgelerinin genellikle yardımcı malzemelerle korunması gerekmektedir. Seçilen ilave malzemelerin ise, mümkün olduğu kadar birleştirilen ana malzeme ile aynı ergime aralığına sahip olması, işlem emniyeti bakımından gerekli görülmektedir (Gültekin, 1991).

Günümüz kaynak tekniğinde, metalsel olmayan malzemeler özellikle termoplastikler için de kaynak işlemini tanımlamak mümkündür. Yöntem bu tür malzemeler için, kaynak bölgelerinin plastik duruma getirilmesi ile uygulanmakta, ısı ve basınç yardımıyla yapılan işlem, ilave malzemeli veya malzemesiz olarak gerçekleştirilebilmektedir (Gültekin, 1991).

2.2 Kaynak İşleminin Tarihsel Gelişimi

İnsanoğlu, tarih boyunca gereksinim duyduğu araç ve gereçleri yapabilmek için bulduğu malzemelerin biçimlendirilmesi ile uğraşmıştır; bu uğraş günümüzde de devam etmekte ve insanoğlu yaşadıkça da devam edecektir.

Metalleri keşfettikten sonra insanoğlu bunları kendi kullanımına uygun hale getirmek için çeşitli araştırmalarda bulunmuştur. Bu çalışmaların sonucunda bugün demirci kaynağı ve gaz ergitme kaynağı olarak adlandırılan kaynak yöntemlerinin ilkel uygulamaları ortaya çıkmıştır (Kaluç, 2004).

Günümüzden yaklaşık 3500 yıl önce Mısırlılar iki metal parçasını sıcak durumda çekiçleyerek ilkel de olsa ilk kaynak uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Firavunların devrinde yapılmış orijinal metal işleri üzerinde de bu tür birleştirmeler ve lehim bağlantılarının izleri

görülmektedir. Metal işçiliği Roma çağında da son derece gelişme göstermiştir. Bu çağa ait pek çok eser üzerinde de bu tür birleştirmeleri görmek mümkündür (Anık ve Vural, 1993).

Kaynağın tarihsel gelişimine bakıldığında, endüstriyel anlamda ilk gelişmelerin 19. yüzyılda yaşandığı görülmektedir. Bugünün endüstrisinde oksijen-asetilen kaynak yöntemi olarak bilinen gaz ergitme kaynağının bile endüstriyel ölçüde kullanılabilmesi için bir dizi buluşun gerçekleşmesi beklenmiştir. Oksijenin endüstriyel çapta eldesi, özellikle tamir işlerinde oksijen-asetilen kaynağının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Elektrik arkının 18. yüzyılın son yıllarında Volta tarafından keşfedilmesine rağmen, bu enerjinin kaynak işleminde uygulanması 19. yüzyılın son çeyreğini bulmuştur.

Bu gelişim süreci içinde, biryandan yeni esaslara dayalı kaynak yöntemleri ortaya çıkarken, bilinen yöntemlerin de geliştirilmesi ve otomatikleştirilmesi gerçekleştirilmektedir.

Günümüz kaynak tekniğinde, bu yöntemlerden Elektrik Direnç Kaynağı, Örtülü Elektrodla Kaynak, Tozaltı Kaynağı, Elektro-Curuf Kaynağı ve Koruyucu Gaz Kaynağı genel kaynak yöntemleri olarak kabul edilmektedir. Soğuk Pres Kaynağı, Elektron Işın Kaynağı ve Lazer ile kaynak gibi yöntemler ise özel uygulama alanlarına bağlı yöntemler olarak tanımlanmaktadır (Gültekin, 1991).

Kaynak işleminin tarihsel gelişimi özet olarak aşağıdaki çizelgede verilmektedir:

Çizelge 2.1 Kaynak teknolojisinde kullanılan yöntemlerin tarihsel gelişimine toplu bakış
(Kaluç, 2004).

M.Ö. 3500 - M.Ö. 1000 Lehimleme ve Demirci Kaynağı	
1890	• Karbon elektrot ile ark kaynağı • Elektrik direnç kaynağı • Tel elektrot ile kaynak • Ergiyen elektrot ile kaynak
1900	• Havanın sıvılaştırılması • Asetilenin aseton içinde çözündürülmesi • İlk kaynak üfleci (oksi-asetilen)
1910	• Örtülü elektrot ile ark kaynağı
1920	• Oksijenle kesme • Gazaltı kaynağı
1930	• Tozaltı kaynağı
1940	• Soğuk basınç kaynağı • Sürtünme kaynağı • Ultrasonik kaynak
1950	• Plazma arkı ile kesme • Elektron ışın kaynağı • Difüzyon kaynağı
1960	• Plazma ark kaynağı
1970	• Lazer kaynağı • Kaynak yöntemlerinin mekanizasyon ve otomasyonu • Kaynak robotları
1980	• Kaynak robotlarının yaygın kullanıma girmesi
1990	• Özel kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi • Sürtünen elemanla birleştirme kaynağı • Manyetik alan kaynağı
2000	• Hibrid kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi (Lazer-MIG/MAG, Lazer-TIG,TIG-Plazma ark)

Kaynak yöntemleri; el ile kaynak (manuel), yarı mekanize kaynak, tam mekanize kaynak ve otomatik kaynak olmak üzere dört şekilde uygulanabilir.

El ile kaynakta, kaynak işlemi el ile kullanılan kaynak üfleci, elektrot pensesi veya kaynak torcu yardımıyla gerçekleştirilir.

Yarı mekanize kaynakta, kaynak pensesi, kaynak üfleci ya da torcu kaynak bölgesine yarı mekanize bir ekipman ile iletilerek uygulama yapılır.

Tam mekanize kaynakta ise, kaynak pensesi, kaynak üfleci ya da torcu kaynak bölgesine tamamen mekanize edilmiş bir makine yardımı ile iletilir.

Otomatik kaynak işleminde ise, gerek kaynak işlemi ve gerekse de iş parçasının değiştirilmesi gibi tüm ana ve yardımcı işlemler tam olarak mekanize edilmiştir (Kaluç, 2004).

2.3 Kaynağın Sınıflandırılması

Kaynak yöntemleri, uygulanan enerjinin şiddeti ve türüne göre ergitme kaynağı ve basınç kaynağı olmak üzere sınıflandırılabilirdiği gibi, işlemin amacına göre de birleştirme ve doldurma kaynağı olmak üzere iki grup altında incelenebilir.

Ergitme kaynağı, iki veya daha fazla metalik malzemeyi yalnız sıcaklığın etkisi ile yerel olarak ısıtarak, gerektiğinde ek kaynak metali ile birlikte ergitip birleştirmektir.

Basınç kaynağı, iki veya daha fazla metalik malzemeyi ısıtmadan ya da ısıtarak ek kaynak metali kullanmadan yalnız basınç altında birleştirmektir.

Ergitme kaynağında, kaynak sıcaklığı birleştirilen malzemenin ergime sıcaklığından daha yüksektir; buna karşın basınç kaynağında metal ergimeden kaynak gerçekleştirilir.

Birleştirme kaynağı, iki veya daha fazla parçayı çözülemez bir bütün durumuna getirmektir.

Dolgu kaynağı ise, bir iş parçasının hacmindeki eksikliği tamamlamak veya hacmini büyütmek, ayrıca korozyon veya aşındırıcı etkilere karşı korumak amacı ile, üzerine sınırlı olarak belirli özelliklere sahip malzeme yığmaktır.

Metalik malzemelere uygulanan ergitme kaynağı, ısı enerjisinin türüne ve kaynak bölgesinin havanın olumsuz etkilerinden korunma biçimine göre, birbirlerinden farklılık gösteren çeşitli yöntemler uygulanarak gerçekleştirilir (Kaluç, 2004). Günümüz endüstrisinde en sık uygulanan ergitme kaynağı yöntemleri şunlardır:

- Döküm ergitme kaynağı
- Gaz ergitme kaynağı
- Elektrik ark kaynağı
 - Karbon elektrot ile kaynak
 - Çıplak tel elektrot ile kaynak
 - Örtülü elektrot ile kaynak
 - Özlü elektrot ile kaynak
- Tozaltı kaynağı
- Koruyucu gaz altında kaynak (Gazaltı kaynağı)
 - TIG kaynağı
 - Ark atom kaynağı
 - Normal TIG kaynağı
 - Plazma ark kaynağı
 - MIG/MAG kaynağı
 - Soygaz korumalı kaynak (MIG kaynağı)
 - Aktif gaz korumalı kaynak (MAG kaynağı)
 - Özlü tel elektrot ile MIG/MAG kaynağı
- Elektrik direnç ergitme kaynağı (Elektrocuruf)
- Elektron ışın kaynağı
- Lazer ışın kaynağı
- Termit Kaynağı

Endüstride yaygın kullanılan başlıca basınç kaynağı (katı faz kaynağı) yöntemleri de aşağıda sıralanmıştır:

- Soğuk basınç kaynağı

- Ultrasonik kaynak
- Demirci (ocak) kaynağı
- Döküm basınç kaynağı
- Gaz basınç kaynağı
- Elektrik direnç kaynak yöntemleri
 - Direnç nokta kaynağı
 - Direnç dikiş kaynağı
 - Yakma alın kaynağı
 - Direnç saplama kaynağı
- Yüksek frekans kaynağı
- Sürtünme kaynağı
- Elektrik ark basınç kaynağı
- Difüzyon kaynağı
- Sürtünen elemanla birleştirme kaynağı (Kaluç, 2004)

3. KORUYUCU GAZ KAYNAĞI VE YÖNTEMLERİ

Örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağında, elektrot örtüsünün görevlerinden en önemlisi bir koruyucu gaz atmosferi oluşturarak, kaynak banyosunu havanın oksijen ve azotunun olumsuz etkilerinden korumasıdır. Kaynak bölgesinin bir gaz atmosferi tarafından korunduğu ergitme kaynağı yöntemleri, genel olarak gazaltı kaynak yöntemleri olarak adlandırılır (Kaluç, 2004).

Gazaltı kaynak yöntemlerinde, arkın oluşturulması için kullanılan elektrodun türü ve koruyucu gazın türüne göre bir sınıflandırma yapılır;

- Ergimeyen elektrodla yapılan gazaltı kaynak yöntemleri:
 - o Ergimeyen iki elektrodla yapılan gazaltı kaynağı (ark atom kaynağı),
 - o Ergimeyen bir elektrodla yapılan gazaltı kaynağı (TIG ya da PA - plazma ark).
- Ergiyen elektrodla yapılan gazaltı kaynağı:
 - o Ergiyen elektrodla soygaz altında yapılan gazaltı kaynağı (MIG),
 - o Ergiyen elektrot ile aktif gaz altında yapılan gazaltı kaynağı (MAG) (Kaluç, 2004).

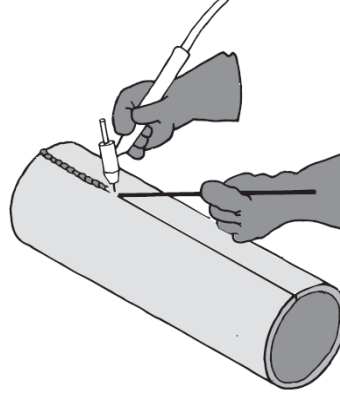
3.1 Ergimeyen Elektrodla Yapılan Gazaltı Kaynak Yöntemleri

3.1.1 Tungsten Inert Gaz Kaynak Yöntemi (TIG)

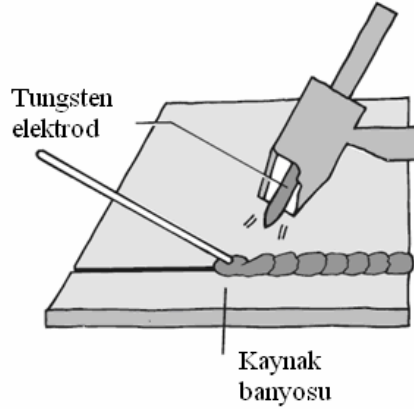
Tungsten Inert Gas kelimelerinin ilk harflerinden oluşmuş TIG kelimesi ile anılan yöntem ilk olarak 1930'lu yılların ortalarında denenmiş ve ABD'de II. Dünya Savaşı sırasında yoğun bir biçimde uygulanmıştır.

TIG kaynağı yüksek kalitede kaynak metali elde etmek için kullanılan kaynak yöntemlerinden biridir. Tükenmeyen bir tungsten elektrot ve arkın bir soygaz tarafından korunduğu TIG kaynağı, son derece önemli bir ark kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, tungsten elektrot ile iş parçası arasında bir elektrik arkı oluşturulur. Ark bölgesi soygaz veya karışımları ile korunur. Bu kaynak yönteminde genel olarak tek bir elektrot kullanılmasına rağmen, bazı durumlarda birkaç elektrot da kullanılabilir. Bu kaynak metodu paslanmaz çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve diğer birçok demir dışı metaller gibi kaynak yapılması zor olan metallerin kaynatılmasında yaygın olarak kullanılır.

Bu yöntemde, ergimeyen bir elektrot kullanıldığı için kıvrık alın kaynak ağzı hazırlanmış ince parçalar, ek kaynak metaline gerek duyulmadan kaynaklanabilir. Kaynak bağlantısı için ek metal gerektiğinde ise aynen oksî-asetilen yönteminde olduğu gibi, bir tel çubuk biçimindeki kaynak metali kaynak bölgesine sokulabilir.



Şekil 3.1 Silindirik parçalarda TIG kaynak uygulaması (Welder's Handbook, 1999).

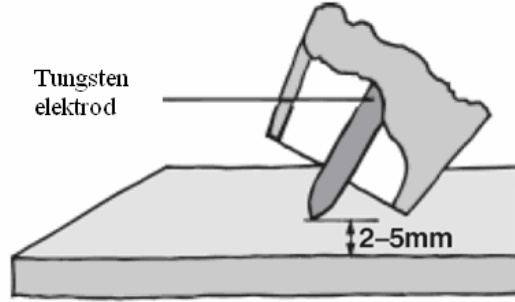


Şekil 3.2 Dolgu metali kullanarak TIG kaynak uygulaması (Welder's Handbook, 1999).

TIG kaynak yönteminin diğer bilinen ve endüstride yaygın uygulanan ergitme kaynağı yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, ısı girdisinin ve ergiyen ek kaynak metali miktarının birbirlerinden bağımsız oluşudur. Bu önemli özellik, yöntemin çok ince parçalara uygulanabilmesine olanak sağlamakta, kök pasoların çekilmesinde, pozisyon kaynaklarında ve tamir işlerinde de kaynakçıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Kaluç, 2004).

TIG kaynağında ark uzunluğu kaynakçı tarafından belirlenir ve uygulamalarda genelde 2 - 5 mm arasında alınır. Yöntemde birleştirilecek malzeme türlerine göre hem doğru akım hem de alternatif akım kullanılabilir. Ark için gerekli olan ısı girdisi de operatör tarafından seçilen

akıma bağlı olarak değişir. Kaynak hızı da birleştirilecek metallerin ergime sürelerine bağlıdır.



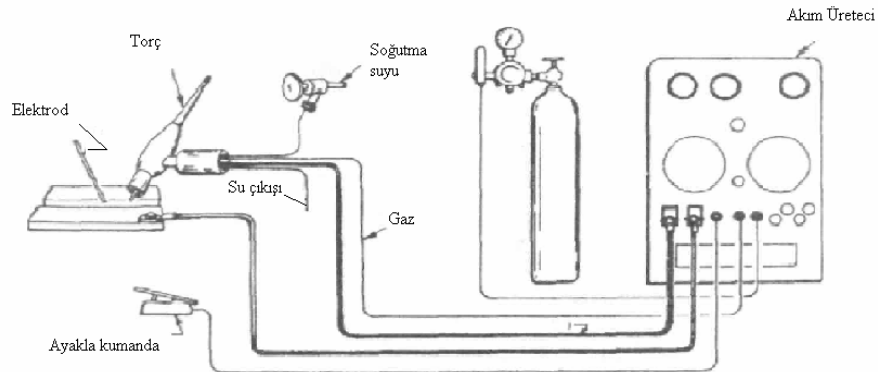
Şekil 3.3 Ark uzunluğu ile kaynak dikiş genişliği ilişkisi (Welder's Handbook, 1999).

3.1.1.1 TIG Kaynak Donanımı

Bir TIG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

- Kaynak üflecisi olarak da adlandırılan kaynak torcu,
- Kaynak akım ve kumanda şalter kablosunu, gaz hortumunu ve gerektiğinde soğutma suyu giriş ve çıkış hortumlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli torç bağlantı paketi,
- Kaynak akımının, gaz akışının ve gerektiğinde soğutma suyunun devreye giriş ve çıkışını, arkın tutuşmasını ve alternatif akım ile çalışma durumunda arkın sürekliliğini sağlayan devreleri de bünyesinde toplayan kumanda dolabı,
- Kaynak akım üretici,
- Üzerinde basınç düşürme vanası ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan koruyucu gaz tüpü.

Ayrıca TIG kaynak yönteminde gerek duyulduğunda donanımına farklı cihazlar da eklenebilmektedir (Kaluç, 2004).



Şekil 3.4 TIG kaynak donanımı blok şeması (Tülbentçi, 1998).

3.1.1.2 TIG Kaynak Elektrodları

TIG kaynağında saf tungsten elektrodlar kullanılabilir. Fakat daha iyi bir kaynak başlangıcı sağladığından ve daha stabil bir ark oluşturduğundan Toryumlu ve zirkonyumlu elektrodlar daha çok tercih edilmektedir.

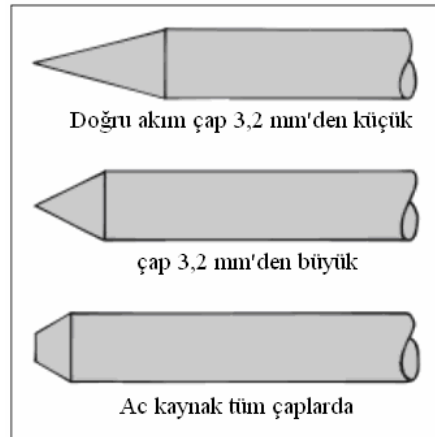
Toryum içeren elektrodlar genellikle %2 toryum (toryum oksit) içerirler ve doğru akımda kullanılırlar. Zirkonyumlu elektrodlar ise %2 zirkonyum (zirkonyum oksit) içerirler. Bu tip elektrodlar alüminyumun alternatif akımla kaynağında kullanılırlar. Elektrot çapı akıma uygun olarak seçilir. Minimum akım ise arkın kararlılığına bağlıdır.

Aşağıdaki çizelgede elektrot çapına göre kullanılabilecek akım aralıkları verilmiştir.

Çizelge 3.1 TIG kaynağında elektrot çapı kaynak akımı ilişkisi
(BS EN 26848:1991'den alınmıştır) (Welder's handbook,1999).

Elektrot çapı(mm)	Maksimum kaynak akımı	
	Doğru akım (A)	Alternatif akım (A)
1.6	60-150	60-125
2.4	170-250	120-210
3.2	225-330	150-250
4	350-480	240-350
4.8	500-675	330-460

Doğru akımda yapılan TIG kaynağında ucu keskin tip elektrot kullanılırken, alternatif akımla kaynakta kullanılan elektrot ucu daha ziyade oval bir yapıdadır. Aşağıdaki şekillerde de bu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.5 Çeşitli TIG kaynak elektrot tipleri (Welder's handbook,1999).

3.1.1.3 TIG Kaynağında Kullanılan Koruyucu Gazlar

Saf argon tüm kaynak uygulamalarında koruyucu gaz olarak kullanılabilir.

Ayrıca Argon - Helyum karışımları da TIG kaynak uygulamalarında koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 3.2 Çeşitli metallerin TIG kaynağı için önerilen koruyucu gazlar (Kaluç, 2004).

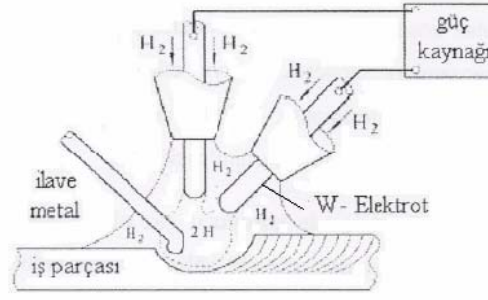
Metalin Türü	Kalınlığı	Akım Türü	Koruyucu Gaz
Alüminyum	Tüm kalınlıklar	AA	Ar veya Ar-He
	Kalın parçalar	DAEN.	Ar-He veya Ar
	İnce parçalar	DAEP	Ar
Bakır ve bakır alaşımları	Tüm kalınlıklar	DAEN.	Ar veya Ar-He
	İnce parçalar	AA	Ar
Magnezyum alaşımları	Tüm kalınlıklar	AA	Ar
	İnce parçalar	DAEP	Ar
Nikel ve alaşımları	Tüm kalınlıklar	DAEN	Ar
Yalın karbonlu ve az alaşımlı çelik	Tüm kalınlıklar	DAEN	Ar veya Ar-He
	İnce parçalar	AA	Ar
Paslanmaz çelik	Tüm kalınlıklar	DAEN.	Ar veya Ar-He
	İnce parçalar	AA	Ar
Titanyum	Tüm kalınlıklar	DAEN	Ar

3.1.2 Ark Atom Kaynağı

Yöntem, koruyucu gaz ortamında yapılan kaynak uygulamalarından en eskisi olarak tanınmaktadır. Uygulamada ark ortamı ve kaynak dikişi üzerine H₂ gazı gönderilmektedir.

Bu gaz ısı etkisi altında aşağıda verilen denkleme göre atomlarına ayrılmaktadır. H₂'nin ısı iletimi 0.63 J/m.°C.h dir. Disosiasyon olayı sonucu, gerek kararlı bir ark ve gerekse korumalı bir kaynak dikişi oluşturulmakta, ayrıca dikiş deformasyonlarına karşı yeterli bir emniyet ortaya çıkarmaktadır.



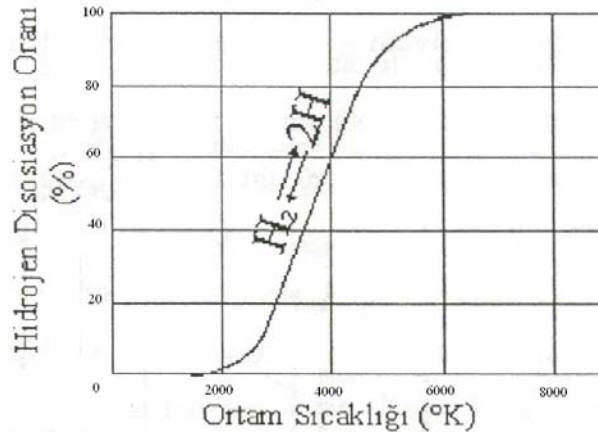


Şekil 3.6 Ark - Atom kaynağının esası (Kongel, 2005).

İşlemede kullanılan koruyucu gaz, wolfram elektrodu ve bütün kaynak dikişini yüzeysel olarak redükleyici bir atmosfer örtüp, oksidasyona karşı da korumaktadır.

Yöntemde ark sıcaklığı 4000 - 6000 °C arasında bulunmaktadır. Şekildeki diyagramda sıcaklık ile hidrojen disosiasyon oranı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Dalgalı akım ile yapılan ark - atom kaynağında, kaynak makinası olarak özel transformatörler kullanılır. Bu cihazların boшта çalışma gerilimlerinin 250 - 300 V arasında bulunması gerekmektedir. Kaynak işleminde uygulanan ark gerilimi ise 60 - 80 V arasında bulunmaktadır. İşlemede kaynak ortamına hidrojen gazı yaklaşık 0.3 atü basınç altında beslenmektedir.



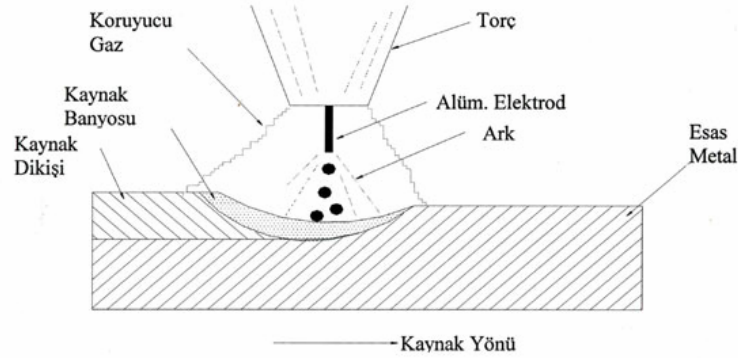
Şekil 3.7 Ortam sıcaklığı ile hidrojen disosiasyon oranı arasındaki ilişki (Gültekin, 1991).

Ark - atom kaynağında 15 - 150 A akım şiddetleri ile çalışılmaktadır. Nadir olarak 150 A akım şiddetlerine kadar varan uygulamalar da bulunmaktadır. Boшта çalışma gerilimlerinin yüksek olması nedeni ile, güç membaı olarak yararlanılan transformatörlerin özel bir koruyucu donatımları bulunması gerekmektedir. Bu yöntemde kullanılan elektrodlar 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0 mm çaplarından seçilmelidir (Gültekin,1991).

3.2 Ergiyen Elektrodla Yapılan Gazaltı Kaynak Yöntemleri

3.2.1 Metal Asal Gaz Kaynağı (MIG) ve Metal Aktif Gaz Kaynağı (MAG)

İlk kez 1948 yılında ABD’de uygulanmış olan MIG kaynak yönteminde ark, helyum ve argon gibi bir soygazın koruması altında yanar; bu yöntemin TIG yönteminden farkı, arkın iş parçası ile kaynak metali gereksinimini de karşılayan sürekli beslenen eriyen bir elektrot arasında oluşturulmasıdır (Kaluç, 2004).



Şekil 3.8 MIG kaynak yönteminde ark bölgesi

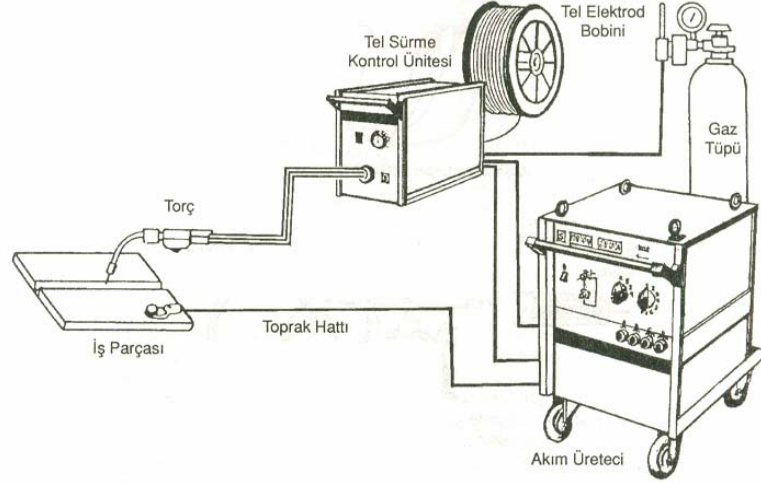
(<http://www.makinamuhendisi.com/images/alu-alasimli-sekil1.jpg>).

Bu yöntemin uygulanması çok basittir, operatör hiçbir zorlukla karşılaşmaz; toprak kablosunu iş parçasına bağlayıp, torcun ucundaki tel elektrodu kaynak ağzına değdirmek yeterli gelmektedir. Uygulama kolaylığı nedeniyle tüm demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağında çok popüler ve aranan bir yöntem haline gelen MIG yönteminin başlangıçta yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde uygulama alanı bulamamasının nedeni soygazın pahalılığı olmuştur.

1950’li yılların sonlarına doğru özellikle otomobil endüstrisinde, tam otomatik olarak çalışan yüksek ergime güçlü, çok hızlı ve sadece yatay pozisyonda çalışabilen, CO₂ koruyucu gazlı kaynak makinaları kullanılmaya başlanmıştır. CO₂ gibi aktif bir koruyucu gaz altında yapılan bu kaynak yöntemine de Metal Active Gas kelimelerinin baş harflerinden yararlanılarak MAG yöntemi adı verilmiştir (Kaluç, 2004).

3.2.1.1 MIG-MAG Kaynak Donanımı

Her kaynak yönteminde olduğu gibi bu kaynak yöntemini de uygulayabilmek için özel bir kaynak donanımına ihtiyaç vardır. MIG - MAG kaynak donanımı, örtülü elektrodla yapılan ark kaynak donanımı ile karşılaştırıldığında daha karmaşık görünmesine karşılık aslında sistem olarak bir tozaltı kaynak donanımından daha basittir.



Şekil 3.9 MIG - MAG Kaynak donanımı (Tülbentçi, 1998).

Bir MIG - MAG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

- Kaynak tabancası olarak da adlandırılan bir kaynak torcu,
- Torç bağlantı paketi,
- Tel biçimindeki elektrodun ilerlemesini sağlayan tel sürme tertibatı,
- Kumanda ve kontrol donanımı,
- Kaynak akım üretici,
- Koruyucu gaz tedarik donanımı,
- Sulu soğutma sistemi,
- Mekanize ve otomatik kaynak için yardımcı donanımlar (Tülbentçi, 1998).

3.2.1.2 MIG - MAG Yönteminde Kullanılan Tel Elektrodlar

Bu yöntemde kullanılan tüm elektrodlar tel halindedir ve bir kangala sarılmış olarak makinaya takılır. Kangal büyüklükleri ve tel çapları standartlarla saptanmıştır.

Dolu tel elektrodlar, sıcak çekilmiş filmaşın tel çekme tezgahlarında soğuk olarak çekilerek istenen çapta tel haline getirilmesiyle üretilir. Çelik elektrodlar durumunda, paslanmaz çelik elektrot dışındakiler korozyondan korunmak için ince bir bakır tabakasıyla kaplanırlar.

Son yıllarda, kaynak metalinin özelliklerini geliştirebilmek için çeliklerin kaynağında

kullanılmak üzere özlü veya kenetli elektrot olarak isimlendirilen bir tür daha ortaya çıkmıştır. Bunlar yumuşak bir çelikten ince bir şeridin, ferro alaşım tozları ve dekapanlar ile beraberce kıvrılıp tel haline getirilmesi ile üretilmişlerdir. Bu şekilde tel halinde üretilmesi güç veya olanaksız bileşimdeki alaşımlar bile kolaylıkla elektrot haline getirilebilmekte ve daha geniş bir spektrumda tel elektrot üretimi olanağı doğmaktadır (Kaluç, 2004).

3.2.1.3 MIG - MAG Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gazlar

Bütün gazaltı kaynak yöntemlerinde olduğu gibi MIG - MAG yönteminde de koruyucu gazın ark bölgesini tamamen örtmesi ve atmosferin olumsuz etkilerinden koruması gerekmektedir. Koruyucu gaz, ergimiş kaynak banyosu içindeki alaşım elementlerinin atmosferdeki oksijen ile reaksiyona girmesini engellemek, azot ve hidrojen gibi diğer zararlı gazların kaynak metaline sıvı kaynak banyosunda çözülerek girmesini önlemek işlevlerini yerine getirir.

MIG - MAG kaynağında soy ve aktif gazlar veya bunların çeşitli oranlardaki karışımları kullanılır. Genel olarak soygazlar, diğer elementler ile reaksiyona girmediklerinden demir dışı metallerin kaynağında, aktif gazlar veya aktif ve soygaz karışımları da çeşitli tür çeliklerin kaynağında uygulama alanı bulmaktadır (Tülbentçi, 1998).

Çizelge 3.3 Endüstride kullanılan gazlar (Tülbentçi, 1998).

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

4. GAZALTI KAYNAK YÖNTEMLERİNDE ISI GİRDİSİ

Ark kaynağında kaynak elektrodundan ana metale elektrik arkı vasıtasıyla enerji transferi yapılır. Kaynakçı arkı başlattığı anda ana metal ve dolgu metali kaynağı oluşturmak üzere ergir. Bu ergime, yeterli miktarda enerji transferinin birim zamanda elektroda ulaşması ve enerji yoğunluğunun elektrotta oluşturulmasıyla sağlanır.

Isı girdisi birim kaynak uzunluğundaki enerji transferinin göreceli ölçümüdür. Isı girdisi önemli bir özelliktir, çünkü ön ısıtma ve ara geçiş ısıları gibi, kaynaklı bölge ve ITAB'ın mekanik özelliklerine ve metalografik yapılarına etkiyen soğuma hızına etkir.

Isı girdisi hesaplarında akım gerilim ve ısı kaynağının hızı önemlidir. Aşağıda ısı girdisinin hesaplanmasında kullanılan formül bulunmaktadır.

$$Q = \frac{60 \times U \times I}{1000 \times V_k} \times \eta \quad (4.1)$$

Burada,

Q : Isı girdisi (kJ/mm),

U : Ark gerilimi (Volt),

I : Akım (Amper),

η : Isıl randıman,

V_k : Kaynak hızı (İşlem) (mm/dak).

Bu denklem verilen bir kaynak yönteminde yapılan farklı kaynak işlemlerini karşılaştırmak için çok kullanışlıdır.

Bununla beraber ısı girdisi, ısı transferi verimliliği gibi ilave datalar uygun olmadıkça elle örtülü elektrot kaynağı ve koruyucu gazaltı kaynağı gibi bazı yöntemleri karşılaştırabilmek için tek başına kullanılmaz (Welding Innovation Vol.XVI, No. 1., 1999).

4.1 Isı Girdisinin Ölçülmesi

Isı girdisi direkt olarak ölçülebilen bir büyüklük değildir. Isı girdisi miktarının hesabının yapılabilmesi için ısı girdisine etkiyen faktörlerin bilinmesi gerekmektedir. Isı girdisine etkiyen temel faktörler kaynak gerilimi, kaynak hızı, kaynak akımı ve kaynak verimi olarak

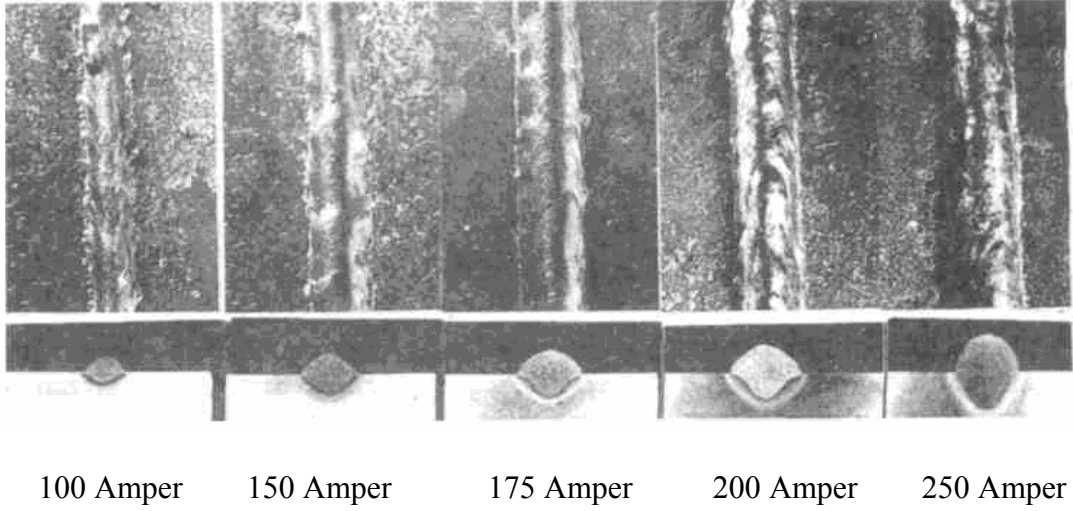
bilinmektedir. Dolayısıyla ısı girdisi hesabı yapılabilmesi için; kaynak gerilimi, kaynak akımı, kaynak hızı ve kaynak verim değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunların yanısıra ısı girdisini etkileyen başka çeşitli faktörler de bulunmaktadır.

4.2 Isı Girdisini Etkileyen Temel Faktörler

4.2.1 Kaynak Akımı

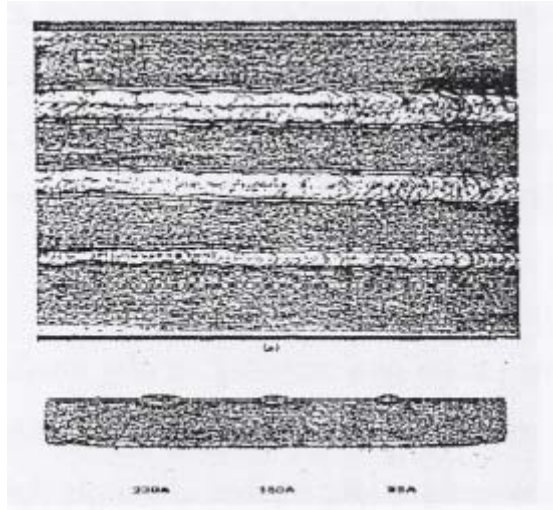
Kaynakta kullanılan akım şiddetinin ana metaldeki ergime miktarına, kaynak biçim ve boyutlarına ve nüfuziyete etkisi diğer bütün parametrelerden daha şiddetlidir. Sabit gerilim karakteristikli olan MIG - MAG kaynak makinalarında, kaynak akım şiddeti tel hızıyla birlikte, tel hız ayarı düğmesinden ayarlanır, tel ilerletme hızı arttıkça, kaynak akım şiddeti de artar (Tülbentçi, 1998).

Kaynak akımı ısı girdisine etki eden temel faktörlerden biridir. Akım asla zamana bağlı olarak özellikle mikrosaniye düzeyinde sabit tutulamaz. Elle örtülü elektrot kaynağında da akım tamamen kaynakçı hünerine bağlı olarak değişen ark uzunluğunun bir fonksiyonudur. Bu yüzden ısı girdisi hesaplarında kullanılan akım değeri ortalama bir değerdir. Tüm diğer kaynak parametreleri sabit tutulduğu zaman artan akım şiddeti ile ısı girdisinin de doğru orantılı olarak artacağı denklem 4.1'den de anlaşılmaktadır. Kaynak akımındaki artış ayrıca kaynak dikişinin eninin, yüksekliğinin, nüfuziyetinin ve boyutlarının da artmasına neden olur. Aşağıdaki şekillerde, kaynak akımının kaynak dikiş boyutlarına nüfuziyete ve ergime oranına olan etkileri görülmektedir. Şekil 4.1'de akımda meydana gelen artışla nüfuziyetin arttığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.2'de ise yapılmış bir deneye ait sonuçlar görülmektedir. Burada kaynak akımı düşürüldüğünde ana metalin ergime oranının da düştüğü görülmektedir.



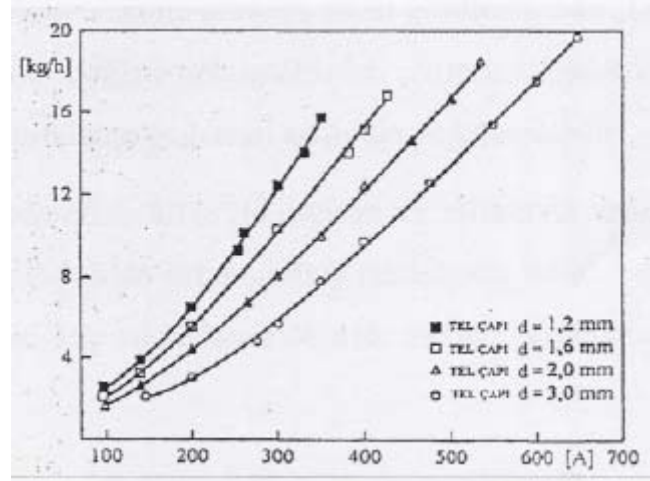
Şekil 4.1 Akım şiddetinin kaynak dikişinin biçim ve boyutlarına etkisi

(U = 21 Volt, Kaynak hızı: 390 mm/dak., Tel çapı: 0.9 mm., Serbest tel ucu: 9.5 mm., MAG kaynak yöntemi (Tülbentçi, 1998)).



Şekil 4.2 Kaynak akımının ergime oranına etkisi (Cary, 1989).

Kaynak akımı ile ilgili bir diğer önemli husus da, akım şiddetinin tel veya elektrot kesit alanına oranı olarak tanımlanan akım yoğunluğudur. Tel veya elektrot çapının değişmemesi koşuluyla uygulanan akım şiddetinin artması birim yüzeye etki eden ısı miktarını artırmaktadır. Böylece ana metalde daha derinlere nüfuz edilebilmekte ve ergime oranı da artmaktadır.



Şekil 4.3 Akım yoğunluğunun ergime oranına etkisi (Kongel, 2005).

Tabloda akım yoğunluğuna bağlı olarak ergitilen elektrot miktarındaki değişim görülmektedir. Deney 30 V ark geriliminde ve ters kutuplama şartlarında gerçekleştirilmiştir. Eğrilere göre 300 A akım şiddetinde dört değişik tel çapıyla gerçekleştirilen kaynak işleminde $d = 3$ mm tel çapı için ergime miktarı 6 kg/h, $d = 2$ mm tel çapı için ergime miktarı 7.8 kg/h, $d = 1.6$ mm tel çapı için ergime miktarı 10.7 kg/h ve $d = 1.2$ mm tel çapı için ergime miktarı 12.5 kg/h olarak yaklaşık okunmaktadır. Ayrıca eğrilere göre artan akım şiddeti ile ergime oranının da artmakta olduğu ve 360 A'den sonra $d = 1.2$ mm çaplı telin ergime oranının verilmediği görülmektedir. Bunun nedeni akım yoğunluğunun belirli bir oranı aştığında kaynak elektrodunun bu akım yoğunluğuna dayanamayarak yanmasıdır. Yanma sırasında tel ve elektrot örtüsünde element kayıpları oluşmaktadır (Kongel, 2005).

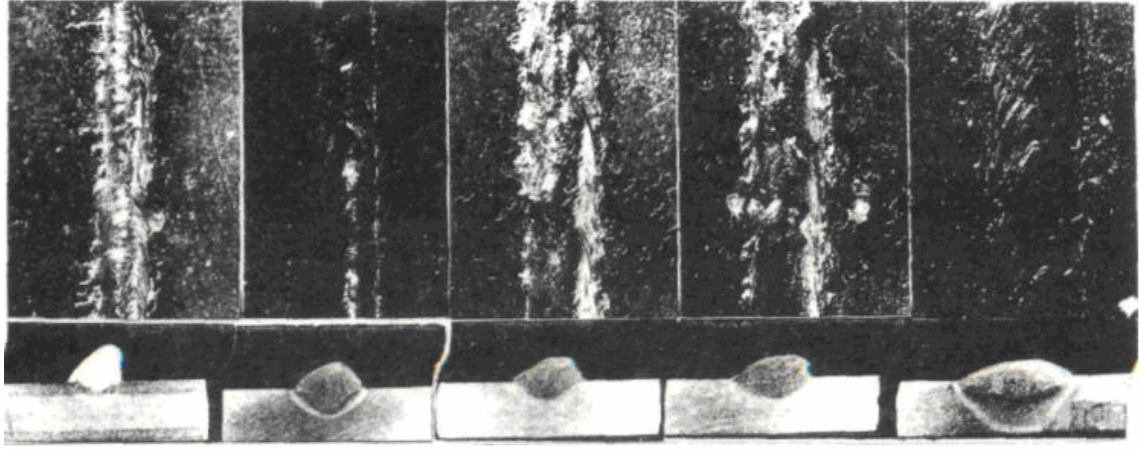
Yukarıda anlatılanların ışığı altında şu kaniya varılabilir: “Kaynak sırasında akım ne kadar büyük olursa kaynak işlemi de o derece mükemmel olur”. Fakat bu bizi yanılgıya düşürür çünkü aşırı yüksek akım şiddeti çok geniş bir kaynak banyosu ve derin nüfuziyete neden olduğundan delinmelerin ortaya çıkmasına yol açabilir (Tülbentçi, 1998).

4.2.2 Kaynak Gerilimi

Teorik olarak kaynak geriliminde meydana gelecek bir artış ısı girdisinin artmasına neden olacaktır.

Kaynak gerilimi plazma adıyla bilinen iyonlaşmış gaz arasında yer alan, iki elektrot arasında bir elektrik deşarjıdır. Bu elektrik deşarjı elektronların ve iyonların plazma içerisinde hareket etmeleri sayesinde sağlanır (Oğuz, 1989).

Kaynak işleminde uygulanacak kaynak gerilimi belirlenirken, oluşan arka en yakın gerilim gözönüne alınmalı ve kaynak makinası üzerinde bulunan gerilim değerlerinden bu gerilime en yakın olana makina ayarlanmalıdır. Ark boyunca ölçülen gerilim kaynak arkı boyunca kullanılan gerçek gerilimi verir. Kaynak makinasından okunan gerilim değeri ise daima ark geriliminden yüksektir. Bunun nedeni kaynak kablolarından geçen dirençtir. Bu yüzden kaynak makinasındaki gerilim değeri genellikle yaklaşık bir hesap yapılacaksa kullanılır. Yani ısı girdisinin tam sonucu kaynak makinasındaki gerilim değeri alınarak hesaplanamaz.



18 Volt

21 Volt

23 Volt

26 Volt

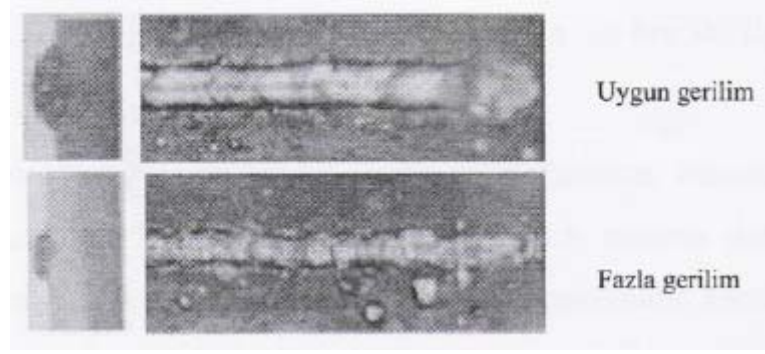
30 Volt

Şekil 4.4 Ark geriliminin kaynak dikişinin biçim ve boyutlarına etkisi

($I = 175 \text{ A.}$, Kaynak hızı: 390 mm/dak., Kaynak tel çapı: 0.9 mm., Serbest tel uzunluğu: 9.5 mm., MAG kaynak yöntemi (Tülbentçi, 1998).

Kaynak gerilimi ve ark boyu genellikle birbirlerinin yerine kullanılan terimlerdir. Ancak bunların aralarında bir ilişki olmakla beraber farklı şeyler olduklarını belirtmekte yarar vardır. Gazaltı kaynağında ark boyu dikkatle kontrol edilmesi gereken kritik bir değişkendir. Ark boyunun değişimi kaynak gerilimini dolayısı ile de ısı girdisini değiştirmektedir.

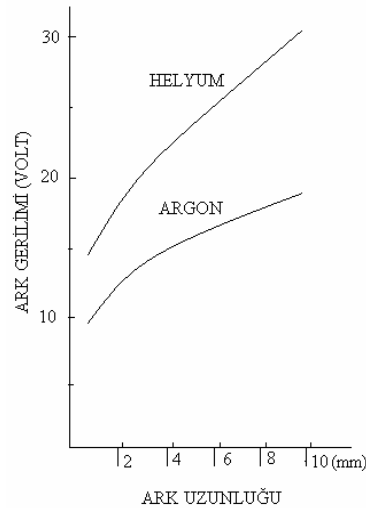
Kararlı bir ark oluşturmada, ark uzunluğu arttığı zaman kaynak gerilimi artar ve bu sayede gerilimin artmasına bağlı olarak ısı girdisi artar; ark uzunluğu azaldığında ise kaynak gerilimi azalır, ısı girdisi düşer. Ark uzunluğu belli sınırlar arasında olmalıdır. Eğer ark boyu normalden uzun olursa arkın kararlılığı bozulur, çevreye yayılan ısı miktarının artması sonucu arkın etkinliği (ark verimi = verim katsayısı) azalır, nüfuziyet azalır, sıçramalar artar hatta ark söner ve akım geçmez.



Şekil 4.5 Kaynak gerilimi – ergime oranı ilişkisi (Cary, 1989).

Şekil 4.5’ te gerilim değerinin ergime oranına etkisi görülmektedir. Yüksek gerilim değerinin seçilmesi durumunda ortaya çıkan nüfuziyet azlığı ve sıçramalardaki artış görülmektedir.

Kaynak gerilimine etki eden diğer önemli bir faktör de kullanılan koruyucu gazın iyonlaşma enerjisidir. Gazın iyonlaşma enerjisinin yüksek olması, o gazın daha uzun bir ark ihtiyacı göstermesine ve ark geriliminin değişmesine neden olur. Yaygın kullanılan helyum ve argon gazlarının iyonizasyon enerjileri kıyaslandığı zaman, helyumunkinin 24.5 eV, argonunkinin ise 15.7 eV olduğu görülür. Helyum, iyoizasyon enerjisi yüksek olması nedeniyle daha yüksek enerjiye ihtiyaç gösterir. Bunu sağlamak için daha uzun arkla çalışıldığından dolayı kaynak gerilimi yükselir ve bu sayede daha fazla ısı girdisi sağlanır. Argon gazının düşük iyonizasyon enerjisi nedeniyle daha kısa ark boyuyla çalışılır. Kaynak geriliminin helyuma göre düşük olmasına sebep olur, nüfuziyet azalır.



Şekil 4.6 Kaynak geriliminin koruyucu gaz ile değişimi (Cary, 1989).

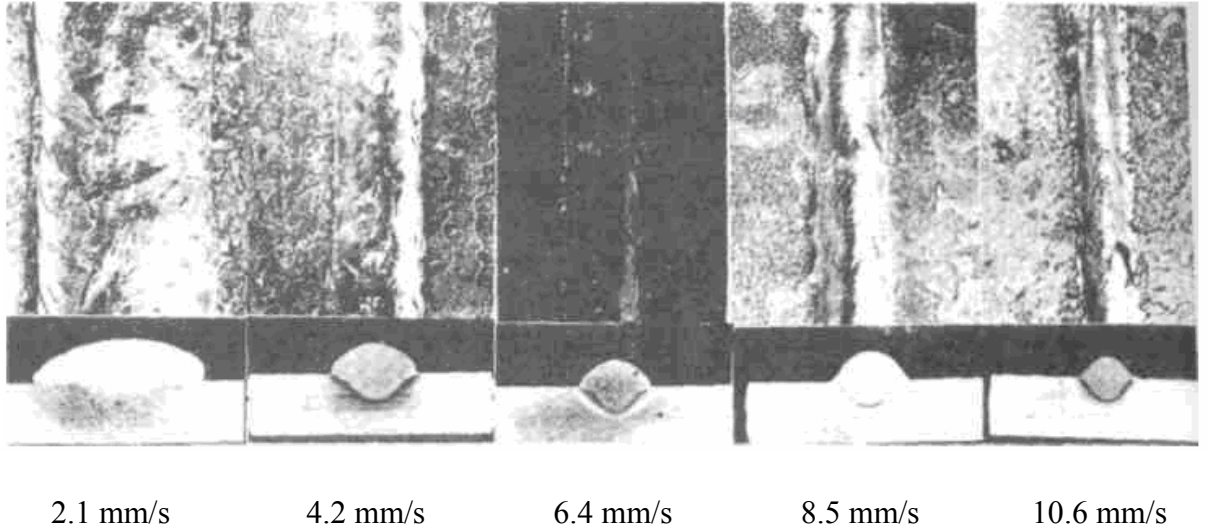
Sonuç olarak, ark uzunluğunun artması ile kaynak gerilimi büyümekte; bununla beraber ısı girdisi de artmaktadır. Ancak ark uzunluğunun arttırılması, ark ısısının daha büyük bir kısmının çevreye yayılmasına ve ark veriminin azalmasına yol açmaktadır. Gerilim değerinin yükselmesi ile artan ısı girdisi, bu sefer de ark veriminin düşmesi ile azalmaktadır. Artan gerilim ile ısı girdisi artış göstermekte ancak bu artış kaynak akımının yol açtığı artışa nazaran düşük kalmaktadır.

4.2.3 Kaynak Hızı

Kaynak hızı, yarı otomatik yöntemlerde kaynakçı tarafından; otomatik veya mekanize yöntemlerde ise makine tarafından ayarlanan bir parametredir (Tülbentçi, 1998).

Kaynak işleminde ısı girdisini etkileyen bir diğer önemli parametre kaynak hızıdır. 4.1 no'lu ısı girdisi eşitliğinden de görülebileceği üzere, kaynak hızında meydana gelen değişim, ısı girdisine tesir etmektedir.

Kaynak hızı, kaynak arkının iş parçası boyunca olan hareketi veya birim zamanda yapılan kaynak dikişi boyu olarak tanımlanır. Diğer bütün şartlar sabit tutulduğunda, orta değerdeki kaynak hızlarında kaynak nüfuziyeti en fazladır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Kaynak hızının, kaynak dikişinin biçim ve boyutlarına etkisi (Tülbentçi, 1998).

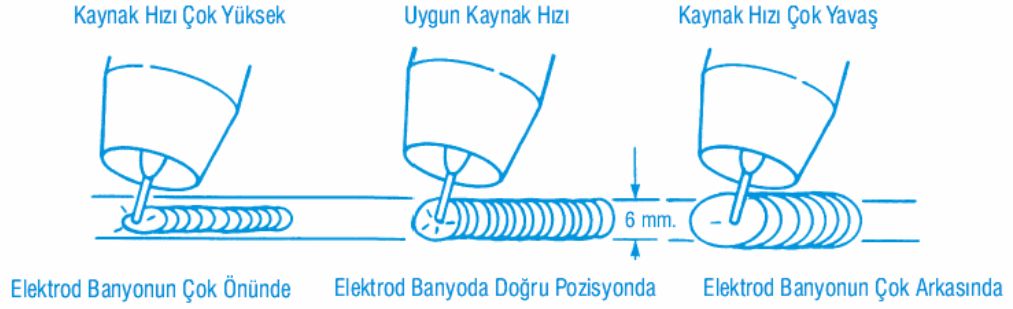
Bu ilişki aşağıdaki eşitlikle verilebilir:

$$G_{(kg/m)} = 7.8 \times 10^{-4} \times h \times g \times d^2 \times \frac{V_e}{V_k} \quad (4.2)$$

burada G, bir metre kaynak dikişi başına kg olarak yığılan kaynak metali; h sıçrama

kayıplarını gözönüne alan yığma verimi; g (gr/cm^3) elektrot malzemesinin yoğunluğu; d (mm) elektrot çapı; V_e (m/dak) elektrot besleme hızı ve V_k (m/dak) kaynak hızıdır.

Çok düşük kaynak hızlarında, kaynak arkı esas metal yerine erimiş kaynak banyosu üzerinde yanar ve bu nedenle nüfuziyet azalır. Bu sırada geniş bir kaynak dikişi de oluşur.



Şekil 4.8 Kaynak hızının kaynak dikişine etkisi (Eryürek, 2003).

Kaynak hızı arttırılırsa ark, esas metale daha doğrudan etki ettiğinden, birim kaynak dikişi uzunluğu başına, arktan esas metale iletilen ısı enerjisi önce artar. Kaynak hızının daha da arttırılması, birim kaynak dikişi uzunluğu başına, esas metale daha az ısı enerjisi verilmesi sonucunu doğurur. Bu nedenle, artan kaynak hızıyla esas metalin erimesi önce artar ve daha sonra azalır. Kaynak hızı daha da arttırılacak olursa, ark tarafından eritilen yolu doldurmaya yetmeyecek miktarda dolgu metali yığılması olduğundan kaynak dikişinin kenarlarında yanma olukları meydana gelir.

Aşağıda verilmiş olan 4.3 ve 4.4 no'lu eşitliklere göre de, kaynak hızındaki artışa göre ergime için üretilen enerjinin azalmakta olduğu görülmektedir. Bunun nedeni birim zamanda ısı transfer edilen yüzey alanının artmasıdır.

$$Q = U.I \text{ (Watt)} \quad (4.3)$$

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} \text{ (kJ/cm)} \quad (4.4)$$

Burada;

Q : Elde edilen enerji (Watt),

U : Kaynak gerilimi (V),

I : Kaynak akımı (A),

q : Birim dikiş enerjisi (kJ/cm),

η : Verim katsayısı,

V_k : Kaynak hızı (cm/dak).

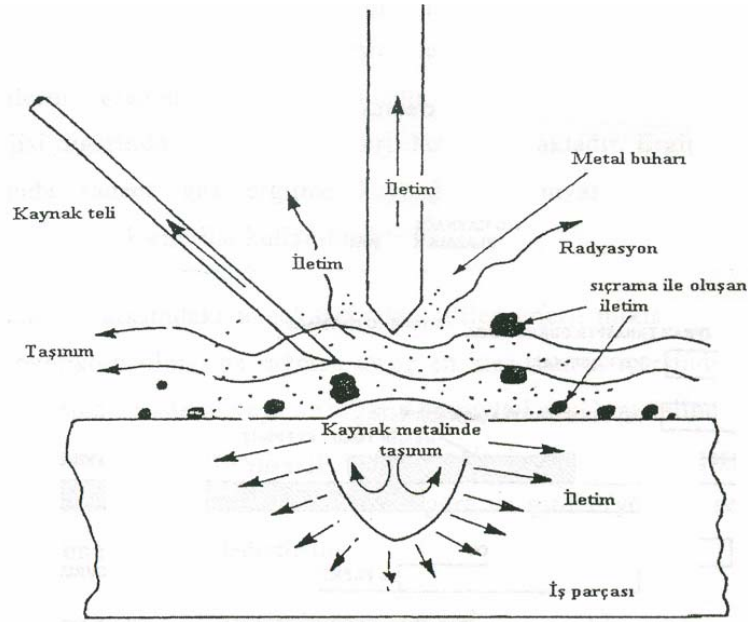
Kaynak hızının ergime üzerine etkisi basit bir şekilde açıklanabilir. Elektrikler kesildiği zaman parmağımızı yanan bir mumun üzerinden geçirmişizdir. Bu olayda, ergiyen mumu kaynak teli veya elektrodu olarak, kendi parmağımızı ana malzeme olarak ve parmağımızı kaydırma hızını da kaynak hızı olarak düşünebiliriz. Elimiz yanmasın diye elimizi mumun üzerinden hızla geçiririz, hafif bir yanma hissetmek için de parmağımızı yavaş hızlarda geçiririz. Bu durumda elimiz ısınır. Burada elimizin hızına göre parmağımıza transfer edilen enerji miktarı değişmiştir (Eryürek, 2003).

Kaynak hızının ergime oranına etkisi aynı parmağımızın hızını değiştirdiğimizde oluşan etki gibidir. Yani kaynak hızını azalttığımız zaman birim zamanda birim alana daha fazla enerji transfer edilir. Bu sayede ergitilen metal miktarı arttırılır. Fakat kaynak hızı çok düşük olursa o sırada transfer edilen enerji fazla geleceğinden ana metalde delikler oluşabilir (Kongel, 2005).

4.2.4 Kullanılan Yöntemin Verimi

Verim elde edilen enerjinin ne kadarının ana ve ilave metallerin ergitilmesinde kullanıldığını gösterir. Çünkü kaynak işlemi sırasında elde edilen enerjinin tamamı ergitme işlemi için kullanılamamaktadır. Kaynak işlemi esnasında birçok kayıplar meydana gelmektedir.

Şekil 4.9’da kaynak işlemi esnasında meydana gelen kayıplar gösterilmiştir. Teorik olarak kaynak işleminde elde edilen enerji elektroda, kaynak teline ve iş parçasına gitmektedir. Fakat pratikte çevreye sıçramayla, iletimle, metal buharıyla ve taşınılma ile enerji kaybı gerçekleşmektedir. Doğal olarak, kayıp enerji miktarı kaynak yöntemine göre değişmektedir. Bu enerji kayıplarının nedenleri kaynak işleminin hangi koşullarda (koruyucu ortam, sıcaklık fark, vb.) gerçekleştirildiğiyle ilgilidir (Kongel, 2005).



Şekil 4.9 Ergimeyen elektrotla kaynak işlemi esnasındaki enerji dağılımı (Kou, 1987).

Çizelge 4.1 Gazaltı kaynak yöntemlerinde verim katsayıları (Kou, 1987).

Yöntem	Verim katsayısı
TIG Kaynağı	
Düşük akımda doğru kutuplamada	0.40-0.60
Yüksek akımda doğru kutuplamada	0.60-0.80
Ters kutuplamada	0.20-0.40
Alternatif akımla	0.20-0.50
MIG - MAG Kaynağı	
Kısa ark ve damlasal göçüm	0.60-0.75
Küçük damlasal göçüm	0.65-0.85

Verim katsayısı kalorimetrik ölçülerle hesaplanabilmektedir. Bu amaçla kuru ve ıslak kalorimetreler kullanılır. Islak kalorimetrelerde bir borunun içerisinden su geçirilmektedir ve aynı anda kaynak işlemi gerçekleştirilir (Kou,1987).

Burada verim katsayısını hesaplarken aşağıdaki 4.5 no'lu eşitlikten yararlanılmaktadır:

$$Q = m_s \times c_s \times \Delta T_s = \dot{\eta} \times U \times I \quad (4.5)$$

Burada,

Q : Elde edilen enerji (kJ),

m_s : Birim zamanda boru içinden geçen suyun kütlesi (g),

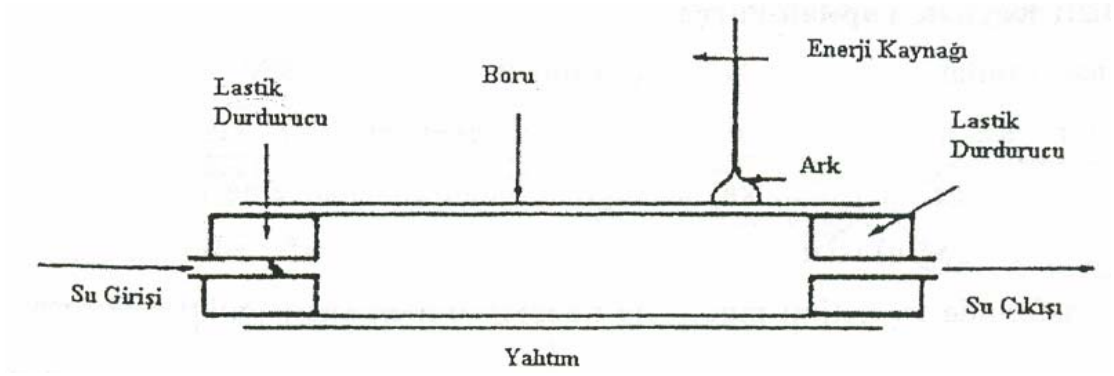
c_s : Suyun özısı katsayısı (kJ/g.°C),

ΔT_s : Giriş ve çıkıştaki suyun sıcaklık farkı (°C),

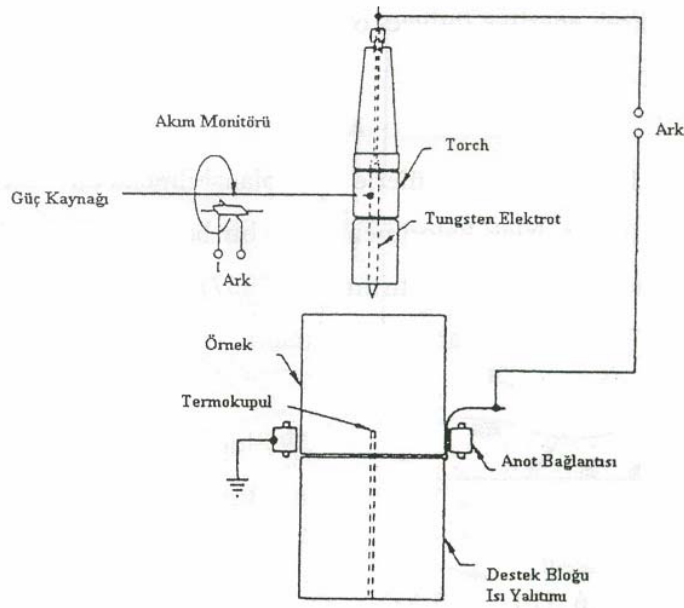
η : Verim katsayısı,

U : Kaynak gerilimi (V),

I : Kaynak akımı (A).



Şekil 4.10 Islak kalorimetre (Kou, 1987).



Şekil 4.11 Soğuk kalorimetre (Kou, 1987).

Kuru kalorimetrede ise anlık ısısal değişimler ölçülmekte ve bu değerler teorik değerle karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmaya göre verim katsayısı hesaplanmaktadır (Kongel, 2005).

4.3 Isı Girdisini Etkileyen Diğer Faktörler

- Koruyucu gazların etkileri,
- Kutuplamanın etkisi,
- Kaynak metali transfer tipinin etkisi,
- Serbest elektrot uzunluğunun etkisi,
- Elektrot açılarının etkisidir.

4.3.1 Koruyucu Gazların Etkileri

Ark esaslı kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesini havanın zararlı etkilerinden korumak, başarılı bir kaynak dikişi elde etmek için önem taşımaktadır. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonların kaynak bölgesine zarar vermemesi için elektrot ile ark kaynağında elektrot örtü maddesi, tozaltı kaynağında koruyucu toz, gazaltı kaynak yöntemlerinde ise koruyucu gazlar kullanılmaktadır. Bu gazlar, metalsel banyoyu koruyan bir atmosfer oluşturmalarının yanı sıra; arkın kararlılığını, kaynağın dolgu biçimini, dikişin mekanik özelliklerini, işlemin verimliliğini ve ısı girdisini etkilemektedirler.

Temel olarak koruyucu gazlar, nötr ve aktif gazlar olarak iki gruba ayrılır. Nötr gazlar helyum ve argon, aktif gazlar ise karbondioksit, oksijen ve hidrojenidir. Bu gazlardan oksijen ve hidrojen kaynak metaline kötü etkilerinden dolayı direkt olarak kullanılamamaktadırlar. Sadece diğer gazlarla küçük miktarlarda karıştırılarak kullanılırlar.

4.3.1.1 Argon

Argon asal bir gazdır, kokusu ve rengi yoktur. Yoğunluğu, yaklaşık olarak havanın yoğunluğunun 1.4 katıdır. Bu da kaynak bölgesinin iyi korunmasını ve yüksek gaz akış hızlarına gereksinim duyulmamasını sağlar. Argon gazının düşük iyonizasyon potansiyeline (15.7 eV) sahip olması, stabil ve düşük gerilimli ark meydana getirir. Bu durum kaynatılacak malzemeye sağlanan ısı girdisinde azalmaya sebep olur. Argonun düşük ark gerilimi karakteristiği özellikle ince malzemelerin elle kaynağında avantaj sağlar. Argonun bu özelliği, ana metalde kaynak işlemi esnasında oluşacak distorsiyon eğilimini azalttığı için düşey ve

tavan kaynak uygulamalarında da olumlu sonuçlar verir (Yalçın, 2005 ve Kongel, 2005).

4.3.1.2 Helyum

Helyum da argon gibi asal bir gazdır, kokusu ve rengi yoktur. Yaklaşık olarak havanın 0.14 katıdır. Havadan hafif bir gaz olması gaz sarfiyatını çok arttırmaktadır. Yatay pozisyonda aynı şartlar altında argon gazının yaptığı korumayı sağlamak için, üç misli helyuma ihtiyaç vardır. Helyum, neon gazı hariç diğer bütün gazlardan daha iyi elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu nedenle yüksek akımların kullanıldığı kaynak uygulamaları için uygun bir gazdır. Helyumun termal iletkenliği, 6000 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda diğer gazların termal iletkenliğinden oldukça yüksektir. Helyumun yüksek termal iletkenliği ile argondan daha yüksek ark gerilimi ve ısı girdisi elde edilir. Bu da yüksek termal iletkenliğe veya yüksek ergime sıcaklığına sahip kalın malzemelerin kaynağında avantaj sağlar ve daha geniş kaynak metalleri elde edilir. Argon gazına helyum ilavesi ile daha sıcak ve akıcı kaynak banyosu olduğundan alüminyumun kaynağında meydana gelen porozite oluşumu azalır (Yalçın, 2005 ve Kongel, 2005).

4.3.1.3 Karbondioksit

Karbondioksit renksiz, kokusuz ve havadan yaklaşık olarak 1.5 kat daha ağır bir gazdır. Basınçlı tüplerde kullanılır. Karbondioksit tüpleri 15 °C’de takriben 65 atmosferde doldurulur. Bu şartlarda tüpün ihtiva ettiği gaz sıvı haldedir. Kullanma sırasında sıvı haldeki karbondioksit gaz haline geçer.

Argon ve helyum bir çok metalin kaynağında koruyucu gaz olarak kullanılmasına rağmen; karbondioksit, az alaşımlı ve yalın karbonlu çeliklerin gaz altı kaynağında çok geniş çapta uygulama alanı bulmuştur. Karbondioksitin çeliklerin kaynağında sunduğu avantajlar; derin nüfuziyet, daha yüksek kaynak hızları ve düşük maliyet olarak sıralanabilir.

Karbondioksit gazının en büyük dezavantajı, oldukça kaba ark ve aşırı sıçramalı metal transferi oluşturmasıdır. Sıçrama kayıpları çok kısa ve düzgün ark boyu ile azaltılabilir. Eğer iyi bir ark koruması sağlanırsa, sıçrama miktarı belirli tolerans sınırı içinde korunursa ve uygun dezoksidan elementler içeren elektrotlar kullanılırsa kaliteli kaynak metalleri elde edilebilir (Kaluç, 2004 ve Yalçın, 2005).

4.3.1.4 Karışım Gazlar

Gazaltı kaynak yöntemlerinde koruyucu gazlardan beklenenler; iyi bir metal transferi,

nüfuziyet, erime genişliği, kaynak geometrisi, kaynak hızı ve düşük maliyettir. Ayrıca çatlak ve gözenek oluşturmamasıdır. Asal ve aktif gazlardan birinin tek başına bu özellikleri vermesi zordur. Gazaltı yöntemlerinde ilk önceleri helyum ve argon, daha sonraları ise karbondioksit kullanılmaya başlanmıştır. Karbondioksit gazının kullanımı esnasında ortaya çıkan problemler ilave tel bileşimi değiştirilerek giderilmeye çalışılmış ancak istenen sonuçlar elde edilememiştir. Son yıllarda birkaç gazın belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışım gazlar geniş bir uygulama alanı bulmuştur.

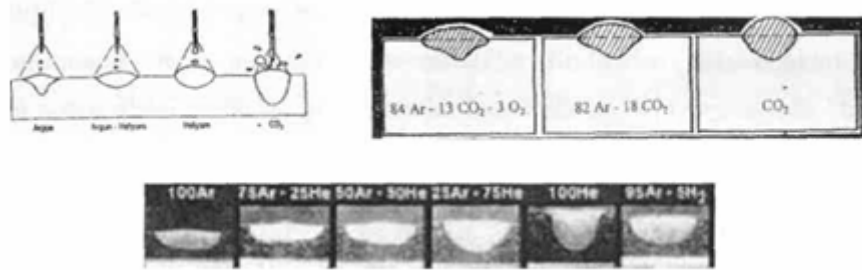
Argona %1 - 5 O₂ veya %3 - 25 CO₂ ilavesi ark stabilizesinde ve yanma oluşu oluşumunun önlenmesinde gelişmeler sağlar. Ayrıca paslanmaz çeliklerin darbeli MAG kaynağı için argon-karbondioksit karışımına helyum ilavesi ark geriliminin artmasını sağlar. Örneğin %98 Ar + %2 CO₂ karışım gazı yerine %35 He + %2 CO₂ + %63 Ar karışım gazı kullanıldığında ark geriliminde yaklaşık olarak %10'luk bir artış sağlanmakta, böylece ısı girdisinin artmasının yanında kaynak verimliliği ve kalitesi de artmaktadır.

Yalnız CO₂ ile yapılan dikişe göre argon – karbondioksit – oksijen karışımı ile yapılan kaynak dikişinin estetiğinde ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanabilir. %1 - 8 O₂ ilavesi, kaynak banyosunun akıcılığını, nüfuziyeti ve ark stabilitesini artırır; %25'e kadar CO₂ ilavesi, sıçrama kaybını artırır, nüfuziyeti derinleştirir ve ark stabilitesini düşürür. Düşük CO₂ ilavesi (%1 - 7) ile kadeh veya parmak şeklinde penetrasyon profili elde edilir. Bu karışımlar, ince malzemelerin özellikle sacların kaynağı için uygun olan düşük ısı girdisi oluşturur. Kalın parçaların çok pasolu kaynağında problemler oluşturur. Parmak şeklindeki kaynak metali profili porozite ve ergime hatalarının oluşma ihtimalini artırır. %8 - 15 CO₂ ilavesi 12 mm'ye kadar kalınlığa sahip malzemelerin kaynağı için uygundur.

Yüksek CO₂ ilavesi (% 16 - 25) yuvarlak, derin penetrasyonlu kaynak metalleri üretir ve kalın parçaların kaynağı için uygundur. Karışıma CO₂ ilavesi ısı girdisini arttırmaktadır ve böylece ergime alanı daha büyük olur, kaynak banyosunun akıcılığı artar ve kaynak metalinin profili çanak şeklini alır. Kaynak banyosunun akıcılığının artması gaz kaçışına imkân tanır böylece porozite oluşum ihtimalini azaltır. Kalın parçalar için %80 Ar + %20 CO₂ karışımı önerilirken %86 Ar + %12 CO₂ + %2 O₂ karışımı malzeme kalınlıklarının geniş aralığında iyi nüfuziyet ve kuvvetli bir ark özellikleri vermektedir. Koruyucu gazda yüksek miktarda CO₂ mevcudiyeti, düşük CO₂ mevcudiyetinden daha fazla sıçramalı kaynak oluşturur ve ark stabilizesini azaltır.

Argon gazına çok az bir miktardaki hidrojen ilavesi ark gerilimini dolayısı ile ısı girdisini

yükseltir. %5 hidrojenli argon + hidrojen karışımı nikel ve alaşımlarında, %25 hidrojenli argon + hidrojen karışımı ise özellikle ısı iletimi yüksek olan kalın bakır parçaların kaynağında kullanılır (Yalçın, 2005 ve Kongel, 2005).



Şekil 4.12 Çeşitli koruyucu gazların dikişe etkileri (Metals Handbook, 1989 ve Yalçın, 2005).

4.3.2 Kutuplamanın Etkisi

Kutuplama terimi kaynak torcunun bir doğru akım ünitesinin kutuplarına elektriksel olarak bağlanmasını tamamlamak için kullanılır. Ergiyen elektrotla gazaltı kaynağı uygulamalarının büyük bir çoğunluğunda doğru akım elektrot pozitif kutuplama kullanılır. Bunun nedeni bu kutuplamanın geniş bir kaynak akım aralığında kararlı bir ark, yumuşak bir metal iletimi, göreceli olarak daha az sıçrama, iyi bir kaynak dikişi özelliği ve daha fazla nüfuziyet oluşturmasıdır.

Doğru akım elektrot negatif kutuplama ise nadiren kullanılır. Bunun nedeni aksel spray iletiminin ticari olarak pek kabul görmemiş bazı değişiklikler yapmadan gerçekleşmemesidir. Doğru akım elektrot negatif kutuplamanın yüksek erime hızları oluşturmak gibi olumlu bir yanı olmakla birlikte; damla iletim tipi, iri damlalı iletim olduğundan bu olumlu tarafından yararlanmak mümkün değildir. Çeliklerde iletimde, argona %5 oranında O_2 katarak (oksidasyon kayıplarını telafi etmek için elektrotta özel alaşımlar katmak gerekir) veya elektrodu termoiyonik yaparak (elektrodun maliyetini artırır) iyileştirme sağlanabilir.

Her iki halde de yağma hızları azalır ve kutup değiştirmenin sağladığı üstünlük ortadan kalkmış olur. Bununla birlikte, doğru akım elektrot negatif kutuplama, yüksek yağma hızına ve daha düşük nüfuziyete sahip olması nedeniyle, yüzey doldurma işlemlerinde uygulama alanı bulmuştur.

Gazaltı kaynağında alternatif akım kullanılması genellikle başarısız sonuçlar vermiştir.

Alternatif akımda akım sıfırdan geçerken arkın sönme eğilimi göstermesi ark kararsızlığına

neden olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için elektrot yüzeylerine uygulanan özel işlemler geliştirilmiş olmakla birlikte bunların uygulanma maliyetleri elektrotları pahalı hale getirmektedir.

4.3.3 Kaynak Metali Transfer Tipinin Etkisi

Gazaltı kaynağında metal damlalar elektrottan iş parçasına üç temel iletim mekanizmasıyla geçer :

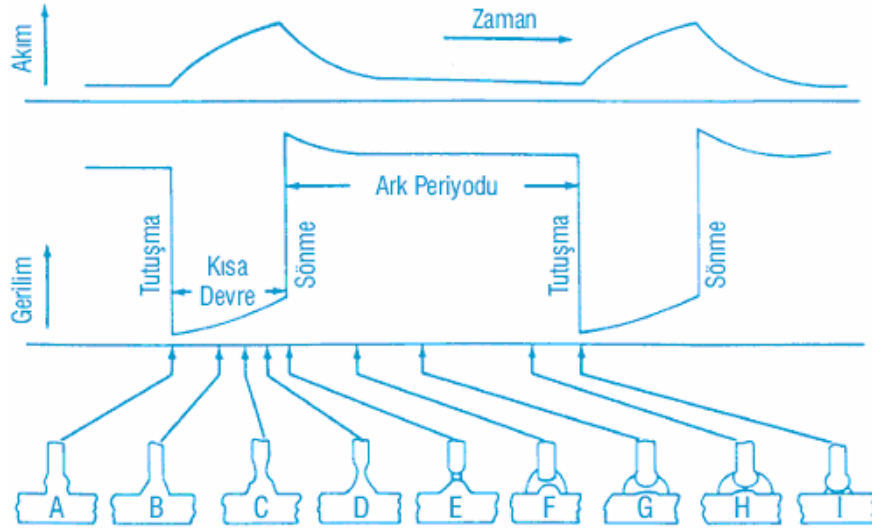
- a) Kısa devre iletimi (Kısa ark)
- b) İri damla iletimi (Uzun ark)
- c) Sprey iletimi

Damla iletim tipi çok sayıda faktör tarafından etkilenir. Bunlar içinde kaynak akımının tipi ve şiddeti, elektrot çapı, elektrotun bileşimi, serbest elektrot uzunluğu ve koruyucu gaz tipi bulunmaktadır.

4.3.3.1 Kısa Devre İletim (Kısa Ark)

Kısa devre iletimi, gazaltı kaynağındaki en düşük kaynak akımı aralığında ve en küçük elektrot çaplarında gerçekleştirilir. Bu tip bir iletim ince kesitlerin birleştirilmesi için, pozisyon kaynağı için ve büyük kök açıklıklarını birleştirmeye uygun olan küçük ve hızla katılan bir kaynak banyosu oluşturmak için kullanılır. Metal, elektrottan iş parçasına, sadece elektrot kaynak banyosu ile temas halinde olduğu sırada iletilir. Ark aralığı boyunca herhangi bir metal iletimi olmaz. Elektrot iş parçasına saniyede 20 ila 200 kez temas eder. Metal iletiminin düzeni ve bu sıradaki gerilim ve akım değeri şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Elektrot kaynak banyosuna temas edince, kaynak akımı artar. Tel ucundaki erimiş damla D ve E safhasında daralarak telden iş parçasına geçer ve E ve F'de gösterildiği gibi ark yeniden oluşur. Akımın artma hızı elektrodu ısıtmaya ve metal iletimi sağlamaya yetecek kadar yüksek, ancak metal damlasının şiddetli ayırmasının neden olacağı sıçramayı en az düzeyde tutacak kadar düşük olmalıdır. Akımın artma hızı güç ünitesindeki “Endüktans”ın ayarlanması ile kontrol edilir. En uygun endüktans ayarı hem kaynak devresinin elektrik direncine hem de elektrotun ergime sıcaklığına bağlıdır. Ark oluşuktan sonra elektrot yeni bir kısa devre oluşturmak üzere ileri doğru beslenirken elektrotun ucu erir (Şekil 4.13, H):



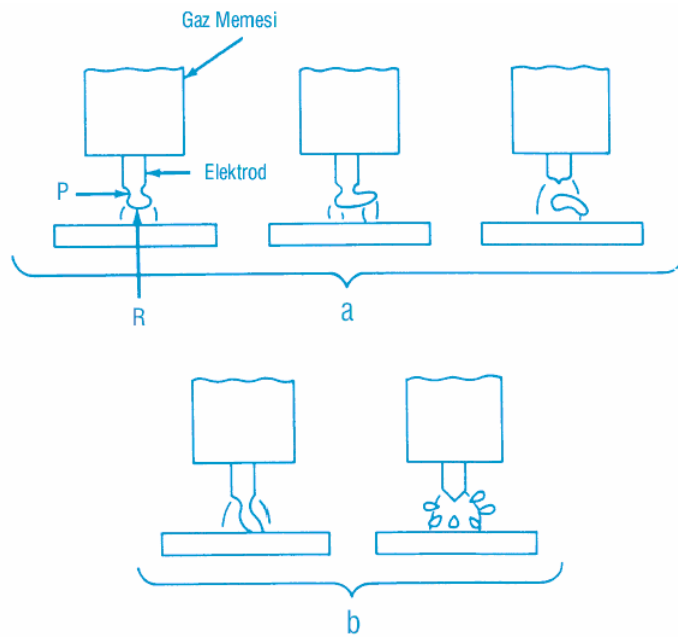
Şekil 4.13 Kısa devre metal iletimi (Eryürek, 2003).

Elektrot ucundaki erimiş metal damlasının esas metale temasını önlemek amacıyla güç ünitesinin açık devre gerilimi düşük tutulur. Arkı sürdürmek için gerekli enerjinin bir kısmı kısa devre sırasında endüktörde depo edilen enerjiden sağlanır. Metal iletiminin kısa devre sırasında oluşmasına rağmen koruyucu gazın cinsinin erimiş metalin yüzey gerilimi üzerinde önemli derecede etkisi vardır. Koruyucu gaz bileşiminin değişmesi, damla çapını ve kısa devre süresini ciddi biçimde etkiler. Buna ilave olarak koruyucu gazın tipi, arkın çalışma karakteristiğini ve esas metale nüfuziyeti etkiler. Karbondioksit soygazlarla kıyaslandığında, genellikle daha fazla sıçrama oluşturur. Ancak CO_2 daha derin nüfuziyet de sağlar (alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında). Nüfuziyetle sıçrama arasında iyi bir denge oluşturmak için genellikle CO_2 ve argon karışımı kullanılır. Argona helyum ilavesi demir dışı metallerde nüfuziyeti artırır.

4.3.3.2 İri Damla İletimi (Uzun Ark)

Doğru akım elektrot pozitif kutuplamada kaynak akımı göreceli olarak düşük ise koruyucu gazın cinsine bağlı olmaksızın iri damla iletimi meydana gelir. Ancak CO_2 ve helyumla bu tip iletim tüm kullanılabilen kaynak akım değerlerinde oluşur. İri damla iletiminin en önemli özelliği damla çapının elektrot çapından daha büyük oluşudur. İri damla yerçekimi etkisiyle kolaylıkla hareket eder. Bu nedenle iri damla iletimi başarılı bir biçimde ancak oluk pozisyonunda gerçekleşir. Kısa devre damla iletiminde kullanılan akımlardan biraz daha yüksek akım değerlerinde, tam asal gaz koruması altında aksel olarak yönlendirilmiş iri damla iletimi elde edilebilir. Eğer ark boyu çok kısa (düşük gerilim) ise tel ucunda büyüyen damla iş

parçasına temas edip aşırı ısınabilir ve parçalanarak aşırı sıçramaya neden olabilir. Bu nedenle ark, damla kaynak banyosuna değmeden önce elektrottan ayrılma imkânı bulacak kadar uzun olmalıdır. Ancak daha yüksek gerilim kullanarak yapılan kaynakların yetersiz erime, yetersiz nüfuziyet ve aşırı dikiş taşması olasılığı yüksektir. Bu ise iri damla iletiminin kullanımını büyük ölçüde sınırlar. Kaynak akımı kısa devre iletimi için kullanılan akım aralığından oldukça yüksekse, karbondioksitle koruma tesadüfi şekilde yönlenmiş iri damla iletimine neden olur. Eksenel iletim hareketinden sapmaya, kaynak akımının oluşturduğu ve erimiş elektrot ucuna etki eden elektromanyetik kuvvetler neden olur (Şekil 4.14). Bu kuvvetlerin en önemlileri elektromanyetik büzme kuvveti (P) ile anot reaksiyon kuvveti (R)'dir.



Şekil 4.14 Eksenel olmayan iri damla iletimi (Eryürek, 2003).

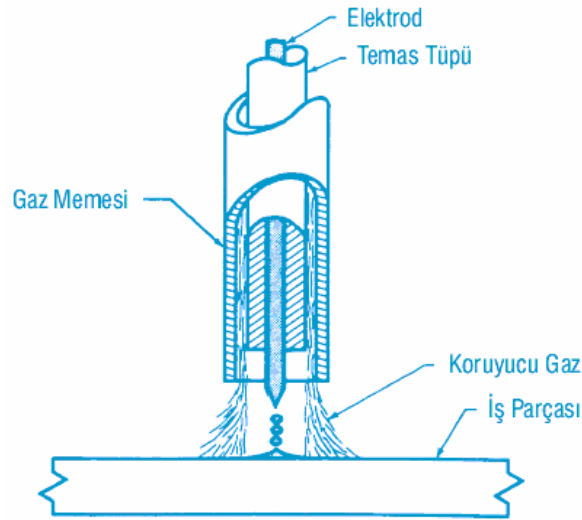
Büzme kuvvetinin (Pinch effect) şiddeti kaynak akımına ve elektrot çapına bağlı olup, bu kuvvet elektrot ucundaki erimiş damlanın telden ayrılmasından sorumludur. CO_2 ile koruma yapıldığında kaynak akımı erimiş damla vasıtasıyla iletilir ve bu nedenle elektrodun ucu ark plazması tarafından sarılmaz. Yüksek hızlı fotoğraf tekniği ile alınan görüntüler arkın erimiş damla yüzeyinden iş parçasına doğru hareket ettiğini göstermektedir. Bunun nedeni R kuvvetinin damlayı destekleme, yani damlanın elektrottan ayrılmasını önleme eğilimidir.

Erimiş damlanın elektrottan ayrılması bu nedenle ya iş parçasına temas edip kısa devre yapınca kadar büyümesi sonucu (Şekil 4.14b) veya yerçekimi kuvvetlerinin etkisi nedeniyle ayrılacak kadar büyümesi sonucu (Şekil 4.14a) oluşur. Bunun nedeni P'nin hiç bir zaman yalnız başına R'den daha etkin hale gelmemesidir. Şekil 4a'da gösterildiği gibi damlanın parçalanma

olmaksızın elektrottan ayrılıp kaynak banyosuna iletilmesi mümkündür. Ancak oluşma olasılığı çok daha yüksek olan iletim Şekil 4.14b’de gösterilmiştir. Burada damla kısa devre yapmakta ve parçalanmaktadır. Bu nedenle sıçrama çok şiddetlidir ve bu olay CO₂ korumasının birçok ticari uygulamada kullanılmasını engeller. Herşeye rağmen CO₂ yumuşak çeliklerin kaynağında en çok kullanılan koruyucu gazdır. Bunun nedeni arkı gömerek sıçrama probleminin önemli ölçüde azaltılmasıdır. Bu şekilde ark atmosferi gaz ve demir buharının karışımından meydana gelir ve hemen hemen sprej tipi bir iletim oluşur. Ark kuvvetleri sıçramanın çoğunu içinde tutan çökmüş bir boşluk yaratmaya yeterlidir. Bu teknik daha yüksek akımlar gerektirir ve bu nedenle derin bir nüfuziyet oluşur. Ancak kaynak hızı dikkatle kontrol edilmedikçe, zayıf ısılatma etkisi aşırı kaynak dikişi taşmasına neden olur.

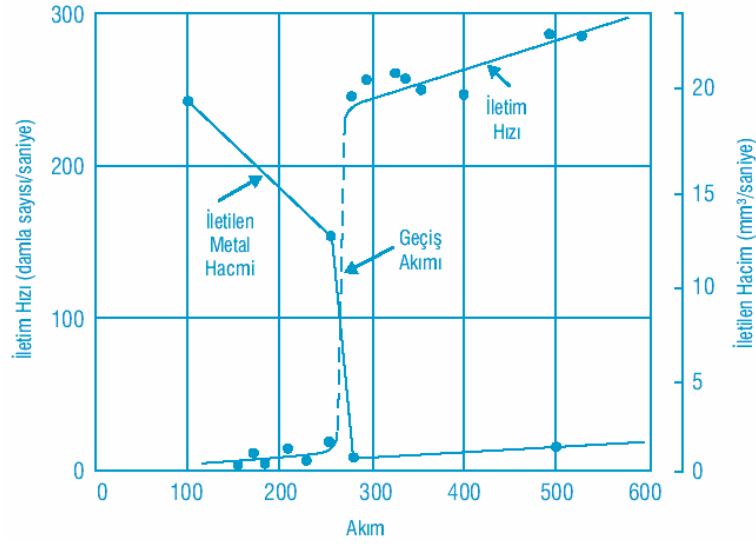
4.3.3.3 Sprej İletimi

Argonca zengin gaz korumasında kararlı, sıçramasız "eksenel sprej" tipi bir iletim elde etmek mümkündür (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Eksenel sprej iletimi (Eryürek, 2003).

Bunun için elektrot pozitif kutupta doğru akım kullanılması ve akım şiddetinin geçiş akımı adı verilen kritik bir değerinin üzerinde olması gerekir. Bu akımın altında iletim daha önce açıklanan iri damla iletimi yoluyla olur ve damla iletiminin hızı saniyede birkaç damladır. Geçiş akımının üzerindeki değerlerde ise iletim, küçük çaplı (elektrot çapından daha küçük çapa sahip) damlaların oluşumu ve bunların saniyede yüzlerce damla iletim hızında ayrılmasıyla oluşur. Bunlar ark aralığı boyunca eksenel olarak hızlanırlar. Damla iletim hızı ile akım arasındaki ilişki Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Damla iletim hızının ve damla hacminin kaynak akımıyla değişimi (Eryürek, 2003).

Sıvı metalin yüzey gerilimine bağlı olan metal “geçiş akımı” elektrot çapıyla ve bir dereceye kadar da serbest elektrot uzunluğu ile ters orantılı olarak değişir. Elektrodun erime sıcaklığı ve koruyucu gazın bileşimi de geçiş akımını etkiler.

Bazı önemli elektrot metallerinin “Geçiş Akımları” Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Sprey damla iletimi kuvvetle yönlendirilmiş damlalar demetinden ibaret olup, damlalar ark kuvvetleri tarafından ivmelendirilerek yerçekimi etkisini yenen hızlara ulaşırlar. Bu nedenle belirli şartlar altında yöntem her pozisyonunda kullanılır. Damlaların çapı ark boyundan daha küçük olduğu için kısa devre meydana gelmez ve bu nedenle de sıçrama, tamamen yok olmasa bile ihmal edilecek mertebe düşer.

Çizelge 4.2 Çeşitli elektrot tipleri için iri damladan spreye geçiş akımları (Eryürek, 2003).

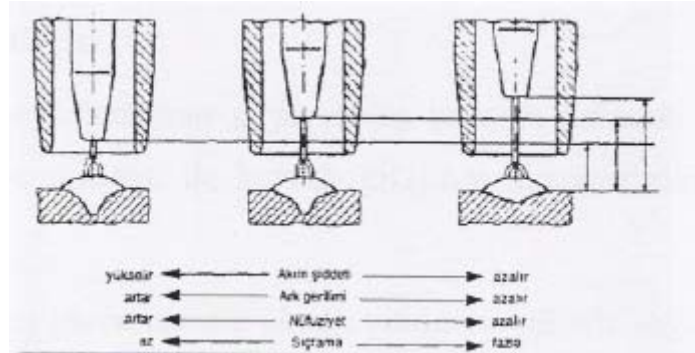
Elektrot Tipi	Elektrot Çapı (mm)	Koruyucu Gaz	Minimum Sprey Ark Akımı (Geçiş) (A)
Yumuşak Çelik	0.8	% 98 Ar + % 2 O ₂	150
	0.9	% 98 Ar + % 2 O ₂	165
	1.1	% 98 Ar + % 2 O ₂	220
	1.6	% 98 Ar + % 2 O ₂	275
Paslanmaz Çelik	0.9	% 98 Ar + % 2 O ₂	170
	1.1	% 98 Ar + % 2 O ₂	225
	1.6	% 98 Ar + % 2 O ₂	285
Alüminyum	0.8	Argon	95
	1.1	Argon	135
	1.6	Argon	180
Deokside Bakır	0.9	Argon	180
	1.1	Argon	210
	1.6	Argon	310
Silisyum Bronzu	0.9	Argon	165
	1.1	Argon	205
	1.6	Argon	270

Sprey damla iletiminin diğer bir özelliği oluşturduğu “parmak izi” şeklindeki nüfuziyettir. Parmak derin olabilmekle birlikte manyetik alanlardan etkilendiğinden, onun kaynak nüfuziyet profilinin merkezinde yer almasını sağlayacak şekilde kontrol edilmesi gerekir. Argon korumasının asal karakteri nedeniyle spre y damla iletimi hemen hemen tüm alaşımlarda kullanılabilir. Ancak spre y ark oluşturmak için gerekli akım değerleri yüksek olduğundan bu yöntemin ince saclara uygulanması zor olabilir. Ortaya çıkan ark kuvvetleri ince sacları kaynak edecekleri yerde keserler. Aynı zamanda bu yöntem e özgü olan yüksek yığma hızları düşey ve tavan pozisyonlarında yüzey gerilimi ile taşınamayacak büyüklükte kaynak banyosu oluşturur.

Spre y ark iletiminin iş parçası kalınlığı ve kaynak pozisyonu ile ilgili bu sınırlamalar, özel olarak tasarlanmış güç üniteleri sayesinde büyük ölçüde ortadan kaldırılmıştır. Bu makinalar hassas bir şekilde kontrol edilen dalga formları ve frekansları oluşturarak “darbeli” akım üretmektedir.

4.3.4 Serbest Elektrot Uzunluğunun Etkisi

Serbest elektrot uzunluğu Şekil 4.17’de gösterildiği gibi, elektrot ucu ile temas tüpü ucu arasındaki mesafedir. Serbest elektrot uzunluğunun artması elektrik direncinde artmaya neden olur. Direncin artması direnç ısıtmasının artmasına, bu da elektrot sıcaklığının yükselmesine neden olur. Elektrot sıcaklığının yükselmesi ise erime hızında küçük bir artmaya neden olur. Bundan daha önemlisi, artmış elektrik direnci temas tüpü ile iş parçası arasında daha büyük gerilim düşüşüne neden olur. Bu güç ünitesi tarafından algılanarak akımı azaltma yoluyla dengelenir. Bu elektrot erime hızını derhal azaltarak elektrodun fiziksel ark boyunu kısaltmasına neden olur. Böylece, kaynak makinasında gerilim arttırılmadıkça, dolgu metali dar ve yüksek bir kaynak dikişi yığar. Arzu edilen serbest elektrot uzunluğu genellikle kısa devre metal iletimi için 6 - 13 mm diğer tip metal iletimleri için, 13 - 25 mm arasındadır.

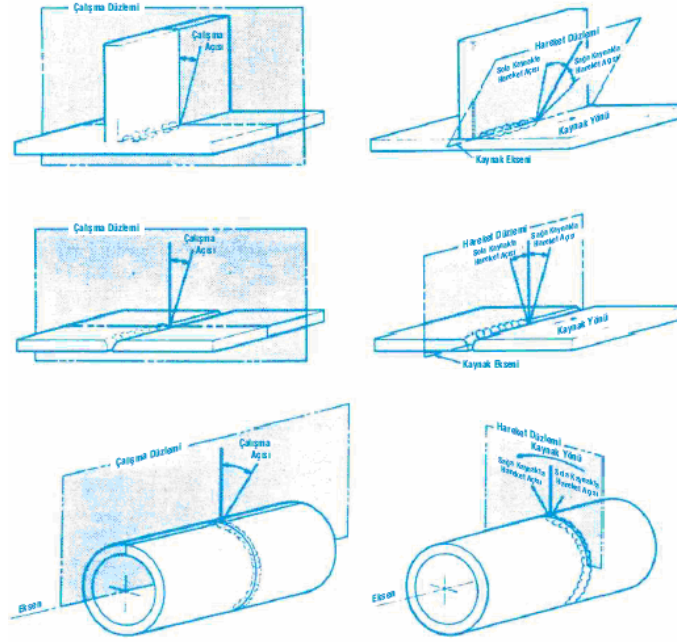


Şekil 4.17 Serbest tel uzunluğunun dikiş formuna etkisi (Tülbentçi, 1998).

4.3.5 Elektrot Açılarının Etkisi

Diğer tüm ark kaynağı yöntemlerinde olduğu gibi, kaynak elektrodunun kaynak bağlantısına göre açıları kaynak dikişi şeklini ve nüfuziyetini etkiler. Elektrot açıları, dikiş şekil ve nüfuziyetini, ark gerilimi ve kaynak hızının etkisinden daha büyük ölçüde etkiler.

Elektrot açılarını tanımlayabilmek için iki düzlemin tanımını yapmak gerekir. Bunlar, çalışma düzlemi ve hareket düzlemidir (Şekil 4.18).

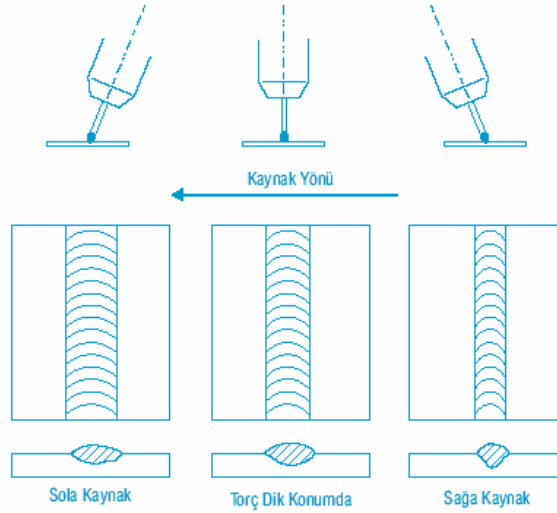


Şekil 4.18 Hareket ve çalışma düzlemleri ve elektrot açıları (Eryürek, 2003).

Kaynak (hareket) doğrultusuna dik olan düzleme “çalışma düzlemi”, kaynak doğrultusu ile elektrottan geçen düzleme de “hareket düzlemi” adı verilir. Bu düzlemler gözönüne alınarak elektrot açıları şu şekilde tanımlanır:

- Hareket düzlemi içinde elektrot eksenine hareket (kaynak) doğrultusuna dik doğrultu arasındaki açı, hareket açısıdır.
- Çalışma düzlemi içinde elektrot eksenine en yakın iş parçası yüzeyi arasındaki açı, çalışma açısıdır.

Elektrodun ucu kaynak yönünün aksi yönüne doğru yönelmişse, bu teknik sağa kaynak, elektrot ucu kaynak doğrultusuna doğru yönelmişse bu teknik sola kaynak olarak adlandırılır. Elektrot açıları ve bunların dikiş şekline ve nüfuziyete etkileri Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



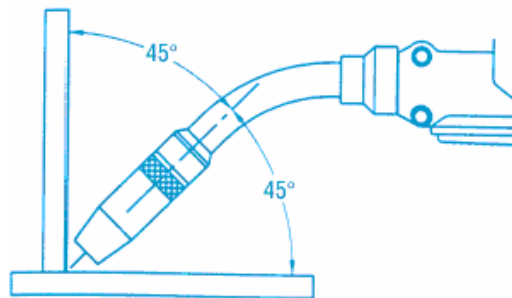
Şekil 4.19 Elektrot açısının ve kaynak tekniğinin etkileri (Eryürek, 2003).

Bütün diğer şartlar değiştirilmeden, hareket açısı sıfırdan itibaren sola kaynak tekniğine doğru arttırılacak olursa, nüfuziyet artar ve kaynak dikişi geniş ve düz hale dönüşür. En yüksek nüfuziyet sağa kaynak tekniği ile hareket açısı 25° iken meydana gelir. Sağa kaynak tekniği, aynı zamanda daha dışbükey ve daha dar bir dikiş, daha kararlı bir ark ve iş parçası üzerinde daha az sıçrama meydana getirir.

Tüm pozisyonlarda, erimiş kaynak banyosunun daha iyi kontrol edilmesi ve korunması için normal olarak kullanılan elektrot açısı 5 ila 15 derece arasında değişen hareket açısıdır.

Alüminyum gibi bazı metallerde sola kaynak tekniği tercih edilmektedir. Bu teknik erimiş kaynak metali önünde “temizlik etkisi” oluşturur. Bu ise ıslatmayı iyileştirir ve esas metalin oksidasyonunu azaltır.

Yatay pozisyonda iç köşe kaynağı yaparken elektrot Şekil 4.20’de gösterildiği gibi düşey parçayla 45° çalışma açısı yapacak şekilde tutulmalıdır.



Şekil 4.20 İçköşe kaynakları için normal çalışma açısı (Eryürek, 2003).

4.4 Isı Girdisi ile Kaynak Bölgesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

4.4.1 Isı Girdisiyle Kaynak Boyutunun Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Kaynak bölgesinin genişliği genellikle ısı girdisi miktarıyla orantılıdır. Gazaltı kaynak yöntemlerinde kaynak için gerekli ısı enerjisi, elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı yardımıyla sağlanır. Dolayısıyla arka daha fazla ısı girdisi olursa, birim uzunluk içinde daha fazla dolgu metali ve ana metal ergimesi olur. Bu da kaynak dikişinin kalınlığını arttırır. Isı girdisinin yanısıra kaynak hızının da kaynak dikişinin boyutu üzerine etkisi bulunmaktadır. Gazaltı kaynağında; akım, gerilim gibi diğer parametreler sabit tutularak kaynak işlemi önce yüksek kaynak hızında, sonra nispeten düşük kaynak hızında yapılırsa; düşük kaynak hızında daha kalın kaynak dikişi meydana geldiği görülecektir. Yani kaynak dikişi kalınlığı kaynak hızı ile ters orantılıdır.

Aşağıdaki denklem ısı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş genişliğiyle ilgili bir yaklaşımdır:

$$w = \sqrt{\frac{H}{500}} \quad (4.6)$$

burada,

w : Kaynak dikişi genişliği,

H : Isı girdisi.

Çizelge 4.3 MIG - MAG kaynağında kaynak parametrelerinin dikiş boyutlarına etkisi
(Tülbentçi, 1998).

Kaynak Parametrelerinin Değişimi	Dikiş Boyutları							
	Nüfuziyet		Ergime Gücü		Dikiş Yüksekliği		Dikiş Genişliği	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Akım Şiddeti ve Tel İlerleme Hızı	↑	↓	↑	↓	↑	↓	*	*
Gerilim	+	+	*	*	*	*	↑	↓
Kaynak Hızı	+	+	*	*	↓	↑	↑	↓
Serbest Tel Uzunluğu	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑
Tel Çapı	↓	↑	↓	↑	*	*	*	*
Koruyucu Gaz	↑	↓	*	*	*	*	↑	↓
Torç açısı	Sağa kaynak	Sola kaynak	*	*	*	*	Sola kaynak	Sağa kaynak

(* Etkisi yok + Etkisi az ↑ Artar ↓ Azalır)

Isı girdisinin dolgu kaynak genişliğine büyük etkisi olduğu denklemde de görülmektedir. Bunun yanısıra işlemin uygulanışının ve polarite gibi diğer parametrelerinde kaynak dikiş genişliğine etkisi bulunmaktadır. Yukarıdaki denklem bize yeni kaynak işlemleri yaratmada veya mevcut yapılmış kaynağın kontrolünde yardımcı olmaktadır.

Örneğin yapılacak kaynak işleminde oluşacak kaynak dikiş genişliğinin minimum olması öngörülüyorsa buna karşılık gelecek uygun miktarda ısı girdisi değeri alınıp formülümüz vasıtasıyla kontrolü yapılabilir.

4.4.2 Isı Girdisiyle Soğuma Hızı Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Isı girdisinin soğuma hızına olan etkisi, ön ısıtma sıcaklığının soğuma hızına olan etkisiyle benzerlik göstermektedir. Kaynak edilen ana metal kalınlığına bağlı olarak, ısı girdisi veya ön tavlama sıcaklığında meydana gelebilecek bir artış soğuma hızının düşmesine neden olacaktır.

Isı girdisi ve ön tavlama sıcaklığı (bu iki değişken), malzeme kalınlığı, özgül ısı, yoğunluk ve ısıl iletkenlik gibi değişkenlerle etkileşime girerek soğuma hızına etkimektedirler.

Soğuma hızı kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgenin metalurjik yapısını belirleyen

önemli bir etkidir. Soğuma hızının etkisi özellikle ısıtıl işlem yapılmış çeliklerde daha fazladır. Su verilmiş veya temperlenmiş çeliklerin kaynağında yüksek ısı girdisi nedeniyle oluşan düşük soğuma hızı, kaynak bölgesine yakın yerlerde metalin yumuşamasına yol açar bu da kaynak edilen malzemenin yük taşıma kapasitesine olumsuz yönde etkir.

4.4.3 Isı Girdisi ile Tepe Sıcaklığı Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Kaynak işlemi esnasında ITAB'da erişilen maksimum sıcaklığa (tepe sıcaklığı) bağlı olarak çeşitli iç yapı ve özellik gösteren bölgeler oluşmaktadır. ITAB'da erişilen maksimum sıcaklık derecesi, kaynak dikişi eksenine olan uzaklığın fonksiyonu olarak bilinirse; soğuma hızının da bilinmesi ile birlikte kaynak işlemi sonucunda oluşabilecek iç yapı, esas metalin bileşimi ve özellikleri gözönünde tutularak bir dereceye kadar tahmin edilebilmektedir.

Pratik bir yaklaşım ile tepe sıcaklığı aşağıdaki denklemle verilmektedir:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (4.8)$$

burada;

T_p : Tepe sıcaklığı (°C)

T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı (°C)

T_m : Malzemenin ergime sıcaklığı (°C)

q : Birim dikiş enerjisi (J/mm)

ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm³)

c_m : Malzemenin özgül ısınma ısı (J/g.°C)

ρc_m : Volumetrik özgül ısı (J/mm³.°C)

t : Malzeme kalınlığı (mm)

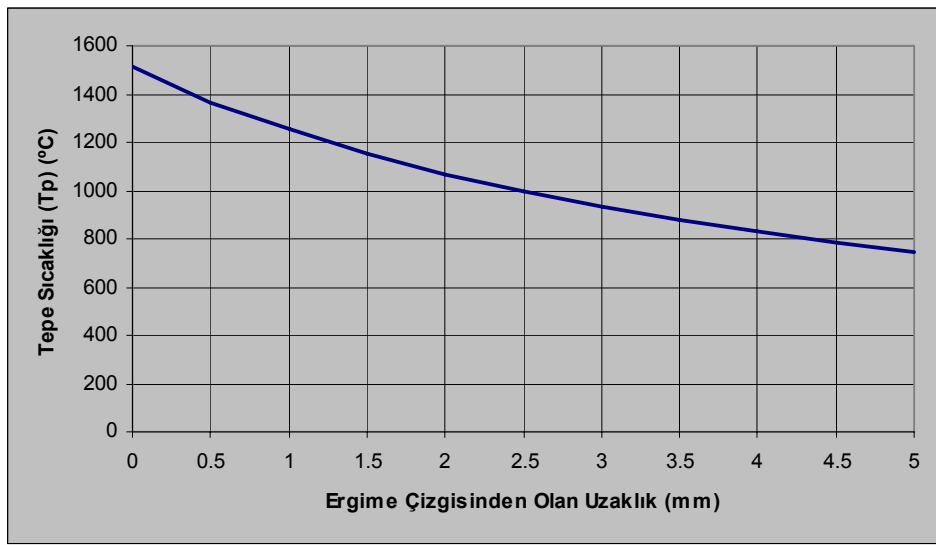
Y : Ergime sınırından uzaklık (mm)

Denklemden görülebileceği üzere ısı girdisi, malzeme özellikleri ve birim dikiş enerjisi birbirleriyle yakından ilişkili olup, tepe sıcaklığına etki etmektedirler. Isı girdisinin artmasıyla ulaşılan tepe sıcaklık değeri artarken yine birim dikiş enerjisinin artmasıyla da tepe sıcaklığı artmaktadır.

Bu denklem, ITAB'da özel bir noktanın sıcaklığının bulunmasında, ITAB genişliğinin tahmininde ve ön ısının, ısı tesiri altındaki bölge üzerindeki etkisinin gösterilmesinde kullanılmaktadır.

Örnek olarak, $U = 20$ V, $I = 200$ A, $V_k = 5$ mm/s, $T_0 = 25$ °C, $T_m = 1510$ °C, $t = 5$ mm, $\eta = 0,8$ ve $\rho_{cm} = 0.0044$ J/mm³.°C değerleri için, Şekil 4.21'de tepe sıcaklık değeri değişimi, ergime çizgisine olan mesafeye bağlı olarak gösterilmiştir.

Ergime çizgisinden 1.5 mm uzaklıktaki noktanın ($Y = 1.5$ mm) tepe sıcaklığı, $T_p = 1153$ °C ve 3 mm uzaklıktaki noktanın ($Y = 3$ mm) tepe sıcaklığı, $T_p = 935$ °C'dir.



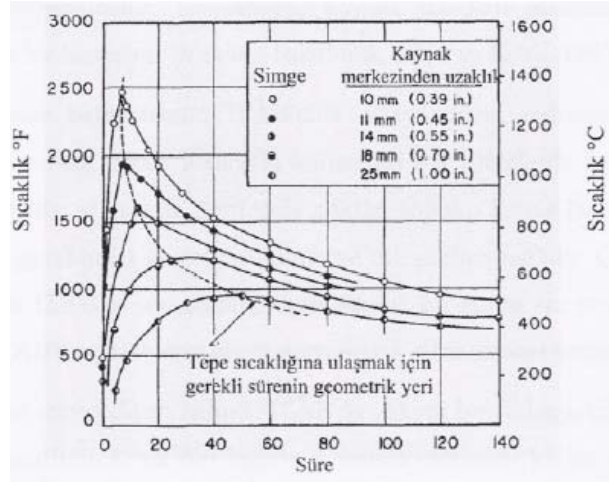
Şekil 4.21 Ergime çizgisinden uzaklaştıkça tepe sıcaklığında meydana gelen değişim.

Şekilden görüldüğü üzere kaynak bölgesinden uzaklaştıkça tepe sıcaklığı azalmaktadır. $Y = 0$ olduğu durumda $T_p = T_m$ olur ki, bu durum erime çizgisinde sıcaklığın erime sıcaklığına eşit olduğunu gösterir.

Denklem ITAB genişliğinin tahmin edilmesinde de kullanılmaktadır. Yalın karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde dağlama sonucunda ITAB sınırı net bir biçimde görülmekte ve bu sınırlar bir metalurjik değişimin meydana geldiği en küçük sıcaklık değerine (730 °C) karşılık gelmektedir. Üstteki örnekteki değerleri kullanarak denklemde $T_p = 730$ °C yazılırsa, $Y = 5.9$ mm bulunur. Bu, 730 °C karakteristik sınırın, erime çizgisinden 5.9 mm uzakta oluşacağını belirtir. Erime çizgisinden 5.9 mm uzaklıktaki bu bölge, kaynak metaline komşu ve yapısal değişime uğramış ITAB'dır.

Bu uygulamaların yanısıra malzemenin bileşimine göre bir metalurjik değişimin meydana

geldiği en küçük sıcaklık değerinin bilinmesi koşulu ile T_0 yerine malzemeye uygulanmış ön tav sıcaklığı yazılıp, denklemden Y değeri çekilerek ITAB genişliği bulunabilir.



Şekil 4.22 13 mm kalınlığındaki çelik bir levhada ITAB'da sıcaklık dağılımları (Welding Handbook, 1976).

Şekilde 13 mm kalınlığında ve ilk sıcaklığı 27 °C olan çelik bir levhada 3940 J/mm ısı girdisi sonucu ITAB'da oluşan sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Buradan şu sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Kaynak merkezinden uzaklaştıkça tepe sıcaklığına ulaşmak için gerekli süre de artmaktadır,
- Tepe sıcaklık değeri, kaynak merkezinden uzaklaştıkça azalmaktadır,
- Kaynak merkezinden uzaklaştıkça ısınma ve soğuma hızı azalmaktadır (Welding Handbook, 1976).

4.4.4 Isı Girdisiyle Kaynak Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Isı girdisindeki değişimler kaynak bölgesindeki malzeme yapısını ve malzeme özelliklerini etkilemektedir. Aşağıdaki tabloda artan ısı girdisi ile bazı özelliklerin nasıl değiştiği verilmiştir. Isı girdisi aralığı 15 ila 110 kJ/in aralığındadır.

Çizelge 4.4 Artan ısı girdisinin malzeme özellikleri üzerine etkisi (Key Concepts in Welding Engineering, 1999).

Özellik	Meydana Gelen Değişim
Akma Dayanımı	↓ 30%
Çekme Dayanımı	↓ 10%
Yüzde Uzama (Sünme)	↑ 10%
Çentik Darbe Dayanımı	↑ 10%, $15 < H < 50$ kJ/in için ↓ 50%, $50 < H < 110$ kJ/in için
Sertlik	↓ 10%

Tablodaki ↑ işareti, belirttiği özelliğin ısı girdisi arttıkça arttığını ifade etmektedir. Tablodaki ↓ işareti ise belirttiği özelliğin, ısı girdisi arttıkça azaldığını ifade etmektedir. Yanındaki yaklaşık oran ise test sırasında verilen minimum ve maksimum ısı girdisi değerleri için, özellikteki değişim aralığını vermektedir.

Çentik darbe dayanımından başka, tüm diğer mekanik özellikler ısı girdisine bağlı olarak tekdüze bir değişim gösterirler. Yani ısı girdisi artarsa sadece artma veya azalma eğilimi gösterirler. Çentik darbe dayanımı ise ısı girdisinin artmasıyla birlikte, önce bir miktar artış gösterir daha sonra ise büyük miktarda bir düşüş gösterir. Çentik darbe dayanımındaki değişimler sadece ısı girdisine bağlanamaz. Bununla beraber kaynak dikişi genişliğinin çentik darbe dayanımı üzerine olan etkisi büyüktür. Daha önce belirtildiği üzere kaynak dikiş genişliğine en büyük etkilerden birini ısı girdisi yapmaktadır. Kaynak dikiş genişliğinin, yüksek ısı girdisine bağlı olarak artması çentik darbe dayanımında bir düşme eğilimine yol açmaktadır.

Çok pasolu kaynak işlemlerinde, bir önceki kaynak pasosundan kalan ısı, kaynak metali üzerinde bir ısı işlem etkisi oluşturarak dayanımın artmasını sağlar. Kaynak dikişleri dar ise daha taneli bir yapı oluşur. Bu da çentik darbe dayanımını artırır.

Elle örtülü elektrot kaynağı elektrodları kullanarak yapılan deneyler sonucunda ısı girdisi değerinin 15 kJ/in ila 110 kJ/in arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan uygulamalar elle örtülü elektrot kaynak yönteminde ısı girdisinin geniş aralıklar içerisinde olabileceğini gösterir.

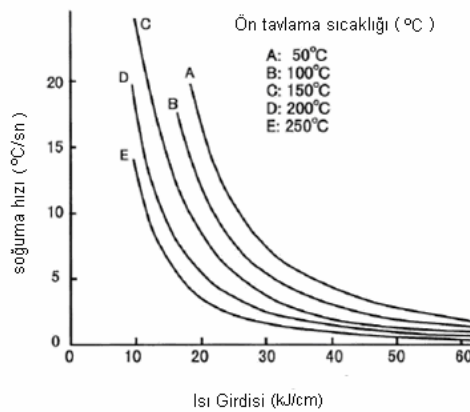
Bir önceki tablonun aksine, eğer ısı girdisi değerindeki değişimler çok küçük ise mekanik özelliklerde de önemli değişimler olması beklenemez. Medlock tarafından 1998’de yapılan çalışmalarda tozaltı kaynak yönteminde ısı girdisi değeri 50 - 90 kJ/in alındığında, ısı girdisi ile kaynak bölgesinin mekanik özellikleri arasında belirgin bir ilişki olmadığı saptanmıştır. Bu durumda test sonuçları farklı özellikler verse de bununla beraber ayırt edici eğilimler saptanmamıştır. Yapılmış tartışmalarda, ısı girdisinin, kaynak bölgesinin ve kaynak bölgesinde ısının tesiri altında kalan bölgenin mekanik özelliklerini ve metalurjik yapısını etkileyebileceğine karar verilmiştir.

Özet olarak ısı girdisi, kaynak esnasında meydana gelen enerji transferinin yaklaşık bir ölçümüdür. Isı girdisi, herhangi bir kaynak yöntemi verilmediği zaman kaynak prosedürünü değerlendirmede önemli bir araçtır. Soğuma hızı, kaynak dikişi kalınlığı ve kaynak metali özellikleri ısı girdisinden etkilenebilirler.

4.4.5 Isı Girdisiyle Kaynak Kalitesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

“Isı girdisi, kaynak arkı tarafından sağlanan elektrik enerjisidir” şeklinde tanımlanabilir. Pratik olarak ısı girdisi (kaynak verim katsayısı gözardı edilirse) kaynak gücü ve kaynak hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu, daha önceki konularda değindiğimiz denklem 4.1’den de görülebilir.

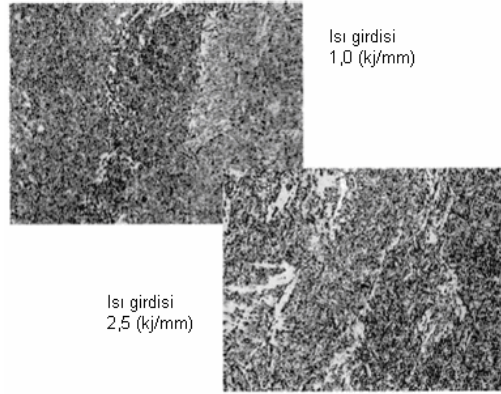
Isı girdisinin en önemli karakteristik özelliği soğuma hızını kontrol ederek ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinin mikroyapısını belirlemesidir. Kaynak mikroyapısında meydana gelen değişiklikler kaynaklı yapının mekanik özellikleri üzerine direkt etki etmektedir. Bu yüzden ark kaynak yöntemlerinde kaynak kalitesini belli bir seviyede tutmak için, ısı girdisini kontrol altında tutmak gerekmektedir.



Şekil 4.22 Ark kaynağında ısı girdisinin soğuma hızına etkisi (Kobelco Welding Today,2000).

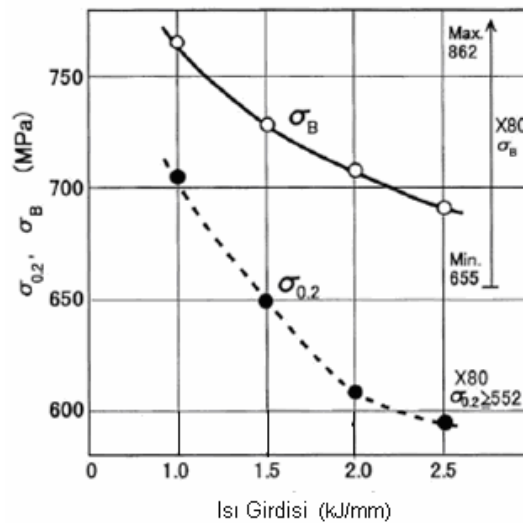
Şekil 4.22’de farklı ön ısıtma değerleri kullanarak 19 mm kalınlığında bir parça kaynaklanmış ve bu parça üzerinde, ısı girdisinin soğuma hızına olan etkisi incelenmiştir. Bu şekil bize şunu göstermektedir. Kaynak edilecek malzeme kalınlığı sabit kalmak şartıyla, özellikle düşük ısı girdisi değerlerinde, ön ısıtma değeri ne olursa olsun ısı girdisinin soğuma hızı üzerine büyük bir etkisi olduğu görülmektedir.

Yapılan bir başka deneyde ise seçilen bir malzeme, diğer parametreler sabit tutularak önce 2.5 kJ/mm’lik bir ısı girdisi kullanılarak kaynaklanmıştır. Daha sonra aynı parça 1.0 kJ/mm’lik ısı girdisi kullanılarak kaynak kaynaklanmıştır. Yapılan bu işlemler sonucunda kaynaklı yapının mikroyapısı incelendiğinde yüksek ısı girdisi kullanıldığında daha kaba (yumuşak) bir mikroyapı elde edildiği görülmüştür.



Şekil 4.23 Gazaltı kaynağıyla farklı ısı girdileri kullanılarak kaynaklanmış iki numunenin mikroyapılarının karşılaştırılması (Kobelco Welding Today, 2000).

Ayrıca yapılan çalışma sonucunda ısı girdisine bağlı olarak kaynaklı bölgede meydana gelen gerilimlere ilişkin bir çizelge de aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.24 Isı girdisinin gerilme dayanımına etkisi (Kobelco Welding Today, 2000).

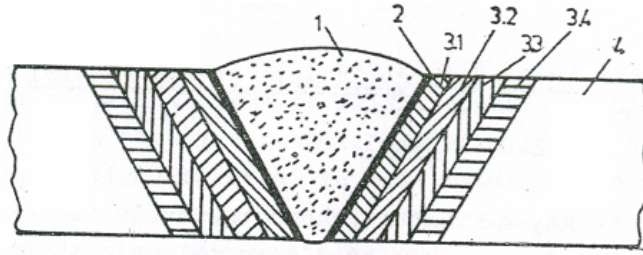
5. GAZALTI KAYNAK YÖNTEMLERİNDE KAYNAK BÖLGESİNİN İNCELENMESİ

Kaynak bağlantısının bulunduğu ve kaynak sırasında ısıdan önemli derecede etkilenen bölgenin tümüne birden “kaynak bölgesi” denir. Kaynak bölgesi; erime bölgesi, geçiş bölgesi, ITAB ve esas metal olmak üzere dört bölgeden oluşmaktadır.

5.1 Erime Bölgesi (Kaynak Metali)

Kaynak sırasında uygulanan ısıнын etkisiyle eriyen esas ve ilave metal bir banyo oluşturur; kaynak banyosu adı verilen bu banyo kaynak sonrası çok hızlı olarak katılaşır. Katılaşma sonucu oluşan bu bölgeye erime bölgesi denir.

Erimiş kısımla, kısmen erimiş geçiş bölgesini ayıran sınıra erime çizgisi denilmektedir. Parlatılmış ve dağlanmış bir kaynak bağlantısında, kısmen erimiş kısım çok ince bir tabaka olduğundan (0.1 – 0.5 mm) çıplak gözle görünen erime çizgisine, aslında geçiş bölgesidir demek yanlış olmaz (Şekil 5.1).

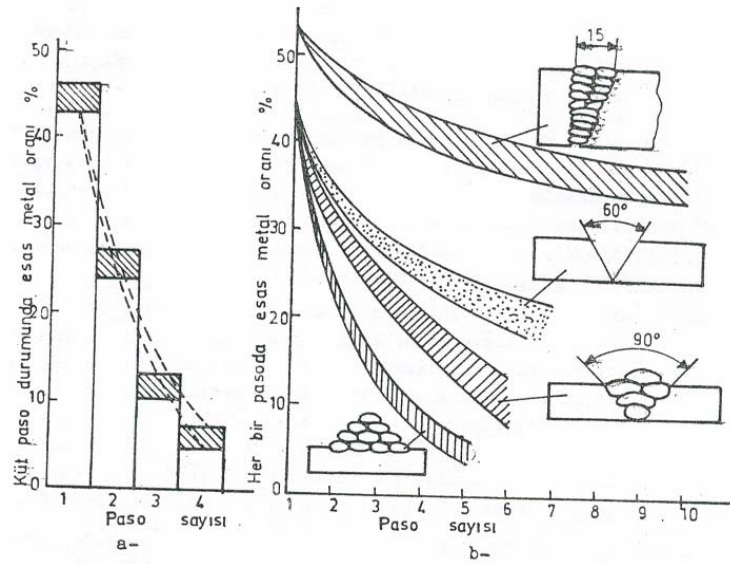


Şekil 5.1 Bir kaynak bölgesinin çeşitli kısımları (Bodur, 1980).

Tek pasolu kaynak dikişlerindeki erime bölgesinde, esas metal ile ilave metal kaynak banyosunda ortaya çıkan türbülans dolayısıyla, katılaşmadan önce birbirine iyice karışır. Buna karşın çok pasolu kaynaklarda, erime bölgesindeki esas metal oranı paso sayısı arttıkça azalır (Şekil 5.2a) ve kaynak ağzı açısı arttıkça erime bölgesindeki esas metal oranı küçülür (Şekil 5.2b). Ayrıca çok pasolu kalın parçaların kaynağında, dikişin orta kısımların da esas metale rastlanmayabilir.

Erime bölgesinde esas metal ile ilave metal oranı tam olarak bilinse dahi, hesap yolu ile erime bölgesinin bileşimi bulunamaz; zira birçok alaşım elemanları kaynak sırasında yanma nedeniyle kayba uğramaktadır. Bu yanmanın derecesi ısı mambağına, kaynak yapılan ortama ve kaynak yöntemine göre değişmektedir. İyi bir kaynak bağlantısı için kaynak bölgesi havanın etkisine karşı korunmalıdır.

- 1 – Erime bölgesi (Kaynak metal)
- 2 – Geçiş bölgesi
- 3 .1 – İri taneli bölge
- 3.2 – İnce taneli bölge
- 3.3 – Kısmen dönüşmüş bölge
- 3.4 – Temperlenmiş Bölge
- 4 – Esas metal



Şekil 5.2 Çok pasolu kaynakta kaynak metalinde esas metal oranının değişimi; a – 4 pasolu bir dolgu kaynağında esas metal oranı, b – Çeşitli kaynak ağız biçimlerinde dolgu kaynağı (Bodur,1980).

Oksijenle oluşan reaksiyonları denetlemek için erime bölgesine çeşitli yöntemlerle dezoksidasyon maddeleri ve yanan alaşım elementlerini karşılamak amacı için de alaşım elementleri katılır. Ayrıca bu bölge bir curuf örtüsü ya da oluşturulan bir kontrollü atmosferle korunur.

5.1.1 Katılaşma

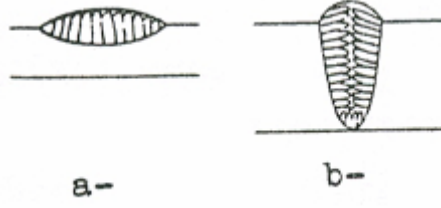
Sıvı durumdaki kaynak banyosu içinde atomlar hareket serbestisine sahiptir. Sıcaklık, metal ya da alaşımın sıcaklığına kadar düşünce, atomların kristal kafesleri oluşturmak üzere birleşmeleriyle çekirdekler ortaya çıkar. Her kristal bir çekirdeğe sahiptir ve buradan büyür.

Bu büyüme kaynak banyosundan metale ve çevreye olan ısı iletimi sonucu oluşan soğumayla meydana gelir.

Çekirdekleşme, kaynak banyosuna kalıp görevi yapan ergimemiş esas metalin yüzeyine yakın yerde, sıvıda asılı bulunan katı partiküllerden başlayabilir. Bunlar heterojen çekirdekleşmenin örneğidir. Eğer heterojen çekirdekler elde edilemezse, katılaşma sıvı içindeki homojen çekirdekleşmeyle başlamalıdır ve bu durum, sıvının normal donma sıcaklığının oldukça altında, soğutulmasını gerektirir. En etkin heterojen çekirdek katılaştıran metalin katı partikülüdür. Bu tip çekirdekleşme kaynak metalinin katılaşmasında en etkin çekirdekleşme tipidir. Gazaltı kaynağında arkın kaynak banyosundan belirli miktar uzaklaşması ile, erimeyi katılaşma takip eder. Ama bir sıvı – katı ara fazı her zaman vardır ve bu, ideal bir çekirdekleşme bölgesi oluşturur. Kaynak banyosunun türbülansı katı metalin sıvı – katı ara fazdan çok zaman ayrılmasına neden olur ve bunlar çekirdek gibi davranır. Ancak çekirdekleşme olayının çoğu, kaynak erime çizgisine yakın yerdeki esas sıvı – katı ara fazında olur. Bir kısmı büyüme süresi sırasında sıkışır kalır. Sonuçta, daha az sayıda, fakat daha büyük taneler oluşur. Mekanik özellikler ise, tane boyutundan etkilenir.

Katılaşma sırasında ortaya çıkan erime ısısı doğal soğuma hızını etkiler, bu da tanelerin fazla büyümesini önler; tanelerin büyüebilmesi için ısının sürekli olarak metalden çekilmesi gerekir. Kaynak sırasında ısının büyük bir kısmı, erime bölgesinden kondüksiyonla esas metale iletilir, dolayısı ile de kaynak metalinde ısı akış doğrultusuna paralel ve izafi olarak daha uzun çubuğumsu bir yapı ortaya çıkar. Bu yapı erime sınırında oluşan tanelerin doğal bir sonucudur ve bu taneler dikkati çeker bir biçimde, katılaşma tamamlanıncaya kadar büyümelerini sürdürür.

Bütün kaynak metali, tamamen çubuğumsu tanelerden meydana gelmez. Tane yapısı metal türüne göre değişebilir. Genel olarak arı metalleri ile dar bir sıcaklık aralığında katılaştıran alaşımlarda çoğunlukla çubuğumsu ve iri taneli yapı oluşur. Özellikle kalın parçaların, tek paso ile yapılmış kaynak dikişlerinde, bu iri silindirik tanelerin birleştiği orta kısımlarda yabancı elementlerin, kalıntıların ve gözeneklerin toplanmasından meydana gelen bir damar oluşur. Bu da çatlama eğilimini arttırarak bu tür dikişlerin zayıflamasına neden olur. Kaynak yönteminin tane yapısı üzerine etkisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Yüzeysel ve derin bir kaynağa ait sütunlu tane yapısı; a – Enlemesine kaynak, b – Uzunlamasına derin kaynak (Bodur,1980).

5.2 Geçiş Bölgesi

ITAB ile kaynak metali arasında kısmen erimiş bir bölge vardır. Bu bölgeye geçiş bölgesi denmektedir. Bu bölgede düşük sıcaklıkta eriyen bazı kalıntılar (sülfür kalıntısı vb. gibi) önceden erir ve bunun sonucu metalik bağlantı zayıflayabilir ve bilinen sıcak çatlakların oluşumuna elverişli bir durum ortaya çıkar.

Düşük enerji girdilerinde geçiş bölgesine ya rastlanmamakta ya da erime çizgisinin sadece belirli bir bölgesinde rastlanmaktadır. Enerji girdisinin artmasıyla bu geçiş bölgesi artmakta ve giderek tüm erime çizgisi boyunca oluşmakta ve ayrıca enerji girdisi ile geçiş bölgesi genişliği de artmaktadır.

Bazı düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çeliklerde yapılan araştırmalar, çatlakların geçiş bölgesindeki beyritik – ferritik yapıya haiz tanelerden başladığını ve sonra tüm dikişe yayıldığını göstermiştir.

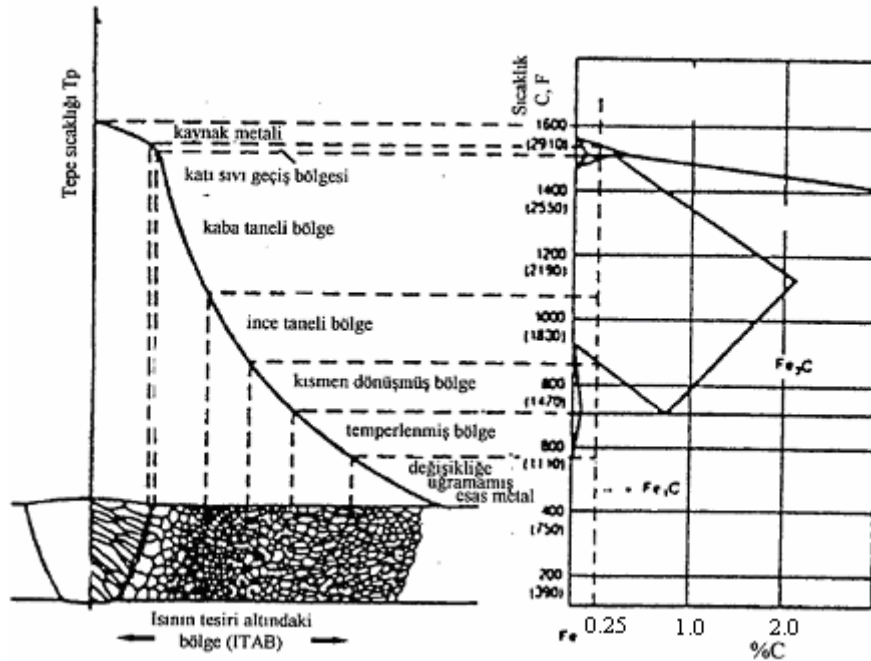
5.3 Esas Metal

Kaynak dikişinin dördüncü elemanı birleştirilecek olan esas metaldir. Günümüzde elde edilen mühendislik malzemelerinin pek çoğu kolayca kaynak edilebilir. Fakat bütün özellikleri koruyabilecek biçimde başarılı kaynak yapmak için güçlük gösteren malzemelerde vardır. Bu yüzden belirli bir amaç için malzeme seçiminde performans özellikleri ile birlikte eldeki yöntemle göre malzemenin kaynak sırasındaki davranışı gözönüne alınmalıdır. Çok kez, malzeme ve uygulama, bağlantı işlemi ya da yöntemi o kadar geç ele alınmaktadır ki, olması gereken değişiklikler zayıf ekonomi ya da zayıf verimle sonuçlanır. Bağlantı açısından kaynak sisteminin ana özelliği kaynak kabiliyeti denen karmaşık bir özelliktir.

5.4 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

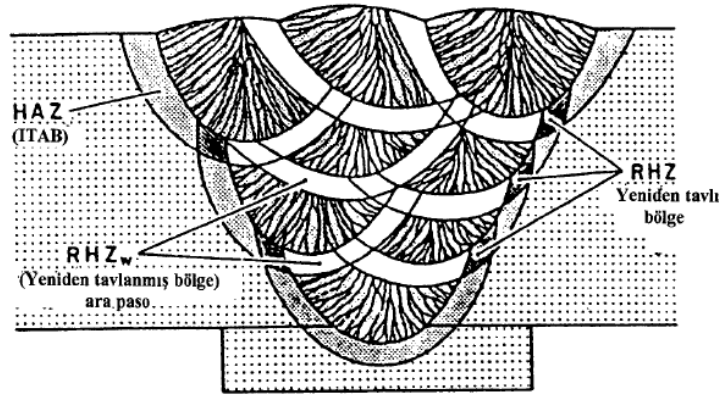
Isının tesiri altında kalan bölge kaynak metalinin (diğer bir deyişle eriyen bölgenin), esas metal ile birleştiği kısımdan itibaren 1400 ila 700 °C arasındaki bir sıcaklığın etkisi altında bulunan bölgedir. Eğer ısının tesiri altında kalan bölgede erişilen en yüksek sıcaklık, kaynağın merkezine olan mesafenin bir fonksiyonu olarak bilinir ve esas metal tipi ile şartları da tanınırsa, kaynak işlemi sonunda meydana gelecek yapıyı normal olarak önceden tahmin etmek mümkündür (Şekil 5.4). Bunun yanında, birçok hallerde soğuma hızını da hesaba katmak gerekir. Bilhassa, kalın parçaların kaynağında soğuma daha da çabuk olacağından, 900 °C nin üzerinde tavlanan bölge, bir nevi su verme işlemine tabi tutulmuş sayılır. Neticede de kaynak yapılan çeliğin bileşimine göre, bu kısımda çok yüksek bir sertlik elde edilir ve gevrek bir bölge meydana gelir.

Genellikle, ısının tesiri altında kalan bölge diye tarif edilen bu kısım, bir kaynak bağlantısının en kritik bölgesini teşkil eder ve birçok çatlama ve kırılmalar burada olur. Kaynakta ısının tesiri altında kalan bölgenin sertleşmesi, bilhassa karbonun % 0.25 üzerinde bulunan alaşımsız karbonlu yapı çelikleri ile yüksek mukavemetli hafif alaşımlı yapı çeliklerinin kaynak kabiliyetini etkileyen önemli faktörlerden biridir.



Şekil 5.4 Tek paso ile kaynatılmış HSLA çeliğinde oluşan ısıdan etkilenmiş bölgenin demir – karbon (Fe₃C) diyagramı ile birlikte şematik görünüşü (Liu, 1992).

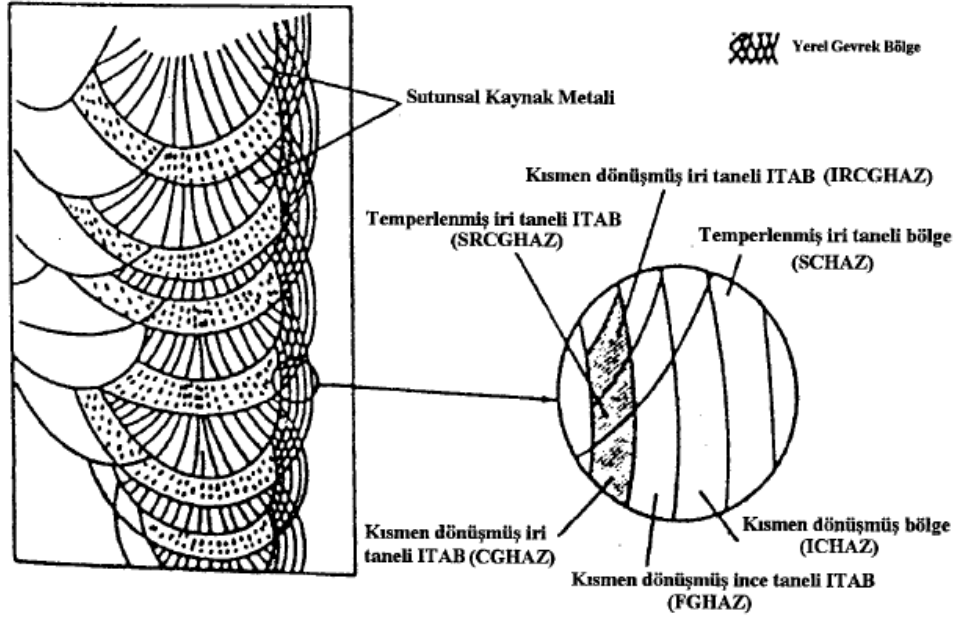
Çok pasolu kaynakta başarılı pasolar nüfuziyet bölgesindeki mikroyapıları ve önceki pasolardaki ısıdan etkilenmiş bölgeyi tekrar ısıtmakta ve değiştirmektedir. Yeniden ısıtılan bölgeler Şekil 5.5'te şematik olarak gösterilmektedir. Yeniden ısıtma sonucu östenit taneciklerinin boyutları artmakta, kaynak tokluğu azalmaktadır. Kaba taneli bölgede yüksek karbonlu martenzit adaları değişmeksizin kalabilir veya yeniden ısıtma sonucu ulaşılan tepe sıcaklığı nedeniyle sertleşebilirler. Kaba taneli yeniden ısıtılmış bölgelerdeki mikroyapısal özelliklerin tek pasolu kaba taneli bölgedeki özelliklerle benzer olduğu saptanmıştır. İnce taneli yeniden ısıtılmış bölgede meydana gelen tane incelmesi genellikle önceki kaba taneli bölgenin tokluğunu iyileştirmekte, artırmaktadır. Bununla birlikte üstteki beynit kaynak ısı çevrimleri boyunca değişmeden kalmaktadır (Losz, 1990).



Şekil 5.5 Çok pasolu bir kaynakta kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bölgelerde var olan tekrar ısıtılmış bölgelerin şematik gösterimi (Liu, 1992).

Bazı mikro alaşım çökeltileri birleşerek ve çevreleyen matriksi gererek tokluğu düşürebilirler. Böylelikle kritik arası yeniden ısıtılan kaba taneli bölge ve kritik altı yeniden ısıtılan kaba taneli bölge müteakip yeniden ısıtma işlemlerinden diğer bölgelere nazaran daha fazla etkilenirler (Losz, 1990).

Çok geçişli kaynaklardaki dayanımın bozulması yerleşik kırılma bölgeleri olarak bilinen sınırlı şekillendirilebilirlik ve çatlak dayanımı ile ilgili bazı küçük bölgelerle ilişkilendirilmektedir. Bu bölgeler, kaba taneli bölgeler ve kritik altı yeniden ısıtılmış kaba taneli bölgeler şeklinde şematik olarak Şekil 5.5'te gösterilmektedir (Liu, 1992).



Şekil 5.6 LBZ'yi (localized brittle zones) oluşturan farklı bölgelerin şematik gösterimi (Liu,1992).

Bir nüfuziyet hattına komşu olan bölgelerde, LBZ'ler nüfuziyet hattı boyunca veya buna yakın bölgelerde çatlaklar için geçiş yolları oluştururlar. Yeniden ısıtılmış ITAB'taki sertlik dağılımı da Şekil 5.6'da gösterilmiştir (Liu, 1992).

Bazı malzemelerde kaynak etkisi, atıfta bulunulan ısı tesiri altındaki bölgedeki kısma bağlı olarak hem hızlı ısınma ve soğuma şeklinde hem de bir tavlama döngüsü şeklinde eş zamanlı olabilmektedir. Bundan dolayı kaynak ısısının, ısı tesiri altındaki bölgedeki çeşitli etkilerini anlamak için, bu etkileri dört farklı tipteki kaynak yapılabilen metal alaşımları açısından incelemek gerekmektedir. Bunlar: (1) alaşımlandırma ile (katı solüsyon ile) güçlendirilen metal alaşımlar, (2) soğuk şekil değiştirme yöntemi ile (soğuk işleme) güçlendirilen alaşımlar, (3) çökelme ile sertleştirilen alaşımlar, (4) dönüşümle sertleştirilen alaşımlar. Bazı malzemeler bu yöntemlerden birden fazlası ile güçlendirilebilmesine rağmen, basitleştirme açısından yöntemler ayrı ayrı düşünülecektir.

5.4.1 Alaşımlı Malzemelerde ITAB

Yalnız alaşımlandırmayla kuvvetlendirilmiş malzemeler ele alınıp, ısı tesiri altında kalan bölge gözönüne alınırsa, bunlardan katı solüsyonla kuvvetlendirilmiş olanların kaynaklanabilirliği daha iyidir. Eğer alaşımlandırma esnasında malzeme herhangi bir şekil değişimine maruz kalmazsa, ısı tesiri altındaki bölge kaynak işleminde oluşan ısıdan daha az etkilenir. Ergime çizgisinin yanındaki bölge, malzemenin ergime sıcaklığına çok yakın bir

sıcaklık değerine kadar ısıtılacak olursa, bu bölgede bir takım tane büyümeleri olabilir. Genellikle bu durumun sadece malzeme özellikleri üzerinde az bir etkisi olacaktır fakat bazı kübik hacim merkezli metaller için, özellikle ısıya dayanıklı metallerde, kaynak dolayısıyla oluşan ısı tesiri altındaki bölgedeki iri tane boyutu malzemelerin geçiş sıcaklıklarını arttırabilir ve sertliğini azaltabilir.

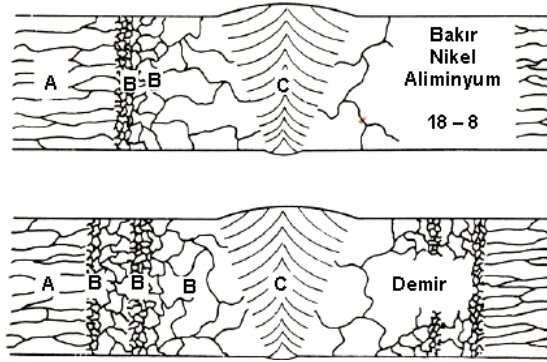
Bazı malzemeler ısı işlemlerle kazanamadıkları mekanik özellikleri alaşımlandırma yöntemiyle kazanabilmektedirler. Örneğin, sıcak haddelenmiş çelikler istenilen mekanik özelliklerini tavlama işlemi ile kazanamazlar fakat karbon, manganez ve birtakım diğer alaşım elementleriyle alaşımlandırılmak suretiyle bu malzemelere istenilen mekanik özellikler kazandırılabilir. Alaşımlandırılan bu malzemeler kaynaklandığında, bazı durumlarda ısı döngüsünden dolayı kaynak edilmiş bölgenin yapısı martenzite dönüşmektedir. Bu dönüşüm ısı tesiri altındaki bölge özelliklerinde büyük bir değişime yol açar. Bu malzemeler, şekil değiştirme ile sertleştirilen alaşımlar gibi düşünülmelidir. Bu tipteki malzemelerden daha sonra bahsedilecektir.

Alaşımlandırmayla kuvvetlendirilebilen malzemelerin arasında tavllanmış alüminyum alaşımları, tavllanmış bakır alaşımları ve karbon içeriği çok düşük olan sıcak haddelenmiş veya tavllanmış çelikler yer almaktadır. Tavllanmış ferritik ve östenitik paslanmaz çelikler de aslında aynı kategoriye girmektedir, fakat östenitik paslanmaz çeliklerde kaynak sonucu ısı tesiri altındaki bölgede “duyarlılık” adı verilen özel bir problem meydana gelmektedir. Östenitik çeliklerdeki yüksek krom seviyesi (yaklaşık %18), paslanmaya karşı iyi bir dayanım sağlamaktadır. Buna karşın östenitik paslanmaz çelikler kaynaklandığı zaman çeliğin içerisinde bulunan mevcut krom, karbonla birleşerek krom karbürleri oluşturur. Bu krom karbürlerde ısı tesiri altındaki bölgedeki (yaklaşık olarak 550 °C ve 650 °C (1020 ve 1200 °F) arasındaki bölge) tane sınırlarında çökelerek burada birikirler, bu da kaynaklı yapıdaki kırılganlığı arttırmaktadır. Tane sınırlarında çökelmiş olan karbürlerin çözünmesini sağlamak ve meydana gelen bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için üç yöntem uygulanmaktadır.

- a) Çeliğin karbon içeriğinin azaltılması veya düşük karbon içeren çelik kullanılması.
- b) Çeliğin karbonla birleşebilen alaşım elemanlarıyla (titanyum veya kolumbiyum) alaşımlandırılması.
- c) Kaynak parçasının 980 °C (1800 °F)’ye kadar tekrar ısıtılması ve hızlı bir şekilde oda sıcaklığına kadar soğutulması.

5.4.2 Soğuk Şekil Değiştirme Uygulanmış Malzemelerde ITAB

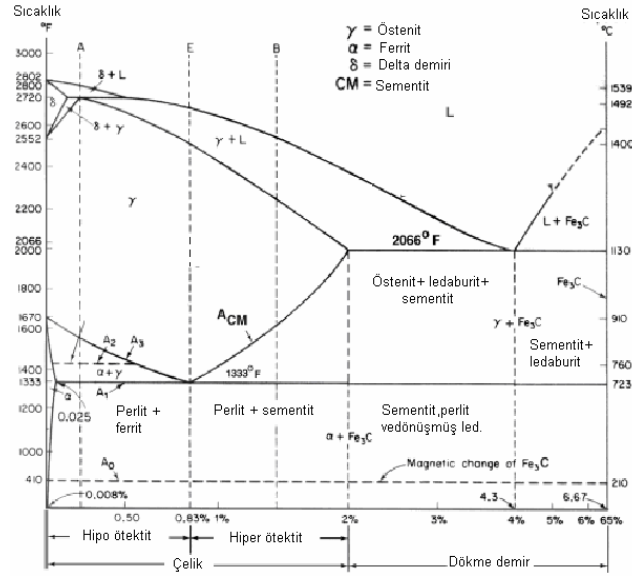
Şekil değiştirme yöntemi ile sertleştirilen malzemelerde, malzemenin ergime noktalarına yakın sıcaklıklarda malzemelerde yeniden kristalleşme gerçekleşeceği için, soğuk şekil değiştirme yöntemiyle sertleştirilmiş malzemeleri içeren bir kaynakta, ısı tesiri altındaki bölgenin soğuk şekil değiştirmeye kazanmış olduğu sertliğin önemli ölçüde yumuşatılacağı beklenilir. Bu malzemelerde ısı tesiri altındaki bölge yapısı Şekil 5.7’de gösterildiği gibi olacaktır. Şekilde soğuk işlem uygulanan ana metal, mekanik deformasyondan kaynaklanan uzun ve kırılmış tipik tanelerden oluşmaktadır.



Şekil 5.7 Soğuk şekillendirilmiş metallerde kaynaklı bölgeye komşu alanlarda yeniden kristalleşme durumu (Weisman,1976).

Isı tesiri altındaki bölgedeki bazı noktalarda, ana metal yeniden kristalleşmeye yetecek kadar yüksek sıcaklığa erişir ve bu durum, mikro yapıda eş eksenli ince tanelerin mevcut olması ile belirlenmektedir. Eğer soğuk işlem erime çizgisine yakın sıcaklık değerlerinde uygulanılacak olursa, yapı tamamıyla yeniden kristalleşir ve oluşan yeni tanelerin boyutu büyür. Beklendiği gibi, ısı tesiri altındaki bölgede meydana gelen bu iri taneli bölgenin mukavemeti soğuk şekil değiştirme ile artış göstermez. Bu yüzden bu bölgenin mukavemeti, ana metalin soğuk işlem mukavemet seviyesinden daha yumuşaktır.

Bu gibi durumlarda, kaynak parçası genellikle ana metal için mukavemet şartlarını sağlayamayacaktır ve dayanım gerektiren yerlerde daha düşük bir mukavemet değerinin gözönüne alınması gerekecektir. Sonuç olarak, kaynak parçasının mukavemeti, muhtemelen tavlanmış plakanın mukavemetine yakın olacaktır.



Şekil 5.8 Demir karbon faz diyagramı.

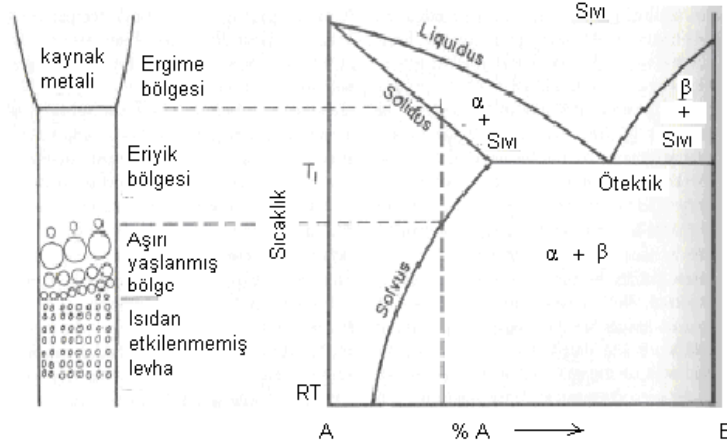
Soğuk işlem uygulandıktan sonra ısıtıldığında şekil değiştiren malzemelerde kaynağın malzeme yapısı üzerine etkileri daha karmaşıktır. Şekil 5.7’de gösterildiği gibi, bu malzemeler (özellikle demir ve çelik alaşımları) iki tane yeniden kristalleşme bölgesine sahiptirler. İlk bölge, ısıtılma uygulanan düşük sıcaklıktaki alfa fazının (bkz. demir karbon faz diyagramı, Şekil 5.8) yeniden kristalleşmesi sonucu oluşur. İkinci yeniden kristalleşme bölgesi ise ferrit fazının 723 ve 910 °C (1333 ve 1670 °F) arasında bir yeniden kristalleşmeye neden olan gama fazına dönüşmesi sonucu oluşur. Bu nedenle bu alaşımların mikroyapısı ısı tesiri altındaki bölgede iki ayrı yeniden kristalleşme bölgesi gösterecektir.

5.4.3 Çökelme Sertleştirilmesi Uygulanmış Malzemelerde ITAB

Çökelme ile sertleştirilen alaşımlar, soğuk işlemle sertleştirilen alaşımlar gibi kaynak ısısına cevap verir; yani ısı tesiri altındaki bölge bir tavlama döngüsü geçirecektir. Ancak bu durumda bölge tepkisi daha karmaşıktır çünkü erişilen en yüksek sıcaklığa bağlı olarak kaynak ısı döngüsü, ısı tesiri altındaki bölgenin farklı alanlarında farklı etkiler oluşturur. Normal olarak bu tipteki alaşımlar kaynağa yakın sıcaklıklarda, metal erime noktasına yakın sıcaklığa kadar ısıtılır. Kaynak ısı döngüleri genellikle hızlı olduğu için, bu işlemten sonra soğuma hızı, genellikle su verme sureti ile sertleştirmeyi sağlayabilmek için yeterince hızlıdır ve elde edilen yapı bir tek fazlı katı çözelti bölgesidir. Bu bölge genellikle oldukça yumuşaktır ve çoğunlukla iri tane içerir fakat yaşlandırma işleminin ardından bir kaynak işlemi uygulanması ile sertleştirilebilir.

Bu bölgenin yanındaki bölge katılaşma eğrisi işlem sıcaklığına yakın fakat bu sıcaklığın

altında bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu yüzden bu bölge, kaynak ısı döngüsü süresince “aşırı yaşlanmış” olacaktır. Bağlantı, çözeltiyle sertleştirme işlemi ve bir su verme suretiyle sertleştirme işlemi ile tamamıyla yeniden işlenmedikçe bunu izleyen ısıl işlem bu bölgeyi yeniden sertleştiremez ve yaşlandırma döngüsü uygulanır. Kaynaklı bölgeden daha uzaktaki bölgelere hafif bir yaşlandırma işlemi uygulanabilir ancak bölgenin sıcaklığı çözeltiyle sertleştirme işleminde kullanılan sıcaklığa yakın sıcaklığa kadar yükselmedikçe bunun genellikle az bir etkisi olacaktır.



Şekil 5.9 Çökelme (presipitasyon) ile sertleştirilen alaşımların ısı tesiri altındaki bölgesinde oluşan alanlar (Weisman,1976).

Yüksek mukavemetli, çökelme ile sertleştirilebilen alaşımları mukavemet kaybı olmaksızın kaynaklamak hemen hemen mümkün olmasa da, bu mukavemet kaybını azaltmak için birkaç teknik kullanılabilir. Bu tekniklerden en etkin olanı yeniden çözeltide sertleştirme işlemi, su verme suretiyle sertleştirme işlemi ve kaynak parçasının yaşlandırılmasıdır. Bu teknik, uygulanması en zor olanıdır ve büyük kaynak parçalarına uygulanması pratik olmayabilir. İkinci bir yaklaşım sadece kaynak parçasının yeniden yaşlandırılmasıdır. Bu işlem, ısı tesiri altındaki bölgenin işlem uygulanmış alanının mukavemetini yükseltir ancak aşırı yaşlanmış bölgenin mukavemetini iyileştirmez. Üçüncü yaklaşım, kaynak parçasındaki mukavemet kaybını kabullenmek ve bu temele bağlı olarak tasarım yapmaktır – bu yaklaşım uygun maliyetli olmayan bir prosedürdür. Çünkü aynı mukavemet seviyesine sahip alaşımla güçlendirilmiş malzemeler, yüksek mukavemetli çökelme ile sertleştirilen alaşımlardan genellikle daha az maliyetlidir. Diğer bir alternatif, çözeltiyle sertleştirme işlemi uygulanmış şeklindeki alaşımı, kaynaklamak ve kaynaklama işleminden sonra sadece yaşlandırma işlemi uygulamaktır. Aşırı yaşlanmış bölge hala zayıf olmasına rağmen bütün etkiler gözönüne alındığında bu etkilerin, yaşlandırılmış ve kaynaklanmış koşullar üzerinde etkili olduğu

söylenbilir.

Kaynak ısı döngüsü ısı işlem uygulanan malzemenin mukavemetini zayıflattığı için, bu alaşımlar kaynaklanırken yüksek ısı giriş yöntemlerinden her zaman sakınılması tavsiye edilir. Bu nedenle, çökeltme ile sertleştirilen alaşımlardaki kırıntı kaynakları en iyi bağlantı yeterliliğini sağlarken, tozaltı kaynağı veya elektrocüruf kaynaklar bağlantı yeterliliği en az olan kaynak yöntemleridir.

Genellikle çökeltme ile sertleştirilen alaşımlarda oluşan fakat hiçbir şekilde bu alaşımlara özgü olmayan diğer problem, ısı tesiri altındaki bölgedeki sıcak kırılmadır. Bu çatlaklar, kaynak erime çizgisinin yanındaki bölgelerin, bazı fazların eridiği sıcaklığa kadar ısıtılması sonucu oluşur. Eğer bu fazlar tane sınırları yakınında veya tane sınırları boyunca yer alıyorsa, sınırlar ve granüller arası ayrışmaya neden olurlar.

Bunlar çoğu durumda kaynak metalindeki sıcak kırılmalar gibidir ancak genellikle küçük boyutludur (bazen mikro çatlak şeklinde adlandırılır) ve erime çizgisinin yanında fakat ısı tesiri altındaki bölge tarafında yer alırlar. Bu tipteki sıcak kırılmalar genellikle ana metal kompozisyonunun kontrol edilmesi ile giderilir.

5.4.4 Dönüşme ile Sertleştirilmiş Malzemelerde ITAB

Dönüşme ile sertleşebilen çelikler, kaynak sıcaklığından itibaren soğumada iç yapıda martenzit oluşturacak derecede yeter miktarda karbon ihtiva eden çeliklerdir. Bu çelikler, kaynak öncesi temperlenmiş martenzit elde etmek için ısı işlem görmüş olabilecekleri gibi, yalnız bir dönüşme işlemi ya da daha önce hiçbir ısı işlem görmemiş olmasına rağmen, martenzite dönüşebilecek bileşimi haiz çelikler de olabilir. Her iki halde de ITAB'taki alanların sırası aşağı yukarı aynıdır.

5.4.4.1 İri Taneli Bölge

Erime çizgisi yanında erime noktasına kadar ısınmış olan bölgedir. Bu bölge östenit sıcaklık alanına kadar aşırı ısınmış malzemeden oluşur. Bu malzeme tamamen iri tanelidir ve soğuma hızı yeter derece yüksek ise, kolayca martenzite dönüşebilir. Normal olarak yüksek sertliğe sahip bir bölge oluşur.

Bilindiği gibi metaller yeniden kristelleşme sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında, tane büyümesi olur. Bazı taneler büyür ve kısmen veya tamamen küçük tanelerin yerine geçer, bunun sonucu olarak da ortalama tane boyutu büyür. Tane büyümesi

hızı, sıcaklık arttıkça artar ve metalin solüdüsüne yaklaşıldığında daha çok hızlanır. İri taneli yapılar ince taneli yapılara göre daha gevrek ve kırılgan olduklarından, istenmeyen bir iç yapıdır.

Çeliklerde kaynak sırasında erime çizgisine bitişik olan esas metal solidusa yakın bir sıcaklığa eriştiğinden, östenit içinde fazla miktarda tane büyümesine rastlanır. Bir çeliğin kaynak kabiliyeti açısından tane büyümesi çok önemlidir; zira soğuma olayı sırasında ortaya çıkan dönüşümlere östenit tane büyüklüğünün etkisi oldukça şiddetlidir.

Östenit tane büyüklüğüne etkiyen faktörleri belirlemek amacı ile Berkhout ve Van Lent iki ayrı bileşimdeki çeliğe çeşitli ısı çevrimler uygulamışlardır. Isıtma hızı, maksimum sıcaklık derecesi ve soğuma hızı bağımsız değişken olarak alınmış ve östenit tane büyüklüğü, parça hızlı soğutulularak ölçülmüştür. Martenzitik iç yapıyı haiz parçalar üzerinde dağlama sonucu ilkel östenit taneleri bulunmuştur.

Bu çalışma sonucunda, östenit tane büyüklüğünün büyük ölçüde erişilen maksimum sıcaklık derecesi ile ilgili olduğunu, ısıtma ve soğutma hızındaki değişimin her iki çelikte de araştırılan alan içinde tane büyümesine çok az oranda etkidiğini belirlemişlerdir.

Gene aynı araştırmacılar, östenit tane büyüklüğünü, verilen ısının ve erime çizgisinden olan mesafenin fonksiyonu olarak ölçmüşler ve kaynak ısısının artması ile, erime bölgesine bitişik bölgede tane büyüklüğünün arttığını görmüşlerdir. Bu aslında beklenen bir olaydır, çünkü ısı girdisi arttıkça sıcaklık alanı genişlemektedir.

5.4.4.2 İnce Taneli Bölge

İri taneli bölgenin bittiği yerde başlar. Bu bölge ancak östenitleşme sıcaklığına kadar ısınmıştır. Normal olarak ince taneli bir yapıya sahiptir ve kolayca martenzite dönüşmez. Yalnız orta derece bir sertliği vardır.

5.4.4.3 Kısmen Dönüşmüş Bölge

İnce taneli bölgenin bir devamı olup, kaynak sırasında A3 ile A1 arası bir sıcaklığa kadar ısınmıştır; bu nedenle kısmen östenitleşmiştir ve karışık taneli bir yapıya sahiptir. Soğuma sonucu bu bölgede de az bir miktar martenzit oluşabilir. Bu bölge genellikle çok sert değildir; fakat eğer martenzit varsa, bir parça gevrek olabilir.

5.4.4.4 Temperlenmiş Bölge

ITAB'ın sonuncusudur. Bu bölgede metal östenit oluşabilecek derecede yüksek sıcaklığa kadar ısınmamıştır; yani bir iç yapı değişikliği olmamıştır. Burada kaynak sırasında erişilen maksimum sıcaklık A1 (723°C)'nin altında bulunur; fakat kaynak ısısı yumuşatma tavlama görevi yapar.

Tanımlanan bu bölgeler kaynak işlemi ve yöntemlerinden bağımsız değildir. Düşük kaynak enerjisi dar bir ITAB oluşturur; fakat yüksek soğuma hızına da neden olur. Bu yüzden de martenzit oluşur. Yüksek ısılı kaynaklar daha geniş ITAB'lar meydana getirir, fakat daha yavaş soğuma hızı sağlayabilir. Böylece sonuçta ITAB daha yumuşak olur.

ITAB'da martenzit, genellikle çıkardığı bazı sorunlardan dolayı istenmez. Bunların ilki, bu bölgenin özelliğini ilgilendirir. Yapı sert, ama çokçasına gevrek de olur ve bu nedenle de pek istenmez. Bu gevreklik normal olarak karbon miktarı arttıkça artar.

İkinci olarak, martenzitin varlığı kaynak metalinde olduğu gibi bu ITAB'da da soğuk çatlağa ya da gecikmiş çatlağa neden olabilir. Yalnız başına martenzit, çatlamaya neden değildir. Martenzite ek olarak iki faktöre daha ihtiyaç vardır. Bunlarda hidrojen ve kalıntı gerilmelerdir. Kaynakta bu üç faktör kontrol edilebilirken, bu tip çatlama kaynak metallerinden daha çok ITAB'larda görülür ve bu yüzden dikiş altı çatlağı olarak bilinir.

Bu çatlağı önlemek için izlenen işlemlerin ilki kaynak bölgesinden hidrojeni uzaklaştırmaktır (kaynak metalinde olduğu gibi). Kaynak bölgesinden hidrojeni uzaklaştırmayı çabuklaştırmak için düşük sıcaklıkta sonradan tavlama yapılmalıdır.

Hidrojen membalarından birincisi kaynak elektrodudur, çünkü normal olarak hidrojen ITAB'a erimiş kaynak metalinden yayınma ile girer. Bu nedenle ITAB'da çatlağı önlemek için düşük hidrojenli elektrotlar kullanılabilir. İkinci olarak, birleştirilen dizaynın kontrolü ile çatlama olasılığı azaltılabilir. Üçüncü olarak ise, çatlamaya eğilimi daha az olan esas metal seçerek ya da dikişe ön tavlama uygulayarak martenzit oluşumunu önlemek için uğraşılabilir. Bu sonuncu işlem sadece dikişteki hidrojeni ortadan kaldırmaz aynı anda kaynakta soğuma hızını martenzit oluşmayacak biçimde ayarlar. ITAB sertliği genellikle martenzit oluşumunun en iyi belirtisidir. Çatlama 250 HV sertliğine kadar çok az görülürken, 450 HV sertliğine yaklaşıldığında daha çok görülür. Ön tavlama yapılmadan kaynak yapıldığında sert martenzitik bir ITAB'a sahip olan çelikte, çatlamayı engellemek amacıyla sert martenzitik yapıyı önlemek için ön tavlama ya da sonradan tavlama yapılabilir. 550 - 650 °C arasında

yapılan bir sonradan tavlama kaynakta kalan gerilmeleri azaltır. Yalnız dikiş altı çatlağı önlenmek isteniyorsa, kaynak sonrası çok daha düşük sıcaklıklarda bir nihai tavlama uygulanabilir, kaynak dikişini 200 °C de birkaç saat tutarak, mevcut hidrojen bir çatlak oluşturmada önce, çelikten uzaklaştırılabilir. Bu nedenle, çatlama eğilimli bu tür çeliklerin kaynağında kaynaktan önce ön tavlama ve bu ön tav sıcaklığını kaynak tamamlandıktan sonra da birkaç saat korumak genellikle uygundur.

Martenzitleşme ısı işlemi görmüş ve sonradan temperlenmiş çeliklerin kaynağında, bazı özel ön tedbirler gerekli olabilir. Kaynak yeri yanındaki 723 °C'den daha az ısıtılmış bölgenin fazla yumuşatılması pek istenmez; bu nedenle kaynak ısı girdisi çok geniş olmamalıdır. Gerçekten, bu çeliklerin bazılarında kullanılan ısı yoğunluğu, kaynakta ITAB'da martenzit oluşturmak için özellikle ayarlanmıştır. Bu çelikler düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelikler grubuna girer ve bu çelikler kaynak yapılırken yapımcısının önerdiği kaynak işlemine başvurulmalıdır.

Bu katagorideki çelikler ITAB'da sıcak çatlak (makro çatlak) gösterebilir. Bu sıcak çatlağı kaynak metali ve çökellemeyle sertleşebilen alaşımlar için söz edilen aynı mekanizmalar oluşturur. Çeliklerde yüksek C ve Si miktarları sıcak çatlama eğilimi (Mn azaltırken) artırır. Eğer çelikteki (Mn/Si) oranı %60 ya da daha fazla ise sıcak çatlama olasılığı pek yoktur.

5.4.5 Soğuma Hızının ITAB'a Etkisi

Kaynak bölgesinde meydana gelen metalurjik dönüşümleri tahmin etmek için, sıcaklık dağılımı ifadesi direkt olarak kullanılamamaktadır. Bununla beraber sıcaklık dağılımını veren denklemlerden hareket edilerek herhangi bir noktadaki soğuma hızını veren denklemleri elde etmek mümkündür. Hesaplanacak soğuma hızına göre de, kaynak işleminden sonra ITAB'da meydana gelebilecek iç yapı ve dolayısıyla mekanik özellikler kolaylıkla önceden belirlenebilir; gerekli tedbirler alınarak kaynak bağlantı kalitesine ters yönde etki eden faktörlerin tesiri azaltılabilir ve böylece kaliteli ve emniyetli kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilebilir. Bu sebeble kaynak tatbikatı açısından soğuma hızının bilinmesi çok önemli bir husustur.

Çeliklerde, bir kaynak bağlantısının ITAB'ında ortaya çıkan soğuma hızları genellikle, uygulamada sertleşme elde etmek amacıyla kullanılan ısı işlemlerde karşılaşılan su verme etkisini oluşturacak kadar yüksektir. Sertleşme miktarı soğuma hızına ve çeliğin kimyasal

bileşimine bağlıdır. Gerçekte, bir çeliğin kaynak bağlantısında ITAB'ın sert olması tek başına bir sorun oluşturmaz. Burada önemli olan sertleşmenin ITAB'da çatlakların oluşumuna neden olan şartları yaratmasıdır.

Bahsedeceğimiz üç hususun olması halinde ITAB'da yüksek bir çatlama tehlikesi ortaya çıkar. Bunlardan ilki sertliğin kritik değer üzerinde olmasıdır ki, bu değer 350 V olarak verilmektedir. İkincisi çekme gerilmelerinin mevcudiyeti, üçüncüsü ise kaynak banyosunda hidrojenin bulunmasıdır. Bu üç faktörün aynı anda olması durumunda kesinlikle bir çatlak oluşur demek de yanlış olur. Bu faktörlerin dışında çatlak oluşumuna neden olan ilave birkaç faktör daha vardır. Bunlar, sertleşmiş yapının tipi, bağlantı profili ve hidrojenin gerçek seviyesi gibi karmaşık şekilde etkileşen faktörlerdir. Bu nedenle uygulamada kesin olarak çatlamadan değil, bir çatlama tehlikesinden söz edilir (Gourd, 1996).

Kaynak bölgesinde soğuma hızını tespit etmek için Rosenthal, sıcaklık dağılımını veren analitik denklemin zamana göre türevini alarak soğuma hızının hesaplanmasını sağlayan denklemleri elde etmiş ve ince levhalarda soğuma hızını tesbit etmenin, kalın levhalarda olduğu kadar kolay olmadığını belirtmiştir. Rosenthal daha sonraki çalışmasında ise, soğuma hızını veren denklemleri, tatbik edilen kaynak enerjisine bağlı olarak incelemiştir. Spraregen ve arkadaşları, Pertev'in ve Seferian'ın yumuşak çelik halinde kaynak bölgesinde soğuma hızını tespit etmek için yaptıkları deney sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Bruce de, Rosenthal gibi, sıcaklık dağılımını veren denklemin zamana göre türevini alarak soğuma hızını veren ifadeyi elde etmiştir.

Rosenthal, sıcaklık dağılımını veren denklemi, kaynak ısısının noktasal bir ısı membaı olduğunu, bu ısı membainin kaynak eksenini boyunca sabit hızla hareket ettiğini ve şiddetinin değişmediğini, kaynak edilen levhanın ısı özelliklerinin de sabit kaldığını, levhadan çevreye ısı kayıplarının bulunmadığını kabul ederek elde etmiştir. Buna mukabil, Hess ve arkadaşları, fiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini, ince levhalar ve ısı iletimi iyi olmayan metallerin kaynağından bu hususun sıcaklık dağılımına etkili olduğunu belirtmişler ve meydana gelecek hataları soğuma hızı denklemlerinde gözönüne alabilmek için çeşitli kalınlıklarda gemi sacları üzerinde deney yapmışlardır. Elde ettikleri deney neticelerini kullanarak kaynak enerjisine göre soğuma hızını veren denklemler ve deneylerde kullandıkları çelikler için seçilmiş kaynak şartlarına göre soğuma hızını kolayca bulmasını sağlayan diyagramlar çizmişlerdir. Mahla ve arkadaşları, çelik malzemelerin kaynak bölgesindeki yapısal değişiklere sebep olan faktörleri ve bunların en önemlisi olan soğuma hızının etkisini deneysel olarak incelemişler, ayrıca elde ettikleri deney sonuçlarını teorik

sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Doan ve arkadaşları, çeliklerin kaynaklarında soğuma hızının kaynak şartlarıyla bağıntısını ve bunun, kaynak bölgesinin sünekliği üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir.

Cristansen ve arkadaşları, klasik Rosenthal denkleminde hareket ederek kalın levhalar için geliştirdikleri sıcaklık dağılımını veren denklemin zamana göre türevini alarak, teorik soğuma hızının hesaplanmasına imkân veren denklemi geliştirmişler ve buldukları teorik sonuçları deneyle tahkik etmişler ve belirli kaynak şartlarına göre de soğuma hızını veren diyagramlar geliştirmişlerdir.

Adams ve arkadaşları, yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalarda, özellikle çeliklerde tepe sıcaklığından itibaren soğuma hızının önemli olduğunu belirtmişlerdir. İnce levhalar için verdikleri soğuma hızı denkleminin, fiziksel özelliklerin, kalınlığın ve levhanın ilk sıcaklığının fonksiyonu olduğunu, sıcaklık dağılımının üç boyutlu veya iki boyutlu olmasının kaynak şartlarına bağlı olduğunu belirtmişler ve kaynak şartlarına göre; iki boyutlu mu yoksa üç boyutlu mu olduğuna karar verme de direkt kullanılabilecek bir diyagram ile, çelikler için önemli olan 800 °C – 500 °C arasında soğuma hızını veren diyagramlar önermişlerdir. Kaynak şartlarını ve yüzeyden çevreye olan ısı kayıplarını dikkate alan, izafi levha kalınlıklarına göre, kaynak eksenindeki soğuma hızını veren grafikler de, Jhaveri ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Uwer, çeliklerin kaynağında ısının tesiri altında kalan bölgede meydana gelen metalurjik değişimleri etkileyen en önemli faktörün, 800 °C - 500 °C arasındaki soğuma süresi olduğunu belirtmiş, kalın ve ince levhaların kaynağında bu süreyi incelemiştir. Rykalin, soğuma süresinin ve tepe sıcaklıklarının bulunmasını sağlayan matematiksel ifadeler geliştirmiştir. Uelze, kaynak tepe sıcaklıklarını deneysel olarak incelemiş ve maksimum sıcaklıkları veren ampirik denklemler sunmuştur.

Anık, çelik malzemelerin kaynağında, kaynak enerjisi ve elektrodun cinsine bağlı olarak ısının tesiri altında kalan bölgenin boyutlarıyla, iç yapısındaki değişimleri incelemiş ve ısının tesiri altında kalan bölgede meydana gelen sertlikleri diyagramlarla vermiştir. Tülbentçi, hafif alaşımlı yüksek mukavemetli yapı çelikleri için, simülasyon tekniği ile, çeşitli soğuma hızları neticesinde ısının tesiri altında kalan bölgeyi meydana getirmiş ve bu çeliklerin kaynağında kullanılmak üzere $\Delta t_{8/5}$ sıcaklık dönüşüm diyagramını geliştirmiştir. Kaynak şartları ile soğuma zamanı arasındaki ilişki Anık ve Bodur tarafından incelenmiştir. Ön tav sıcaklığının ve kaynak enerjisinin ısının tesiri altında kalan bölgede soğuma hızına olan etkisini Bodur, araştırmıştır. İnce, çeşitli kaynak şartlarında, ısının tesiri altında kalan bölgede tane büyüklüğünün değişimini incelemiştir.

Literatürdeki çalışmalarda, kaynak işleminde kullanılan ark enerjisi bir noktasal ısı membaı kabul edilerek analitik çözümler yapılmıştır. Gerçekte ise elektrik arkı, elektrodun kesit alanı kadar bir bölgede meydana getirilmekte ve toplam ark enerjisi bu bölgeden malzemeye verilmektedir. Ayrıca metallerin fiziksel özellikleri sıcaklığa bağılı olarak da değişmektedir. İnce veya ısı iletimi iyi olmayan metal levhaların kaynağında levhadan çevreye yayılan ısı kayıpları ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Ayrıca, bu kayıplar sıcaklığa bağılı olarak değişmektedir.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, ısı iletim katsayısının, özgül ısının, yoğunluğun ve ısı taşınım katsayısının sıcaklığa bağılı olarak değiştiğı, ısınım kayıplarının artan sıcaklıkla daha fazla olacağı, gizli ergime ısısının metalin ergime ve katılaşma zamanına etkisi vurgulanmış olmasına rağmen, hadisenin kompleks olmasından ötürü literatürde bunların teorik analizini yapan bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

5.4.6 Isının Tesiri Altında Kalan Bölgedeki Isıl Çevrimler

Çeliğin kaynak işlemi sonunda sertleşmesinde, ısıl çevrimin büyük rolü vardır. Kaynak sırasında meydana gelen gerilmelerin de sertleşmeye tesiri olur; fakat bunun etkisi daha azdır.

Isıl çevrimlerin analizinde bilhassa 300, 540 ve 700 °C sıcaklıklardaki soğuma hızları alınmaktadır. Bunun sebebi ise;

300 °C

Cotrell tarafından bu sıcaklıklardaki soğuma hızıyla , ısının tesiri altında kalan bölgedeki dikışaltı çatlakları arasında , sıkı bir bağıntının bulunduğı ortaya çıkarılmıştır.

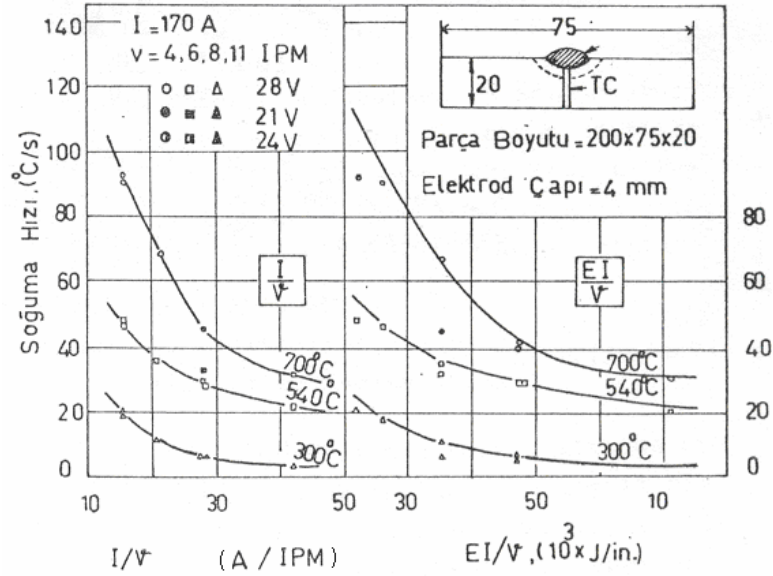
540 °C

Bu sıcaklık , düşük karbonlu yüksek mukavemetli çeliklerin sürekli soğuma diyagramındaki burun noktasına tekabül etmektedir. Isının tesiri altında kalan bölgedeki maksimum sertlik, genellikle bu sıcaklıktaki soğuma hızı ile tayin edilir.

700 °C

Bu sıcaklık birçok araştırmacı tarafından sık sık kullanılmakta olup, yaklaşık olarak düşük karbonlu çeliklerin kritik soğuma sıcaklığına eşdeğerdedir.

Hess – Merrill – Nippes – Bunk, kaynak akım şiddeti, ark gerilimi ve kaynak hızının, soğuma hızına etkisini (EI / v) parametresiyle ifade etmiştir (kaynak dikişinin birim uzunluğuna düşen ısı). Bazı araştırmacılar ise (EI / v) parametresi yerine ($I / v^{1/2}$) parametresini ileri sürmüşlerdir. Suzuki ve Kobayashi ile Kihara, Suzuki ve Kanatani yapmış oldukları araştırmalarda, ısının tesiri altında kalan bölgedeki soğuma hızlarının (EI / v) ve (I / v) parametreleriyle bağlantılarını araştırmışlar ve (I / v)'nin (EI / v)'den daha uygun olduğunu görmüşlerdir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Isının tesiri altında kalan bölgedeki soğuma hızı ile ısı miktarı arasındaki bağıntı (Cin, 1978).

5.4.7 Isı Tesiri Altındaki Bölgenin Genişliğinin Hesaplanması

ITAB'da erişilen tepe sıcaklığına bağlı olarak çeşitli iç yapı ve özellik gösteren bölgeler oluşmaktadır. ITAB'da erişilen maksimum sıcaklık derecesi, kaynak dikişi eksenine olan uzaklığın fonksiyonu olarak bilinirse; soğuma hızının da bilinmesi ile birlikte kaynak işlemi sonucunda oluşabilecek iç yapı, esas metalin bileşimi ve özellikleri gözönünde tutularak bir dereceye kadar tahmin edilebilmektedir.

Pratik bir yaklaşım ile tepe sıcaklığı aşağıdaki denklemle verilmektedir:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0} \quad (4.8)$$

burada;

T_p : Tepe sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

T_0 : Malzemenin ilk sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

T_m : Malzemenin ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$),

q : Birim dikiş enerjisi (J/mm),

ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/mm^3),

c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı ($\text{J/g}^{\circ}\text{C}$),

ρc_m : Volumetrik özgül ısı ($\text{J/mm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$),

t : Malzeme kalınlığı (mm),

Y : Ergime sınırından uzaklık (mm).

Tepe sıcaklığı eşitliği, kaynaklı yapıdaki ısı tesiri altındaki bölgenin genişliğinin hesaplanmasında kullanılabilmektedir. Fakat bu genişliği doğru bir şekilde hesaplayabilmek için, ısı tesiri altındaki bölgenin en dış noktası, bir tepe sıcaklık değeri ile net olarak tanımlanmalıdır. Bu tepe sıcaklık değeri, yapıdaki değişimlerin veya yapı özelliklerindeki değişimin niteliği ile ilişkilidir. Örneğin yalın karbonlu ve düşük alaşımlı çelik malzemelerde, farklı bir dağlama sınırı mevcuttur (cılalanmış ve dağlanmış kaynak kesitinde gözlemlendiği gibi) ve tepe sıcaklık değeri 730°C 'dir (1346°F). En dış noktayı, bu dağlama sınırının tanımladığı varsayılarak, ısı tesiri altındaki bölgenin genişliği önceki örnek için hesaplanabilir.

Buradaki problem, $T_p = 730^{\circ}\text{C}$ maksimum sıcaklık değeri için Y mesafesinin belirlenmesidir:

$$\frac{1}{730 - 25} = \frac{4.13(0.0044)5Y_z}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$Y_z = 5.9 \text{ mm}$$

Y_z : Isı tesiri altındaki bölgenin genişliği (mm)

Böylece 730°C (1346°F) karakteristik dağlama sınırının, erime sınırından itibaren 5.9 mm 'de yer alacağı ya da kaynak bölgesine yakın, 5.9 mm genişliğindeki bir bölgede yapısal değişim olacağı tahmin edilmektedir. Yapısal değişimi kaynak ısısı etkileyebilmektedir.

Ancak, eğer su verme sureti ile sertleştirilen ve tavllanmış çelik söz konusu olsa idi ve tavlama işlemi 430 °C’de (806 °F) yapılıyorsa, 430 °C’nin üzerinde bir sıcaklık değerine kadar ısıtılan herhangi bir bölge teorik olarak “aşırı tavllanmış” olacaktı. Bu durumda ısı tesiri altındaki bölgenin genişliğinin hesaplanmasında tepe sıcaklığı $T_p = 430$ °C alınacaktı;

$$\frac{1}{430 - 25} = \frac{4.13(0.0044)5 Y_z}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$Y_z = 14.2 \text{ mm (0.56 in)}$$

Su verme sureti ile sertleştirme ve tavlama işlemine cevap veren çelikler genellikle kaynaklama işleminden önce ısıtılırlar. Bu uygulama, ısı tesiri altındaki bölgenin genişlemesine neden olan bir yan etkiye sahiptir. Önceki örneğe istinaden ön ısıtma sıcaklığının $T_o = 200$ °C’de (390 °F) olduğu varsayılırsa:

$$\frac{1}{430 - 200} = \frac{4.13(0.0044)5 Y_z}{720} + \frac{1}{1510 - 200}$$

$$Y_z = 28.4 \text{ mm şeklinde bulunur.}$$

Böylece ön ısıtma sıcaklığı, ısı tesiri altındaki bölgenin genişliğini iki kat arttırmaktadır.

Sonuç olarak, tepe sıcaklık eşitliğinden çıkarılabilecek en basit ve önemli sonuç, ısı tesiri altındaki bölgenin genişliğinin net enerji girişi ile doğru orantılı olduğudur. Yine bir önceki örneği kullanacak olursak (ancak ön ısıtma sıcaklığı olmaksızın), net enerji girişinin %50 artırılarak, 1080 J/mm (27 432 J/in) olduğu varsayılırsa:

$$\frac{1}{430 - 25} = \frac{4.13(0.0044)5 Y_z}{1080} + \frac{1}{1510 - 25}$$

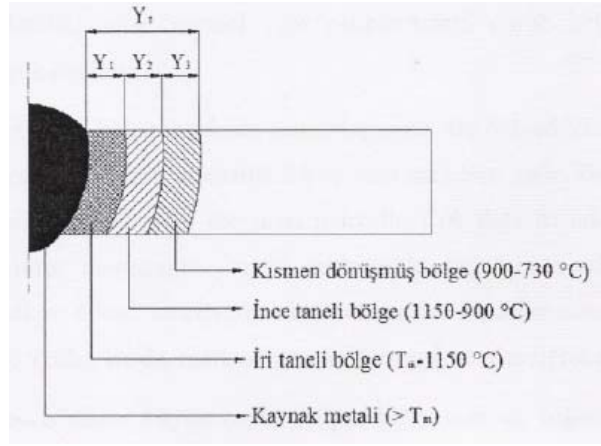
$$Y_z = 21.3 \text{ mm şeklinde bulunur.}$$

Böylece ısı tesiri altındaki bölgenin genişliği de %50 oranında artmaktadır.

Tepe sıcaklığı eşitliği çok kullanışlı olabilmesine rağmen, bu eşitlik kullanılırken belirli kısıtlamaların da mevcut olduğunun bilinmesi gerekir. En önemli nokta, bu eşitliğin, ısı iletiminin plakaya paralel bir düzlemde yer alan yörüngeler boyunca gerçekleştiği “ince plaka” koşulundan türetilmesidir. Bundan dolayı bu eşitlik, plaka kalınlığı dikkate alınmaksızın, tam nüfuziyetin olduğu bir kaynak işleminde ya da termik kesme işlemlerinde kullanılır. Aslında, bu eşitlik dört pasodan daha az paso ile gerçekleştirilen herhangi bir tam

nüfuziyetli ark kaynağı için kullanılır. Eşitlik her bir pasoya uygulanmalıdır ancak, ara paso sıcaklığı (kaynak bölgesinin, pasolar arasında soğuduğu sıcaklık), tepe sıcaklık eşitliğindeki T_0 için kesin değer olarak girilir.

Isı akışı gerçekte düzlemsel olduğu zaman, ısı tesiri altındaki metalin kaynak uzunluğu boyunca hacmi, $2tY'$ dir; ayrıca bu değer kaynağın enine doğru olan kesitinde gözlendiği gibi, ısı tesiri altındaki bölgenin toplam alanıdır (kaynağın her iki yüzeyinden itibaren). Bundan dolayı, verilen herhangi bir malzeme için, ısı tesiri altındaki bölge tanımı için, bu alan, net enerji girişi ile orantılıdır. Böylece tepe sıcaklık eşitliği, diğer geometrilerde de (kalın plakalarda çok pasolu kaynak işleminde olduğu gibi) kullanılabilir.



Şekil 5.11 ITAB'ı oluşturan bölgelerin şematik gösterimi.

Kaynak metalinin (eriyen bölgenin) hemen altına tesadüf eden, kaynak esnasında malzemenin ergime sıcaklığı çelikler için 1450°C ile 1150°C arasında bir sıcaklığa ısıtılan ve tane büyümesinin görüldüğü bölge, iri taneli bölge şeklinde ifade edilmektedir. İnce taneli bölge, sıcaklığın 1150 ile 900°C arasında olduğu, iç yapı bakımından iri taneli bölgeye benzeyen ve onun devamı olan fakat daha ince tanelerden oluşan bir bölgedir. Kısmen dönüşmüş bölge ise, ince taneli bölgenin devamı olup, kaynak sırasında 900 ile 730°C arasında bir sıcaklıkla karşılaşan bölgedir. 730°C 'nin altına kadar ısıtılan bölge genel olarak bir iç yapı değişmesine maruz kalmamaktadır (Cin,1978 ve Tülbentçi, 1998).

5.4.8 Isı Tesiri Altındaki Bölgenin Genişliğinin Hesaplanmasında Malzeme Özelliklerinin Etkisi

5.4.8.1 Malzeme Ergime Sıcaklığı (T_m)

Katı bir malzemenin sıvı duruma geçmeye başladığı ve ergime sona erene kadar koruduğu sıcaklık olarak tanımlanan ergime sıcaklığı, ark esaslı yöntemlerde önemli malzeme özelliklerinden birisidir. Zira kaynaklı bir bağlantı elde edebilmek için malzemenin ergime sıcaklığına kadar ısıtılması gerekmektedir.

Malzemelerin değişik ergime sıcaklıklarına sahip olması kaynak için gereken ısı girdisini etkilemektedir. Yüksek bir ergime sıcaklığına sahip bir malzemenin bu sıcaklığa ulaştırılarak sıvı duruma geçmesi için gereken ısı, şüphesiz ki daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip malzemeye nazaran daha fazla olacaktır. Ancak burada önemli olan ergime sıcaklığının tek başına ele alınmaması gereğidir. Çünkü ergime sıcaklığı diğer malzeme özellikleri ile birlikte ısı girdisine etki etmektedir. Örneğin alüminyum çeliğe göre daha düşük sıcaklıkta ergimesine rağmen ısıl iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle gerekli ısı girdisi aynı kalınlıktaki çeliğe göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca diğer bir önemli nokta da, ısı membainin kaynak yapılacak metalin ergime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmesidir. Eğer sıcaklık farkı az olursa, giren ısı aynı hızla bağlantıyı terk edeceğinden bu durumdaki bağlantıdaki sıcaklık, ergime sıcaklığına çıkamaz.

Çizelge 5.1’de çeşitli metal ve alaşımlarının ergime sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 5.1 Çeşitli metal ve alaşımlarının ergime sıcaklıkları
(Welding Handbook, 1976 ve Kakaç, 1998).

Element	Ergime Sıcaklığı (°C)	Alaşım	Ergime Sıcaklığı(°C)
Alüminyum	658	Al Alaşımları Dövme Alaşımlar Dökme Alaşımlar	630 – 650 500 – 650
Karbon	3540		
Bakır	1084	Cu Alaşımları Ticari Bronz % 10 Al Bronzu	1050 1070
Altın	1063		
Demir	1535	Mg Alaşımları Dövme Alaşımlar Dökme Alaşımlar	500 – 650 450 – 650
Magnezyum	657		
Molibden	2622	Düşük Alaşımlı Ç. Martenzitik P.Ç. Östenitik P.Ç.	1430 – 1500 1480 – 1540 1370 – 1450
Nikel	1453		
Titanyum	1727		
Tungsten	3387	Ni Alaşımları 99.95 Ni + Co %60 Ni + %33 Cu + %6.5 Fe	1455 1300 – 1350
Vanadyum	1726		
		Titanyum Alaşımları	1530 – 1670

5.4.8.2 Malzemenin Özgül Isınma Isısı

5.4.8.3 Malzemenin Özgül Isınma Isısı

Kaynak işlemi üzerine etki eden bir diğer malzeme özelliği de özgül ısınma ısıdır. Özgül ısınma ısı, birim ağırlıktaki bir malzemenin sıcaklığını bir derece arttırmak için gerekli ısıdır. Diğer bir deyişle malzemelerin ısıyı absorbe etme yetileridir.

Malzemeyi ergitmek için gerekli ısı miktarı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$Q_m = m_m \times c_m \times \Delta T_m \quad (5.1)$$

Burada,

Q_m : Malzemeyi ergitmek için gerekli ısı miktarı (kJ)

m_m : Ergitilen malzeme kütlesi (g)

c_m : Malzemenin özgül ısınma ısısı (kJ/g.°C)

ΔT_m : Malzemenin ortam ile ergime sıcaklığı arasındaki fark (°C)

Bu denklemden de görülebileceği gibi sıcaklık farkı eşit kabul edilirse, malzeme tipine göre özgül ısınma ısısının artması ile aynı miktarda malzeme ergitebilmek için daha fazla ısı girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak burada diğer önemli bir değişken de malzemenin ergime sıcaklığıdır. Malzemelerin özgül ısınma ısıları birbirine çok yakın değerlerde olsa dahi ergime sıcaklıklarındaki fark, ısı girdisine etki edecektir.

Çizelge 5.2’de çeşitli elementlerin 20 °C’deki ve ergime sıcaklıklarındaki özgül ısınma ısıları verilmiştir.

Çizelge 5.2 Çeşitli elementlerin özgül ısınma ısıları (Welding Handbook, 1976).

Element	Ergime Sıcaklığı (°C)	20 °C’de Özgül I. Isıları 10 ³ (J/kg.K)	Ergime Sıcaklığında Özgül I. Isıları 10 ³ (J/kg.K)
Alüminyum	658	0.898	1.250
Karbon (Gaz)	3000	1.735	1.822
Kobalt	1494	0.419	0.640
Krom	1860	0.483	0.974
Demir	1535	0.444	0.763
Magnezyum	657	1.019	1.327
Molibden	2622	0.259	0.546
Nikel	1453	0.44	0.616
Titanyum	1727	0.519	0.782
Tungsten	3387	0.426	0.617

5.4.8.4 Malzemenin Isı İletim Katsayısı

Malzemelerin ısı iletkenlikleri kaynak işlemi üzerine önemli etkiler yapmaktadır. Kaynaklanacak alana ısı verilir verilmez, metal en düşük sıcaklıkta olduğu için bu ısı her iki

yöne doğru metal yoluyla iletilerek uzaklaşmaya başlar ve sonuçta metalde bir sıcaklık gradyanı oluşur, dolayısıyla, erime elde edebilmek için bağlantıya sağlanan ısı girdisi hızının, esas metalde olan ısı iletimi hızından daha büyük olması gerekir. Bu durumda, esas levhanın ısı iletkenliği kaynak şartlarının seçiminde gözönüne alınması gerekli en önemli faktörlerden birisidir (Gourd, 1996).

Isı iletim katsayısı (k), malzemenin fiziksel bir özelliği olup, ısı iletim kabiliyetini gösterir. Isı iletim katsayısının değeri; birim zamanda, birim yüzeyden, birim uzunlukta $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık düşümü halinde, ısı akımı miktarına eşittir. Isı İletim katsayısı, her metal için farklı olup, metalin yapısına ve sıcaklığına bağlıdır. Sözgelimi, bir kaynak işlemi sırasında ısı, bakırda çeliğe nazaran çok daha hızlı bir şekilde iletilerek uzaklaştırılır. Bu ise, erimenin oluşturulabilmesi için, ısının benzer kalınlıktaki bakır bağlantıda çelik bağlantıya göre daha yüksek bir hızda verilmesi gerektiği anlamına gelir.

Malzemelerin ısı iletimleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Isı iletim katsayısı çalışma sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Bunun yanı sıra malzeme içindeki alaşım elementi miktarı da ısı iletimini etkilemektedir. Saf malzemelerin ısı iletkenlikleri en yüksek seviyede iken malzemeye alaşım elementi katılması ısı iletim kabiliyetini azaltmaktadır.

Çeliklerde ısı iletim katsayısı, bileşimdeki karbon ve alaşım elementlerinin cins ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Çeliklerde karbon miktarı arttıkça ısı iletme kabiliyetinin azaldığı bilinmektedir (Welding Handbook, 1976 ve Kılık, 1983).

Isıl iletkenlikleri, alüminyum ve alaşımlarının kaynağını ve de bakır ve alaşımlarının kaynağını çeliklerin kaynağından farklı kılan özelliklerden birisidir.

Alüminyum alaşımları, $550 - 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklık aralığında ergimelerine rağmen; ısı iletkenliklerinin çok yüksek olması nedeni ile kaynak için gerekli ısı girdisi eş kalınlıktaki çeliğin kaynağından daha fazla olmak zorundadır. Bu ısı iletkenlik özellikle kalın parçalarda, kaynak bölgesinin şiddetli soğumasına neden olur, bu bakımdan kalın ve bilhassa döküm alüminyum parçalara kaynak öncesi ön tav vermek gereklidir. Genellikle 15 mm 'den daha kalın parçalara uygulanan bu ön tav derecesi $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşmamalıdır. Dövme alüminyum alaşımında genel olarak, ön ısıtma yerine daha yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi ile daha yüksek ısı girdisi sağlayarak çalışma tercih edilir.

Bakır ve alaşımlarının kaynağında yine ısı iletkenliklerinin yüksek olması nedeniyle yoğun bir ark enerjisine gerek vardır, dolayısı ile daha yüksek bir akım şiddeti ile (alüminyuma

nazaran % 50 - 75 daha yüksek) çalışılır. Isıl iletkenlik sebebiyle kaim bakır parçaların kaynağında 250 - 400 °C arasında bir ön tav uygulanmalıdır (Tülbentçi, 1998).

Çizelge 5.3'te çeşitli metal ve alaşımların ısı iletim katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.3 Çeşitli metal ve alaşımların ısı iletim katsayıları (Metals Handbook, 1989).

Element	Yoğunluk (g/cm ³)	Isı iletim katsayısı (20 – 100 °C) (W/m.K)	Alaşım	Yoğunluk (g/cm ³)	Isı iletim katsayısı (20 – 100 °C) (W/m.K)
Alüminyum	2.699	221	Al Alaşımları		
Karbon	2.25	24	1100	2.71	222
			2014	2.80	193
Bakır	8.96	394	5052	2.68	138
			6061	2.70	172
			7075	2.80	121
Altın	19.32	297	Cu Alaşımları		
			Ticari Bronz	8.80	188
Demir	7.87	75	Cartridge Pirinci	8.53	121
			%9 Al Bronzu	7.58	60
Magnezyum	1.74	154	Mg Alaşımları		
			AZ 31	1.78	84
Molibden	10.22	142	AZ 91	183	84
			ZW 1	1.8	134
			RZ 5	1.84	113
Nikel	8.902	92	Alaşımsız Ç.	7.8	53.7
Titanyum	4.507	22	Paslanmaz Ç.		
			301	7.9	16
			304	7.9	15.1
			316	8	15.5
Tungsten	19.3	166	410	7.7	24
			430	7.7	26
			501	7.7	37
Vanadyum	6.1	31	Titanyum Alaşımları		
			Ti-6A 1-4V	4.43	5.9
			Ti-5A 1-2.5Sn	4.46	6.3

5.4.8.5 Malzemenin Kalınlığı

Günümüz endüstrisinde kullanılan çeşitli alaşımların cazip mekanik özelliklerinin büyük bir kısmı, elde edilmeleri esnasında uygulanan ısıt işlemlerden ve kimyasal yapılarından kaynaklanmaktadır. Kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde malzemelerin ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa kadar bölgesel olarak hızla ısınması ve soğuması (ısıt çevrim), bu şekilde elde edilmiş özelliklerin büyük bir kısmının kaynak bölgesinde kaybolmasının yanında, tane büyümesine ve bilhassa allotropik özelliğe sahip malzemelerde katı hal faz dönüşümlerine sebep olur. Bu iç yapıdaki dönüşümler de , malzemenin mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirir (Kılık, 1984).

ITAB’da meydana gelen değişiklikler kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri üzerine önemli etkiler yapmaktadır. Özellikle çeliklerde ITAB’ın 900 °C üzerine tavlanan bölgesi bir nevi su verme işlemine tabi tutulmuş olmakta ve çeliğin bileşimine göre bu kısım çok yüksek bir sertliğe ulaşabilmektedir.

Bileşimindeki karbon miktarı takriben % 0.25’in üzerinde bulunan normal karbonlu yapı çelikleri ile hafif alaşımlı yüksek mukavemetli yapı çeliklerinin sertleşme kabiliyetleri, düşük karbonlu ve alaşımsız yumuşak çeliklere nazaran daha fazla olduğundan ITAB sertleşerek gevrekleşir ve soğuk çatlama hassasiyeti de artar (Cin, 1978).

Kalınlığın artması kaynak için gereken ısıyı arttırmasının yanında kaynak edilecek parçalara kaynak ağzı açılması ve çok pasolu bir kaynak uygulaması gerektirebilir. Ancak malzeme özellikleri, ısı girdisi ve bağlantı tipinin yanısıra kalınlık, soğuma hızına etki eden bir diğer faktördür.

Kaynak numuneleri boyutları amaca uygun olarak belirlenmiştir. Buna göre numune boyutları $200 \times 80 \times 15$ olarak 10 adet St37'den, 10 adet de AlMgZn alaşımından kestirilmiştir.

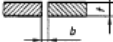
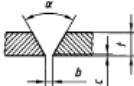
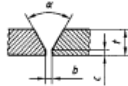
Kaynak işlemi esnasında altlık olarak kullanılmak üzere ayrıca $250 \times 200 \times 15$ boyutlarında bir de bakır parça kestirilmiştir.

6.2 Deney Numunelerine V Kaynak Ağzı Açılması ve Kaynak Aparatlarının, Talaşlı İşlemlerle Hazır Hale Getirilmesi

Numune boyutları saptandıktan sonra numunelerin gazaltı kaynağıyla kaynağı için standartlardaki uygun olan yaklaşık V kaynak ağız açısı aşağıdaki tablolardan belirlenmiştir.

Kaynak					Kaynak ağızı					Tavsiye edilen kaynak işlemi ^(c)	Notlar
Referans No. ^(a)	İş parçası kalınlığı t	Tipi	Sembol ^(b)	Şekille izahı	Enine kesiti	Açı α, β	Aralık b	Kök yüzeyi kalınlığı c	Diğer boyutlar		
1.14	$8 \leq t \leq 20$	Dik yamaçlı tek V alın kaynağı				$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	-	-	131	
1.5	$3 \leq t \leq 15$	Küt kök yüzeyli tek V alın kaynağı				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$	-	131 141	
	$6 \leq t \leq 25$	Altlıkla küt kök yüzeyli tek V alın kaynağı				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 1,5$	$c = 3$	-	131	
1.7	Plâka $t \geq 12$ t boru $t \geq 5$	Tek U alın kaynağı (eğimli kenarlı)				$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$b \leq 2$	$2 \leq c \leq 4$	$4 \leq r \leq 6$ $3 \leq f \leq 4$ $0 \leq e \leq 4$	141	
	$15 \leq t \leq 30$					$15^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	$4 \leq r \leq 6$ $3 \leq f \leq 4$ $0 \leq e \leq 4$	131	Tercihan kök paso: 141

Şekil 6.1 Alüminyum ve alaşımlarının gazaltı kaynağında uygun kaynak ağızları (TS EN ISO 9692 – 3).

Referans No.	Malzeme kalınlığı t mm	Kaynak ağızı tipi	Sembol (ISO 2553'e göre)	Enine kesit	Boyutlar				Tavsiye edilen kaynak işlemi (ISO 4063'e göre referans no)	Kaynak resmi	Notlar
					Açı ^{a)} α, β	Aralık ^{b)} b mm	Kök yüzeyi kalınlığı c mm	Nüfuziyet derinliği h mm			
2.1	≤ 8	Küt alın kaynağı			-	$\approx \frac{t}{2}$	-	-	111 141		-
					$\leq \frac{t}{2}$			13			
					0			52			
2.2	$3 \leq t \leq 40$	Tek taraftan V alın kaynağı			$\alpha \approx 60^\circ$	≤ 3	≤ 2	-	111 141		Kök paso gösterilmiştir
					$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$				13		
2.3	> 10	Küt kök yüzeyli tek taraftan V alın kaynağı			$\alpha \approx 60^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	-	111 141		Özel durumlarda, daha ince parçaları ve kaynak işlemi 3 için de mümkündür. Kök paso gösterilmiştir
					$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$				13		

Şekil 6.2 Çelikler için her iki taraftan kaynak edilmiş alın kaynakları için kaynak ağızı (TS EN ISO 9692).

Tablolara baktığımızda Alüminyum ve alaşımları için kullanılan numune boyutlarımız için V kaynak ağız açısı α 'nın yaklaşık 50° civarında olduğu, çelik numunemiz için de tavsiye edilen V kaynak ağızı açısının yaklaşık 60° civarında olduğu görülmektedir.

Farklı kaynaklarda çelik için uygun V ağızı açısının 50° civarında olabileceği de görülmüştür.

Bunun sonucu olarak hem St37 hem de AlMgZn alaşımı numunelere 60° , 55° , 50° , 45° ve 40° 'lık kaynak ağızları açılmasına karar verilmiştir.

Kaynak ağızlarının oluşturulması ve altlığın hazırlanması işlemleri İnçal Mühendislik A.Ş.'de freze tezgahıya, parçalardan birkaç paso ile talaş kaldırılması ile gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin ve altlığın kaynak işlemi öncesi son durumlarına ilişkin fotoğrafları altta görülmektedir.



a) Bakır altlık tek başına



b) Parçayla beraber bakır altlık

Şekil 6.3 Kaynak öncesi kaynağa hazırlanmış numune örneği

Fotoğraflarda da görüldüğü gibi parçalar İnçal Mühendislik Aş.'de talaşlı şekil verme metoduyla kaynak işlemine hazır hale getirilmişlerdir.

6.3 Kaynak İşleminin Gerçekleştirilmesi

Kaynak işlemi esnasında kaynaklanan numunelerin cinsine ve konstrüktif özelliklerine göre uygun kaynak parametreleri seçilerek kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Her numune için seçilen parametreler ilgili bölümlerde belirtilecektir.

St37 numuneler MAG kaynak yöntemi ile, AlMgZn alaşımı numuneler de MIG kaynak yöntemiyle kaynak edilmişlerdir. Kaynak işlemini uygulamadan önce olası distorsiyonları bir miktar azaltabilmek için numuneler gerekli biçimde işkenceler vasıtasıyla bakır altlığa sabitlenmişlerdir.

6.4 Kaynak Sonrası Numunelerin Hazırlanması

Uygun kaynak parametreleri ile kaynak işlemi gerçekleştikten sonra, kaynaklı parçaların sertliğini ve ITAB bölgesini incelemek üzere kaynaklı parçalardan numunelerin çıkarılması gerekmektedir. Gerekli numuneler kaynaklı yapıdan testere ile kesilerek elde edilmişlerdir.

Daha sonra numunelerin ITAB genişliklerinin görülebilmesi ve sertliğinin ölçülebilir hale gelebilmesi için çıkartılan numune yüzeyleri sırasıyla 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 mesh'lik zımparalar ile sulu döner disk yardımıyla zımparalanmıştır. Zımparalanmış yüzeyler daha sonra parlatılmış ve en son da dağlanarak incelenabilir duruma getirilmiştir.

Parlatma işlemi, hem St37 hem de AlMgZn alaşımı numuneler için, kaba parlatma işlemi Al_2O_3 ile, ince parlatma işlemi ise 6 μ m ve 1 μ m'lik elmas parlatıcılarla olmak üzere gerçekleştirilmiştir.

Dağlama işlemi ise her iki malzeme için farklı dağlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

St37 numuneler için %10 Nital çözeltisi dağlayıcı seçilip dağlama süresi 60 saniye olarak uygulanmıştır.

AlMgZn alaşımı numuneler ise Keller reaktifi olarak adlandırılan, saf su (20ml) , HCl (15ml), HNO_3 (25ml), HF (%40) (10ml) karışımı ile dağlanmış olup dağlama süresi 180 saniye olarak uygulanmıştır.

Tüm bu işlemler sonucu St37 malzemenin hem ITAB genişlikleri gözle görülebilir hale gelmiş hem de sertlikleri ölçülebilir hale gelmiştir.

AlMgZn alaşımı numuneler için ise sadece sertlikler ölçülebilir hale gelmiştir. Farklı çözeltiler ve farklı dağlama süreleri uygulansa da ITAB genişliği net olarak görülememiştir.

Hazırlanan numunelerin yapılan ölçümleri ilerideki konularda tablolarla, ifade edilmiş ve irdelenmesi yapılmıştır.

6.5 St37 Numunelerin Kaynak İşlemleri

Kaynak işlemi daha öncede belirtildiği üzere MAG kaynak yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işleminde kullanılan numunenin ve kaynak elektrodunun bileşimi aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Kullanılan kaynak elektrodu çapı Ø1.2 mm'dir.

Çizelge 6.3 St37 Malzeme özellikleri.

Malzeme	Ergime sıcaklığı (T_m) (°C)	Özgül ısınma ısısı (c_m) (J/g. °C)	Yoğunluk (ρ) (g/mm ³)	İlk sıcaklık (T_0) (°C)
St37 (15mm)	1450	0.44	0.0078	20

Çizelge 6.4 St37 Kimyasal içeriği.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Al	% Co
0.176	0.207	0.898	0.0126	0.0449	0.0542	0.00198	0.0718	<0.00200	0.0179
%Cu	% Nb	% Ti	% Fe	V: 0.000750 < W: 0.00563 < Pb: 0.00200 < Sn: 0.00300 < Sb: 0.00200					
0.107	0.00374	0.00286	98.38						

Çizelge 6.5 Kaynak elektrodu kimyasal içeriği.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cu
0.07-0.10	1.4-1.6	0.7-1.0	<0.025	<0.025	<0.30

6.5.1 40° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.6 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MAG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
Kök paso	180	20	16.3	0.80
1.paso	180	20	22.4	0.80
2. paso	180	20	17.6	0.80
Arka yüzey 1.paso	180	20	44.4	0.80

6.5.1.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Tablodaki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

Kök paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{16.3 \times 1000} = 10.60 \text{ kJ/cm} = 1060 \text{ J/mm}$$

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{22.4 \times 1000} = 7.714 \text{ kJ/cm} = 771.4 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{17.6 \times 1000} = 9.79 \text{ kJ/cm} = 979 \text{ J/mm}$$

Arka yüzey 1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{44.4 \times 1000} = 3.892 \text{ kJ/cm} = 389.2 \text{ J/mm}$$

6.5.1.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.4'teki veriler ve hesaplanan birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir.

Eldeki veriler ışığında ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

Kök paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1060} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 3.53 \text{ mm}$$

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{771.4} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2.57 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{979} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 3.26 \text{ mm}$$

Arka yüzey 1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{389} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1.30 \text{ mm}$$

Çizelge 6.7 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	3.53
1. paso	2.57
2. paso	3.26
Arka yüzey 1. paso	1.30

Çizelge 6.7’den görüldüğü üzere birim dikiş enerjisinde meydana gelen artış ITAB genişliğini de doğru orantılı olarak arttırmaktadır.

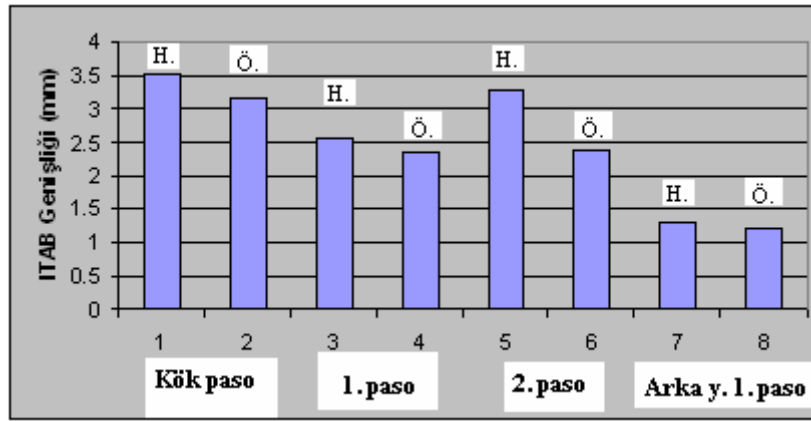
6.5.1.3 Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri

Kaynak işlemi sonlanıp numuneler daha önce anlatıldığı şekilde ölçümlere hazır hale getirildikten sonra kaynaklı parça üzerinde ITAB bölgesi gözle görülebilen bir hale gelmiştir.

Görülebilen bu ITAB bölgeleri en az 5 kez ölçüldükten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak Çizelge 6.8’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.8 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	3.15
1. paso	2.35
2. paso	2.40
Arka yüzey 1. paso	1.20



Şekil 6.4 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.

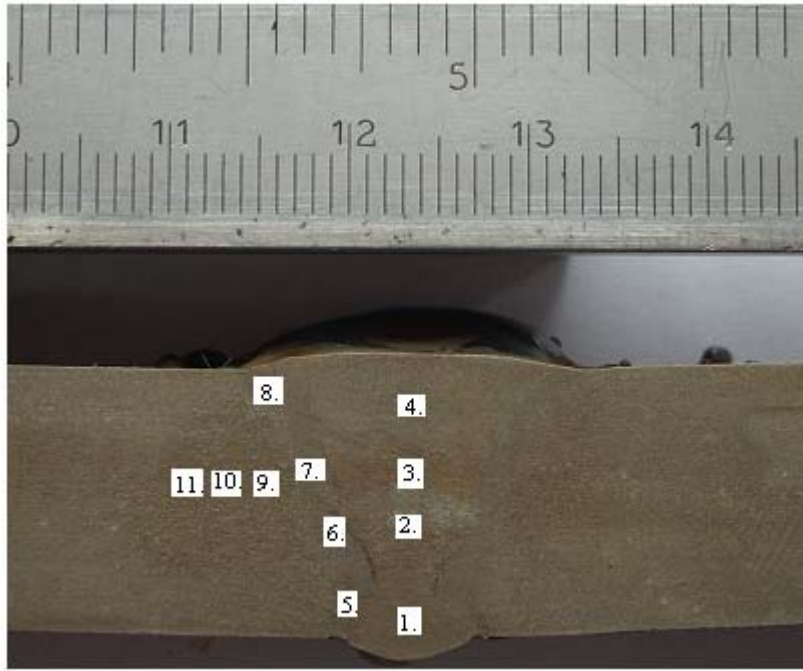
Sonuç olarak grafikte de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler incelendiğinde 2. paso hariç diğer pasolardaki farkların çok fazla olmadığı görülmektedir. 2. pasoda meydana gelen bu farkın nedeni hesaplanan değerlerin yanlış olmasından kaynaklanabilir. Çünkü kaynak işlemini uygulama esnasında pasolar arası parçanın soğuması beklenmemiştir. Dolayısıyla kök paso hariç diğer pasolarda formülde kullanılan T_0 ; parçanın ilk sıcaklık değeri tam olarak tespit edilememiştir. Bir başka çalışmada numunelerin soğuması beklenilip diğer pasolar, soğumadan sonra uygulanıp ortaya çıkacak sonuçlar şu an elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.

6.5.1.4 40° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

Daha önce numune hazırlama metotları başlığı altında numunenin sertlik ölçümüne nasıl hazır hale getirildiği anlatılmıştı. Sertlik ölçüm işlemleri Vickers sertlik tarama cihazı ile

gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik taraması, parça yüzeyine 10 sn süre boyunca 1 kg'lık deney yükü uygulanarak, kaynak metali – ITAB – ana malzeme boyunca hat biçiminde 2 mm ve gerektiği durumlarda 3 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar tüm St37 numunelerde standart olduğundan bir daha anlatılmayacaktır.

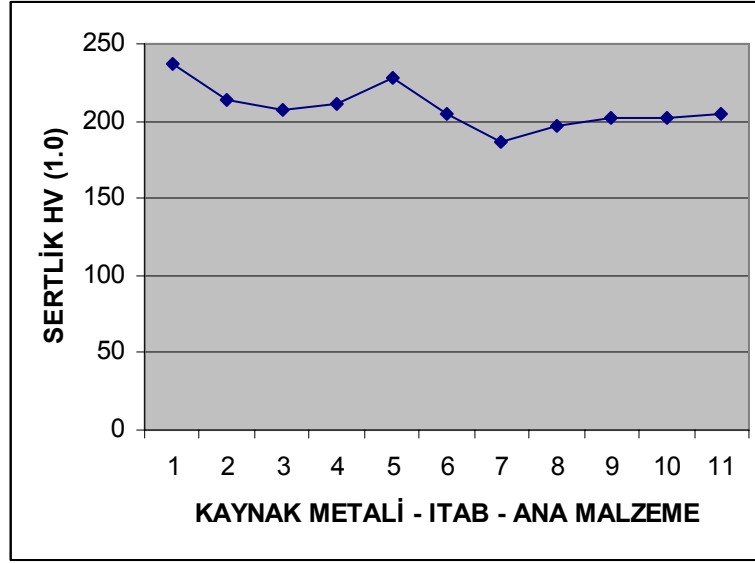
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.5 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.9 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sertlik (HV)	236.4	214.1	207.3	210.8	228.3	205.1	185.9	196.4	202.3	202.7	204.7



Şekil 6.6 40° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekilde de görüldüğü gibi en yüksek sertlik 1. bölgede olmuştur. Bunun nedeni olarak bu bölgede oluşabilmesi öngörülen kısmi martenzit yapı gösterilebilir. Ayrıca 1. bölgeye resimden bakılacak olursa bu bölgenin arka yüzey 1. paso olduğu görülmektedir. Bu bölgeye çekilen pasodan önce parçayı ters çevirmek gerektiğinden ve ayrıca en son buraya kaynak pasosu yapıldığından bir önceki yapılan pasonun burada oluşturduğu tavlama etkisi daha düşüktür. Bu yüzden bu bölgedeki soğuma hızının diğer bölgelere nazaran daha yüksek olması beklenmektedir. Yüksek soğuma hızı da yapının daha sert olmasına yol açmıştır.

6.5.2 45° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.10 St37 Numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MAG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
Kök paso	180	20	23	0.80
1.paso	180	20	24	0.80
2. paso	180	20	20	0.80
Arka yüzey 1. paso	180	20	28.6	0.80

6.5.2.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Çizelgedeki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

Kök paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{23 \times 1000} = 7.513 \text{ kJ/cm} = 751.3 \text{ J/mm}$$

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{24 \times 1000} = 7.2 \text{ kJ/cm} = 720 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{20 \times 1000} = 8.64 \text{ kJ/cm} = 864 \text{ J/mm}$$

Arka yüzey 1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{28.6 \times 1000} = 6.04 \text{ kJ/cm} = 604 \text{ J/mm}$$

6.5.2.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.4'teki veriler ve hesaplanan birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir.

Eldeki veriler ışığında ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

Kök paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{751.3} + \frac{1}{1450 - 20} \Rightarrow Y = 2.51 \text{ mm}$$

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{720} + \frac{1}{1450 - 20} = Y = 2.40 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{864} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2.88 \text{ mm}$$

Arka yüzey 1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{604} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2.01 \text{ mm}$$

Çizelge 6.11 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	2.51
1. paso	2.40
2. paso	2.88
Arka yüzey 1. paso	2.01

Çizelge 6.11'den görüldüğü üzere birim dikiş enerjisinde meydana gelen artış ITAB genişliğini de doğru orantılı olarak arttırmaktadır.

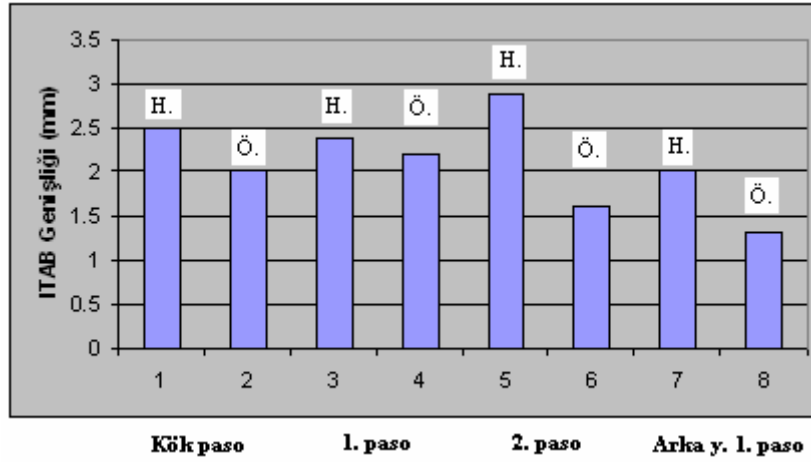
6.5.2.3 Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri

Kaynak işlemi sonlanıp numuneler daha önce anlatıldığı şekilde ölçümlere hazır hale getirildikten sonra kaynaklı parça üzerinde ITAB bölgesi gözle görülebilen bir hale gelmiştir.

Görülebilen bu ITAB bölgeleri, kumpasla en az 5 kez ölçüldükten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak aşağıda bulunan tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.12 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	2.00
1. paso	2.20
2. paso	1.60
Arka yüzey 1. paso	1.30



Şekil 6.7 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.

Grafikte de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler incelendiğinde 2. pasoda hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farkların nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu farkın nedeni hesaplanan değerlerin yanlış olmasından kaynaklanabilir. Çünkü kaynak işlemini uygulama esnasında pasolar arası parçanın soğuması beklenmemiştir. Dolayısıyla kök paso hariç diğer pasolarda formülde kullanılan T_0 ; parçanın ilk sıcaklık

değeri tam olarak tespit edilememiştir.

6.5.2.4 45° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

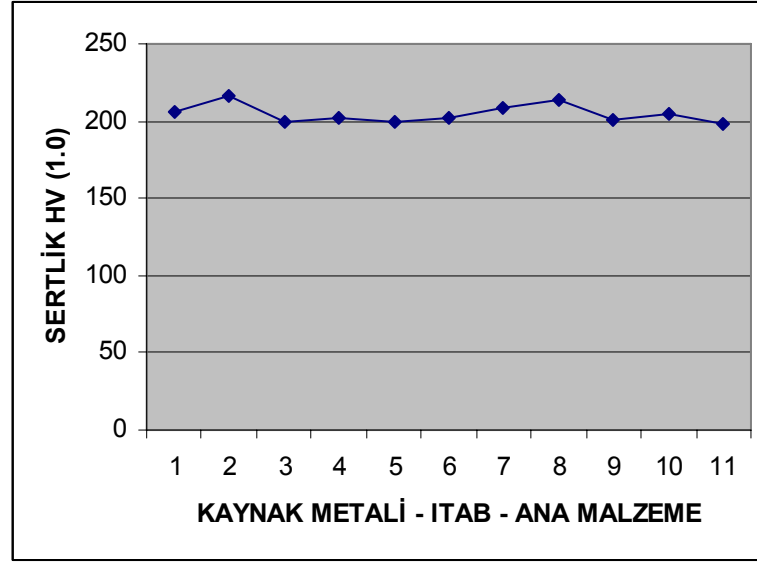
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.8 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.13 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sertlik (HV)	205.35	216.65	199.71	201.49	199.71	201.5	208.1	214.1	201.2	204.43	198.5



Şekil 6.9 45° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekilde de görüldüğü gibi en yüksek sertlik 2. bölgede olmuştur. Bunun nedeni olarak bu bölgede oluşabilmesi öngörülen kısmi martenzit yapı gösterilebilir. 8. bölgede de sertlikte bir artış görülmektedir, bu bölge ITAB bölgesi olduğundan ve kaynakta olası çatlakların oluşabileceği yer ITAB bölgesi olduğundan buradaki sertliğin yüksek olması zaten beklenen bir sonuç olup teoriyi desteklemektedir.

6.5.3 50° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.14 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MAG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
Kök paso	180	20	18.75	0.80
1.paso	180	20	14.1	0.80
2. paso	180	20	14.3	0.80
Arka yüzey 1. paso	180	20	35.3	0.80

6.5.3.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Çizelgedeki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

Kök paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{18.75 \times 1000} = 9.216 \text{ kJ/cm} = 921.6 \text{ J/mm}$$

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{14.1 \times 1000} = 12.255 \text{ kJ/cm} = 1225.5 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{14.3 \times 1000} = 12.08 \text{ kJ/cm} = 1208 \text{ J/mm}$$

Arka yüzey 1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{35.3 \times 1000} = 4.895 \text{ kJ/cm} = 489.5 \text{ J/mm}$$

6.5.3.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.4'teki veriler ve hesaplanan birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir.

Eldeki veriler ışığında ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

Kök paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{921.6} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 3.07 \text{ mm}$$

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1225.5} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 4.09 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1208} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 4.03 \text{ mm}$$

Arka yüzey 1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{489.5} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1.63 \text{ mm}$$

Çizelge 6.15 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	3.07
1. paso	4.09
2. paso	4.03
Arka yüzey 1. paso	1.63

Tablodan görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir. Ayrıca kaynak hızında meydana gelen bir artış ITAB genişliğinin azalmasına neden olmaktadır.

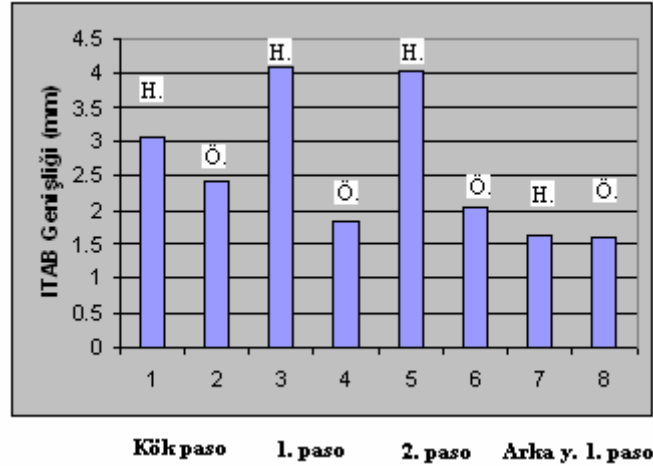
6.5.3.3 Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri

Kaynak işlemi sonlanıp numuneler daha önce anlatıldığı şekilde ölçümlere hazır hale getirildikten sonra kaynaklı parça üzerinde ITAB bölgesi gözle görülebilen bir hale gelmiştir.

Görülebilen bu ITAB bölgeleri kumpasla en az 5 kez ölçüldükten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak aşağıda bulunan tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.16 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	2.40
1. paso	1.85
2. paso	2.05
Arka yüzey 1. paso	1.60



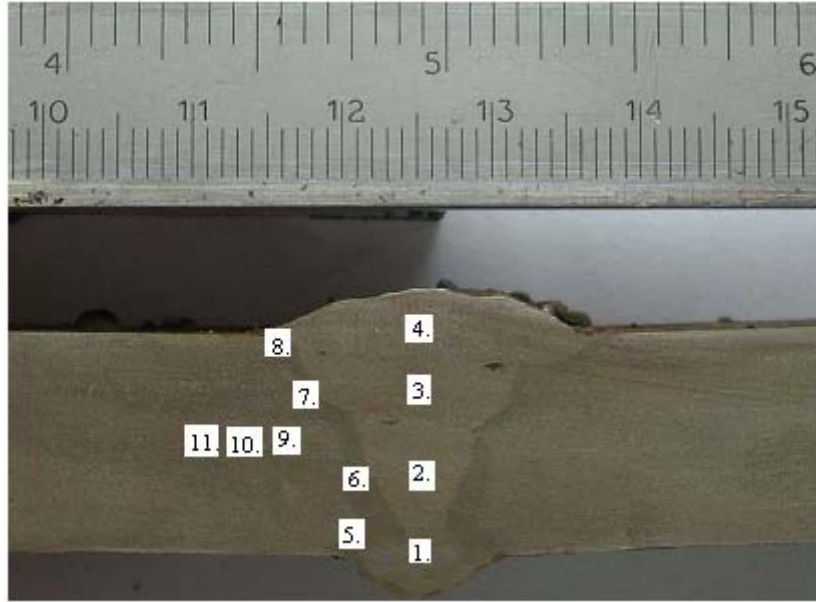
Şekil 6.10 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.

Hesaplanan ve ölçülen değerler incelendiğinde kök pasoda hesaplanan ITAB genişliğinin 1. pasodan daha düşük olmasına rağmen uygulama sonucu tam ters bir durum çıkmıştır. ITAB genişlik hesabı için kullandığımız eşitliğin literatürde de geçtiği gibi tek pasolu kaynaklar için daha iyi sonuçlar verdiği düşünülürse bu durum normal karşılanabilir. Ayrıca grafikte de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler incelendiğinde 1. paso ve 2. pasoda hesaplanan

ve ölçülen değerler arasındaki farkların nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu farkın nedeni hesaplanan değerlerin yanlış olmasından kaynaklanabilir. Çünkü kaynak işlemini uygulama esnasında, pasolar arası parçanın soğuması beklenmemiştir. Dolayısıyla kök paso hariç diğer pasolarda formülde kullanılan T_0 parçanın ilk sıcaklık değeri tam olarak tespit edilememiştir.

6.5.3.4 50° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

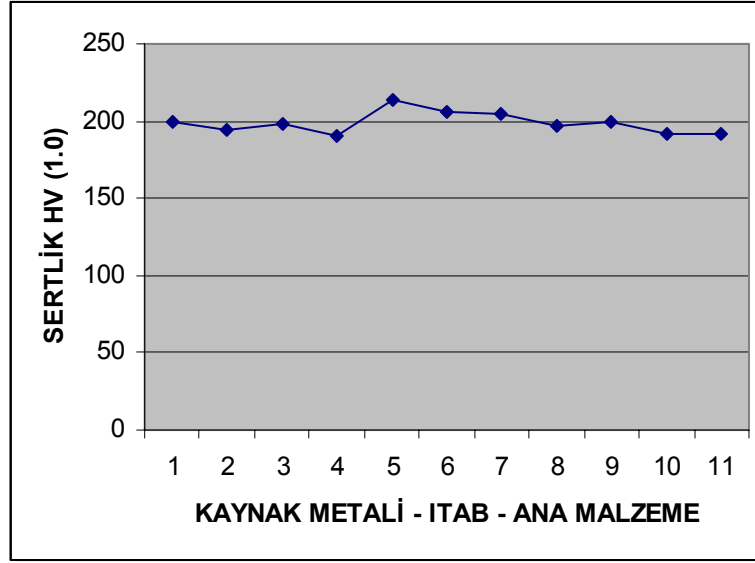
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.11 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.17 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sertlik (HV)	199.68	194.45	197.85	190.2	213.25	205.58	204.75	196.94	199.25	191.28	191.76



Şekil 6.12 50° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekilde en yüksek sertlik değerlerinin ITAB bölgesi olan 5, 6 ve 7. bölgelerde tespit edildiği görülmektedir. Bu sonuç literatürlerle de uyusmaktadır. Kaynak işlemi sonucunda sertliğin en yüksek ITAB bölgesinde olması, beklenen bir sonuçtur.

6.5.4 55° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.18 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MAG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
Kök paso	180	20	16.2	0.80
1.paso	180	20	20.7	0.80
2. paso	180	20	16.7	0.80
Arka yüzey 1.paso	180	20	36.3	0.80

6.5.4.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Tablodaki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

Kök paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{16.2 \times 1000} = 10.67 \text{ kJ/cm} = 1067 \text{ J/mm}$$

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{20.7 \times 1000} = 8.35 \text{ kJ/cm} = 835 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{16.7 \times 1000} = 10.35 \text{ kJ/cm} = 1035 \text{ J/mm}$$

Arka yüzey 1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{36.3 \times 1000} = 4.76 \text{ kJ/cm} = 476 \text{ J/mm}$$

6.5.4.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.4'teki veriler ve hesaplanan birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir.

Eldeki veriler ışığında ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

Kök paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1067} + \frac{1}{1450 - 20} \Rightarrow Y = 3.56 \text{ mm}$$

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{835} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2.78 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1035} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 3.45 \text{ mm}$$

Arka yüzey 1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1035} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1.59 \text{ mm}$$

Çizelge 6.19 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	3.56
1. paso	2.78
2. paso	3.45
Arka yüzey 1. paso	1.59

Çizelgeden görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir. Ayrıca kaynak hızında meydana gelen bir artış ITAB genişliğinin azalmasına neden olmaktadır.

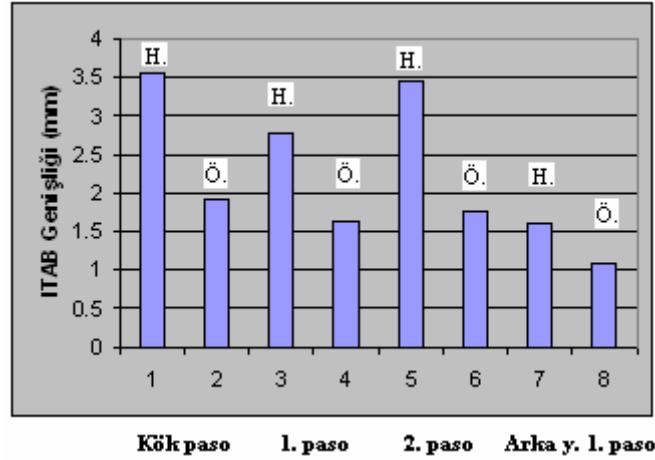
6.5.4.3 Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri

Kaynak işlemi sonlanıp numuneler daha önce anlatıldığı şekilde ölçümlere hazır hale getirildikten sonra kaynaklı parça üzerinde ITAB bölgesi gözle görülebilen bir hale gelmiştir.

Görülebilen bu ITAB bölgeleri kumpasla en az 5 kez ölçüldükten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak aşağıda bulunan tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.20 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	1.90
1. paso	1.65
2. paso	1.75
Arka yüzey 1. paso	1.10

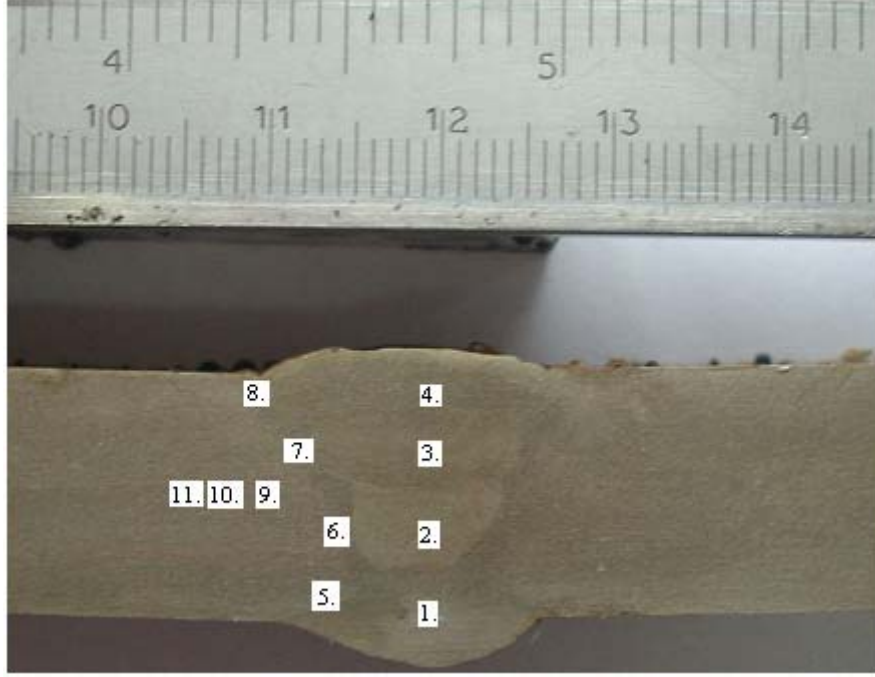


Şekil 6.13 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.

Şekilde de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler incelendiğinde 1. paso ve 2. pasoda hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farkların nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu farkın nedeni hesaplanan değerlerin yanlış olmasından kaynaklanabilir. Çünkü kaynak işlemini uygulama esnasında pasolar arası parçanın soğuması beklenmemiştir. Dolayısıyla kök paso hariç diğer pasolarda formülde kullanılan T_0 parçanın ilk sıcaklık değeri tam olarak tespit edilememiştir.

6.5.4.4 55° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

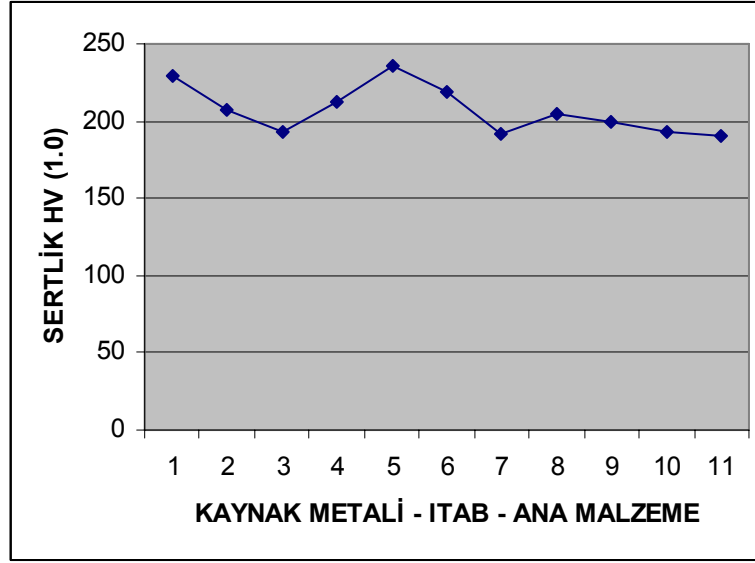
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.14 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.21 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sertlik (HV)	228,9	206.9	193.5	212.75	236.32	218.55	191.87	204.73	200.05	192.83	190.73



Şekil 6.15 55° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekil incelendiğinde sertliğin en yüksek seviyeye 5. bölgede çıktığı görülmektedir. Bu bölge ITAB bölgeine karşılık geldiğinden sonuç beklendiği gibi çıkmıştır. Ayrıca 8. bölgeden sonra sertlikte düzenli bir düşüş görülmektedir. Bu da bize kaynak bölgesinden ana malzemeye gidildikçe sertliğin düştüğünü göstermiştir. Sonuç olarak kaynak bölgesi daima ana malzemeye göre daha fazla risk içerir diyebiliriz.

6.5.5 60° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.22 St37 numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MAG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
Kök paso	180	20	22.2	0.80
1.paso	180	20	21	0.80
2. paso	180	20	15.8	0.80
Arka yüzey 1.paso	180	20	44.1	0.80

6.5.5.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Çizelgedeki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

Kök paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{22.2 \times 1000} = 7,784 \text{ kJ/cm} = 778.4 \text{ J/mm}$$

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{21 \times 1000} = 8.23 \text{ kJ/cm} = 823 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{15.8 \times 1000} = 10.93 \text{ kJ/cm} = 1093 \text{ J/mm}$$

Arka yüzey 1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.80 \times 60 \times 20 \times 180}{44.1 \times 1000} = 3.92 \text{ kJ/cm} = 392 \text{ J/mm}$$

6.5.5.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.4'teki veriler ve hesaplanan birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir.

Eldeki veriler ışığında ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

Kök paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{778.4} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2.60 \text{ mm}$$

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{823} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 2.75 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{1093} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 3.65 \text{ mm}$$

Arka yüzey 1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{730 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0078 \times 0.44 \times 15 \times Y}{392} + \frac{1}{1450 - 20} \rightarrow Y = 1.34 \text{ mm}$$

Çizelge 6.23 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	2.60
1. paso	2.75
2. paso	3.65
Arka yüzey 1. paso	1.34

Çizelgeden görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir. Ayrıca kaynak hızında meydana gelen bir artış ITAB genişliğinin azalmasına neden olmaktadır.

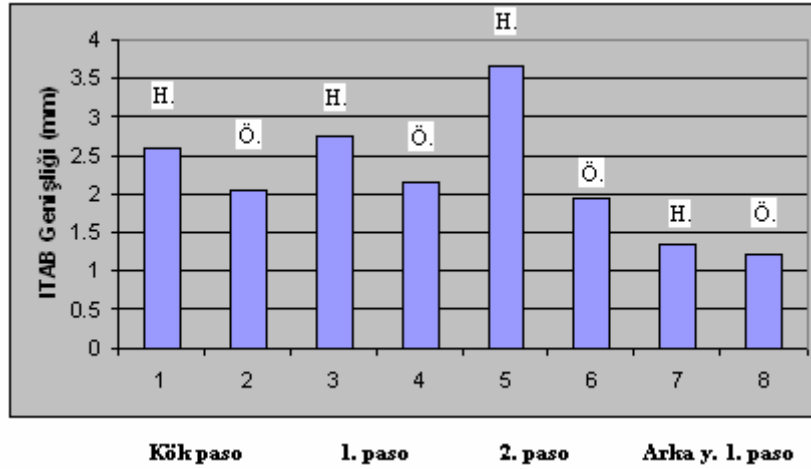
6.5.5.3 Uygulanan Pasolara Göre Kaynak Sonrası Numune Üzerinden Ölçülen ITAB Genişlikleri

Kaynak işlemi sonlanıp numuneler daha önce anlatıldığı şekilde ölçümlere hazır hale getirildikten sonra kaynaklı parça üzerinde ITAB bölgesi gözle görülebilen bir hale gelmiştir.

Görülebilen bu ITAB bölgeleri kumpasla en az 5 kez ölçüldükten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak aşağıda bulunan tablodaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.24 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin ölçülen ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
Kök paso	2.05
1. paso	2.15
2. paso	1.95
Arka yüzey 1. paso	1.20



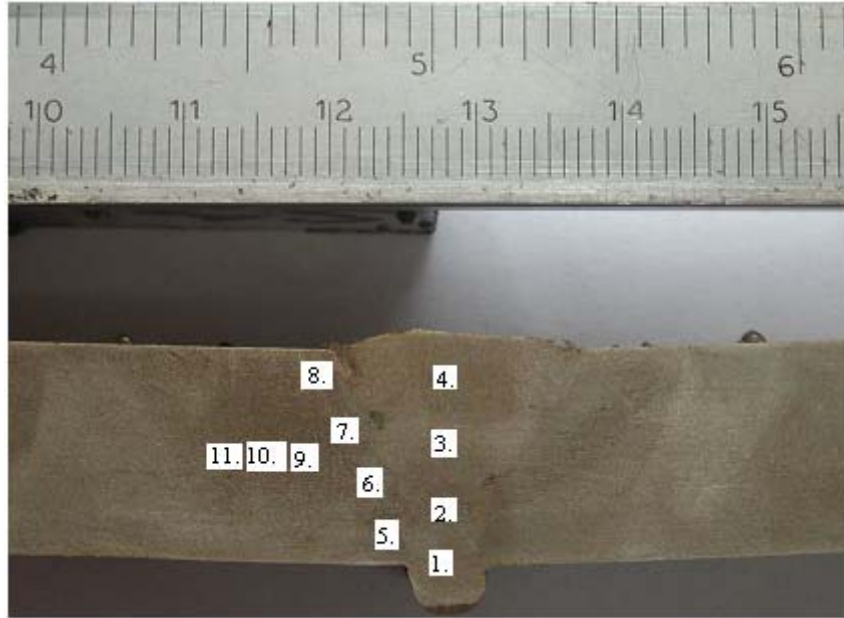
Şekil 6.16 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunelerin ölçülen ve hesaplanan ITAB genişliklerinin karşılaştırılması.

Şekilde de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler incelendiğinde 2. pasoda hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farkların nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Meydana gelen bu farkın nedeni hesaplanan değerlerin yanlış olmasından kaynaklanabilir. Çünkü kaynak işlemini uygulama esnasında pasolar arası parçanın soğuması beklenmemiştir. Dolayısıyla kök paso hariç diğer pasolarda formülde kullanılan T_0 ; parçanın ilk sıcaklık

değeri tam olarak tespit edilememiştir. Ayrıca incelenen tüm St37 numunelerde de aynı şekilde hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki en yüksek farklar her zaman 2. pasoda çıkmıştır. Bunun nedeni kaynak ağzı V olduğu için yukarıya doğru kaynak yapılan alanın genişlemesi olarak düşünülmüştür.

6.5.5.4 60° V Kaynak Ağzına Sahip St37 Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

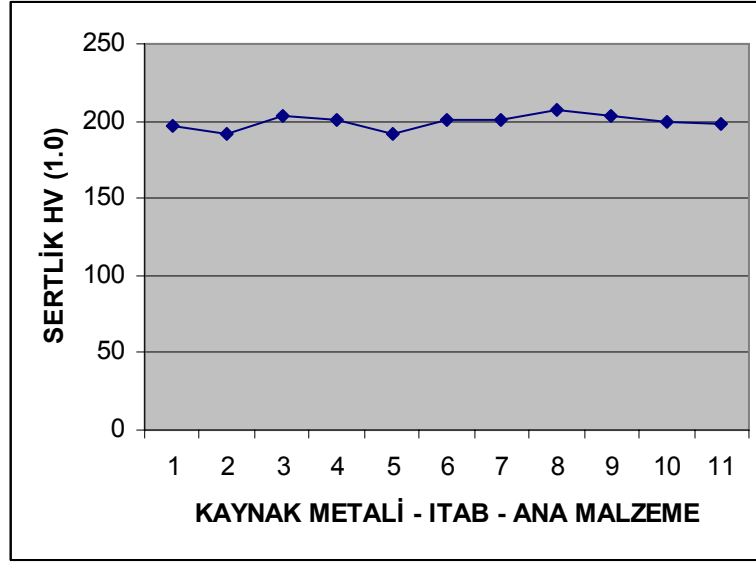
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.17 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.25 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sertlik (HV)	197.39	191.41	203.6	201.26	191.85	200.86	200.25	207.59	203.5	199.15	198.4



Şekil 6.18 60° V Kaynak ağzına sahip St37 numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekil incelendiğinde en yüksek ve en düşük sertlik değerleri arasındaki farkın çok fazla olmadığı görülmektedir. Bu da bize kaynak işleminde seçilen kaynak parametrelerinin ne kadar ideale yakın olduğunu göstermektedir. En yüksek sertlik değeri 8. bölgede yani bir ITAB bölgesinde ölçülmüştür.

6.6 Kaynak Açıklarına Göre St37 Numunelerin Nüfuziyetlerinin Karşılaştırılması

St37 numunelerin kaynak işleminin MAG kaynak yöntemiyle gerçekleştirilmiş olduğu daha önceki konularda da belirtilmişti. Kaynak işlemlerinin hepsi Murex Transmatic 305 markalı yarı otomatik MIG - MAG kaynak makinasında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan makine yarı otomatik olduğundan, kaynak hızı sabitlenememiş olup, kaynak hızı tamamen operatör inisiyatifinde olmak üzere işlem gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla elde edilen sonuçların yorumlanmasında bu konuda gözönünde bulundurulacaktır. Sonuç olarak aşağıda resimleri görülen uygulamalarda değişken parametreler, ağız açısı ve kaynak hızıdır. Diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur.



a) Kaynak ağız açısı : 40°

Kaynak hızı (cm/dak)	
Kök paso	16.3
1. paso	22.4
2. paso	17.6
Arka y. 1. paso	44.4



b) Kaynak Ağız açısı : 45

Kaynak hızı (cm/dak)	
Kök paso	23
1. paso	24
2. paso	20
Arka y. 1. paso	28.6



c) Kaynak ağız açısı : 50°

Kaynak hızı (cm/dak)	
Kök paso	18.75
1. paso	14.1
2. paso	14.3
Arka y. 1. paso	35.3



d) Kaynak ağız açısı : 55°

Kaynak hızı (cm/dak)	
Kök paso	16.2
1. paso	20.7
2. paso	16.7
Arka y. 1. paso	36.3



e) Kaynak ağız açısı : 60°

Kaynak hızı (cm/dak)	
Kök paso	22.2
1. paso	21
2. paso	15.8
Arka y. 1. paso	44.1

Şekil 6.19 Kaynak edilmiş St37 numunelerin nüfuziyetlerinin karşılaştırılması.

Literatürde en iyi nüfuziyetin 50° ila 60° V kaynak ağız açısında olması bekleniyordu. Yukarıdaki resimlere baktığımızda en iyi nüfuziyetin 55° ağız açısında olduğu görülmektedir. Fakat bu çalışmada kaynak ağız açısı tek belirleyici faktör olamamış kaynak hızı sabit tutulamadığından kaynak hızının da nüfuziyete etkisi olmuştur. Kaynak hızının yüksek olduğu durumlarda nüfuziyette bir düşüş görülmektedir. Bu yüzden, bu konstrüksiyonda ve ölçülerdeki bir parça için, 55° 'lik kaynak ağız açısı kesin olarak en iyi nüfuziyeti elde etmemizi sağlar sonucuna varamayız.

6.7 AlMgZn Numunelerin Kaynak İşlemleri

Bu bölümde kaynak işlemi sonrasında AlMgZn numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinden bahsedilecektir. Daha önce numune hazırlama konusunda bahsedildiği üzere numunelerin dağlanması neticesinde ITAB genişlikleri görülemediğinden sadece hesaplanan ITAB genişlik değerlerine yer verilecektir.

Kaynak işlemi daha önce de belirtildiği üzere MIG kaynak yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işleminde kullanılan numunenin malzeme özellikleri ve kaynak elektrodunun ve numunenin kimyasal bileşimi aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Kaynak için kullanılan elektrot Kobatek MIG AlSi 5 olup elektrot çapı $\varnothing 1$ mm'dir.

Çizelge 6.26 AlMgZn Malzeme özellikleri.

Malzeme	Ergime sıcaklığı (T_m) ($^\circ\text{C}$)	Özgül ısınma ısısı (c_m) (J/g. $^\circ\text{C}$)	Yoğunluk (ρ) (g/mm ³)	İlk sıcaklık (T_0) ($^\circ\text{C}$)
AlMgZn (15mm)	658	0.898	0.0027	20

Çizelge 6.27 AlMgZn Alaşımı kimyasal içeriği.

% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb ve Sn	% Al
0.219	0.324	0.184	0.468	2.46	1.11	0.00696	0.109	$0.0238 < 0.00500$	95.1

Çizelge 6.28 Kaynak elektrodu kimyasal içeriği KOBATEK MIG ALSI 5.

% Si	% Mn	% Fe	% Zn	% Ti	% Al
4.5 – 5.5	< 0.05	< 0.40	< 0.10	0.15	Kalan

6.7.1 40° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.29 40° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MIG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
1. paso	200	25	18.2	0.75
2. paso	200	25	20.4	0.75

6.7.1.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Tablodaki veriler ışığında denklem (4.4)’ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{18.2 \times 1000} = 12.36 \text{ kJ/cm} = 1236 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{20.4 \times 1000} = 11.03 \text{ kJ/cm} = 1103 \text{ J/mm}$$

6.7.1.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.26’deki veriler ve elde edilen birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir. Tüm AlMgZn numuneler için tepe sıcaklığı $T_p = 325 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Bu veriler kullanılarak, denklem (4.8)’den faydalananarak ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{1236} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 14.38 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{1103} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 12.57 \text{ mm}$$

Çizelge 6.30 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

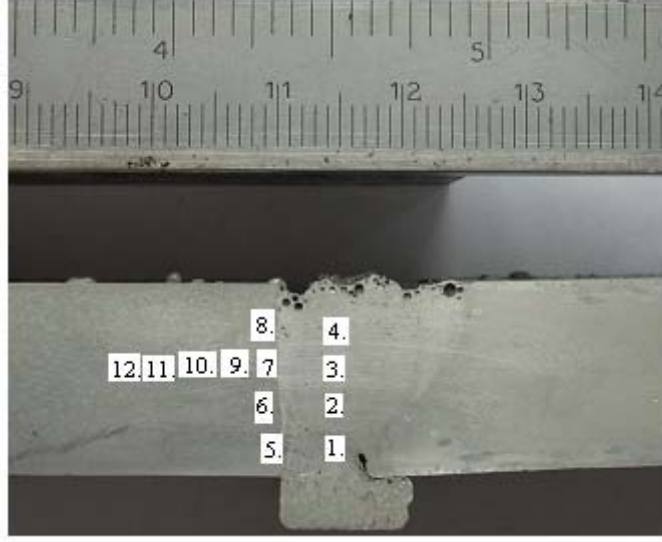
Paso	ITAB Genişliği (mm)
1. paso	14.38
2. paso	12.57

Çizelgeden görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir.

6.7.1.3 40° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

Daha önce numune hazırlama metotları başlığı altında numunenin sertlik ölçümüne nasıl hazır hale getirildiği anlatılmıştı. Sertlik ölçüm işlemleri Vickers sertlik tarama cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik taraması, parça yüzeyine 10 sn süre boyunca 1 kg'lık deney yükü uygulanarak, kaynak metali – ITAB – ana malzeme boyunca hat biçiminde 2 mm ve gerektiği durumlarda 3 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar tüm AlMgZn numunelerde standart olduğundan bir daha anlatılmayacaktır.

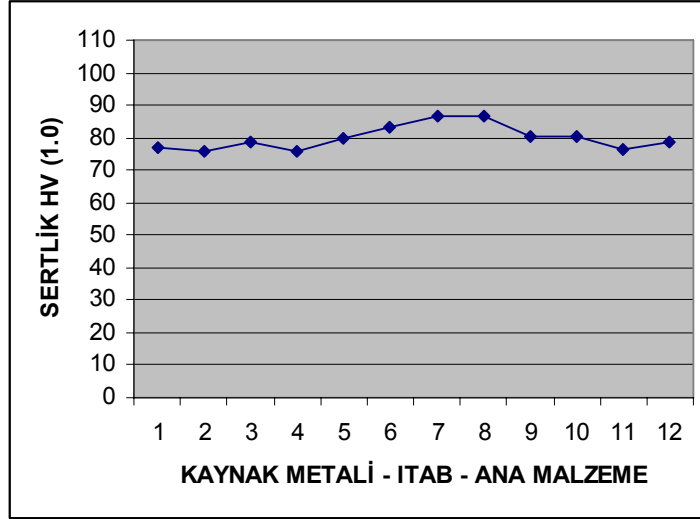
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.20 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.31 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sertlik (HV)	77.13	75.99	78.55	75.59	79.72	83.11	86.57	86.84	80.31	80.53	76.26	78.81



Şekil 6.21 40° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekil 6.21 incelenecek olursa; sertlik, ITAB bölgesinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Kaynak metalı sertliği ve ana malzeme sertliği arasında belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır. Bu da bize seçilen kaynak parametrelerinin işlem için çok uygun olduğunu göstermektedir. Sertliğin ITAB bölgesinde en yüksek değere ulaşması literatürü de destekleyen bir sonuçtur.

6.7.2 45° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.32 45° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MIG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
1. paso	200	25	25.8	0.75
2. paso	200	25	32.9	0.75

6.7.2.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Çizelgedeki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{25.8 \times 1000} = 8.721 \text{ kJ/cm} = 872.1 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{32.9 \times 1000} = 6.84 \text{ kJ/cm} = 684 \text{ J/mm}$$

6.7.2.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.26'daki veriler ve elde edilen birim dikiş enerji değerleri kullanılarak, pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir. Tüm AlMgZn numuneler için tepe sıcaklığı $T_p = 325 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Bu veriler kullanılarak denklem (4.8) ile ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{872.1} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 9.94 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{684} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 7.80 \text{ mm}$$

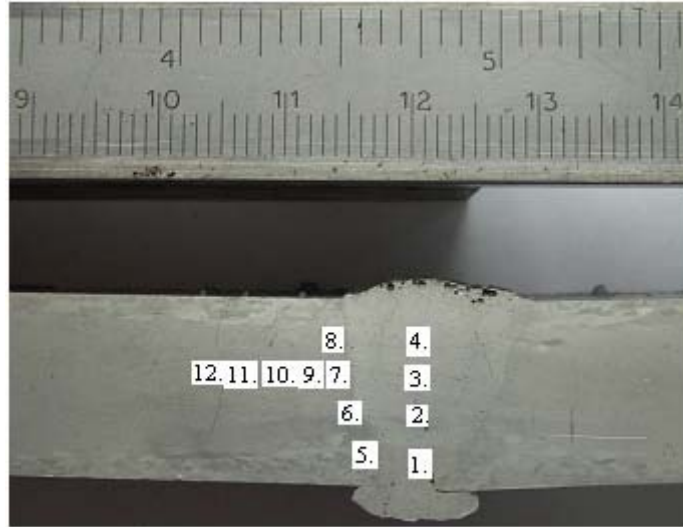
Çizelge 6.33 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
1. paso	9.94
2. paso	7.80

Çizelgeden görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir.

6.7.2.3 45° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

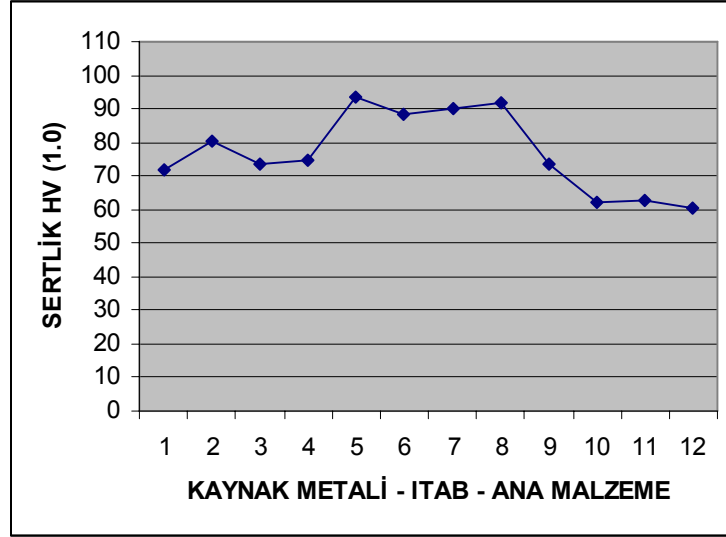
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.22 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.34 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sertlik (HV)	71.92	80.27	73.61	74.7	93.26	88.25	89.91	92	73.56	62.1	62.41	60.36



Şekil 6.23 45° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekil 6.23 incelenecek olursa, sertlik ITAB bölgesinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Kaynak metal sertliği ve ana malzeme sertliği arasında belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır. Kaynak metal sertliği ana metalden bir miktar daha fazladır. Bu da bize seçilen kaynak parametrelerinin işlem için çok uygun olduğunu göstermektedir. Sertliğin ITAB bölgesinde en yüksek değere ulaşması literatürü de destekleyen bir sonuçtur. ITAB bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe sertlikte bir düşüş göze çarpmaktadır. Bu bize ana malzemenin dayanımının kaynak bölgesi ve ITAB'dan daha fazla olduğunu göstermektedir.

6.7.3 50° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.35 50° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MIG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
1. paso	200	25	30.8	0.75
2. paso	200	25	27	0.75

6.7.3.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Tablodaki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{30.8 \times 1000} = 7.30 \text{ kJ/cm} = 730 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{27 \times 1000} = 8.33 \text{ kJ/cm} = 833 \text{ J/mm}$$

6.7.3.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.26'daki veriler ve elde edilen birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir. Tüm AlMgZn numuneler için tepe sıcaklığı $T_p = 325^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Bu veriler kullanılarak denklem (4.8) yardımıyla ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{730} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 8.33 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{833} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 9.49 \text{ mm}$$

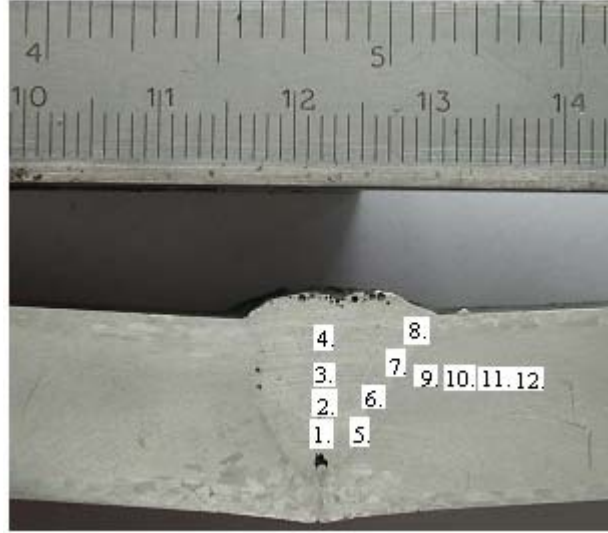
Çizelge 6.36 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
1. paso	8.33
2. paso	9.49

Tablodan görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir.

6.7.3.3 50° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

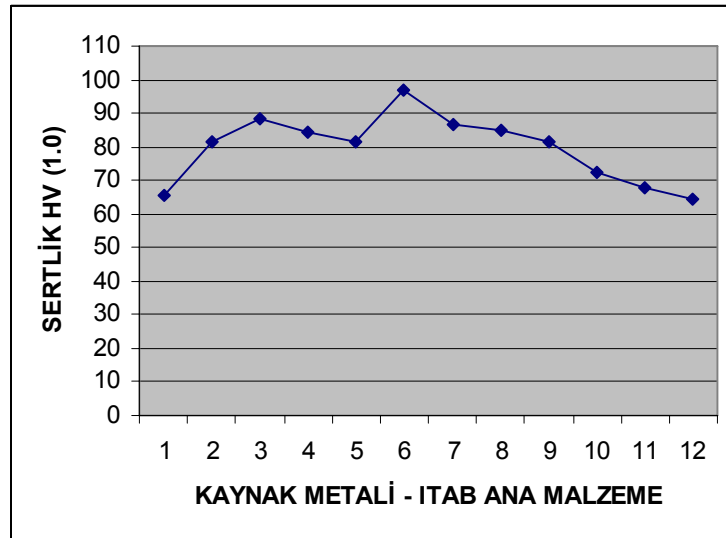
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.24 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.37 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sertlik (HV)	65.49	81.28	88.23	84.3	81.74	97.14	86.81	85.2	81.35	72.1	67.77	64.4



Şekil 6.25 50° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekil 6.25 incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 6. bölgede, yani ITAB bölgelerinden birinde olduğu görülmektedir. Bu durumdan, soğuma hızının ITAB bölgesinde daha hızlı olduğu; kaynak metalinde ise soğuma hızının ITAB’a nazaran daha düşük olduğu bunun sonucunda da, ITAB’da daha sert bir yapının oluştuğu sonucuna varılmaktadır. Yine kaynak metalinden ana metale doğru gidildikçe sertliğin düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir.

6.7.4 55° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.38 55° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MIG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
1. paso	200	25	29.5	0.75
2. paso	200	25	25.3	0.75

6.7.4.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Tablodaki veriler ışığında denklem (4.4)’ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{29.5 \times 1000} = 7.63 \text{ kJ/cm} = 763 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\dot{\eta} \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{25.3 \times 1000} = 8.89 \text{ kJ/cm} = 889 \text{ J/mm}$$

6.7.4.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.26’daki veriler ve elde edilen birim dikiş enerji değerleri kullanılarak pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir. Tüm AlMgZn numuneler için tepe sıcaklığı $T_p = 325^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Bu veriler kullanılarak denklem (4.8) yardımıyla ITAB genişlik değerleri teorik olarak aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{763} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 8.68 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{889} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 10.14 \text{ mm}$$

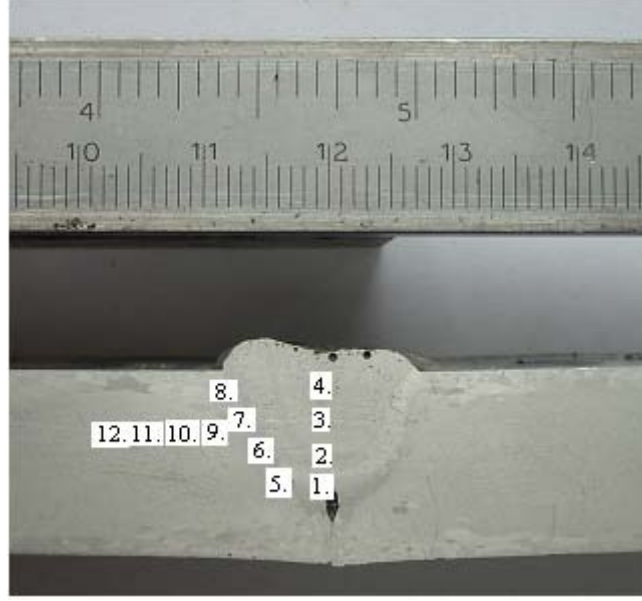
Çizelge 6.39 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
1. paso	8.68
2. paso	10.14

Tablodan görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir.

6.7.4.3 55° Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

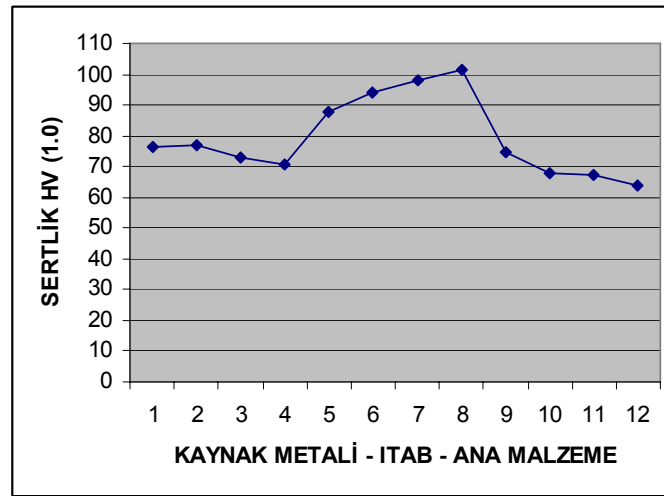
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.26 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.40 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sertlik (HV)	76.51	76.92	72.7	70.75	87.54	93.76	98.12	101.64	74.48	68.1	67.15	64.1



Şekil 6.27 55° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

Şekil 6.27 incelendiğinde sertlik değeri bu numunede 100HV'nin üzerine çıkmıştır. Sertlik değerleri, kaynak metali ve ana malzemede birbirine çok yakın değerler olarak çıkmıştır. Buna rağmen ITAB bölgelerinde yapılan incelemelerde sertliğin en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu numune için kaynaklı yapıda dayanımın en düşük olduğu bölgeler ITAB bölgeleridir. Yine ITAB'dan ana metale doğru gidildikçe sertliğin düzenli bir şekilde azaldığı görülmektedir.

6.7.5 60° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Kaynağı

Çizelge 6.41 60° Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numune kaynağında kullanılan kaynak parametreleri.

Yöntem (MIG)	Kaynak akımı (A)	Kaynak gerilimi (V)	Kaynak hızı (cm/dak)	Verim Katsayısı
1. paso	200	25	27	0.75
2. paso	200	25	24.5	0.75

6.7.5.1 Uygulanan Pasolara Göre Birim Dikiş Enerjisinin Teorik Hesabı

Tablodaki veriler ışığında denklem (4.4)'ten yararlanarak hesaplamalar aşağıda yapılmıştır.

1. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{27 \times 1000} = 8.33 \text{ kJ/cm} = 833 \text{ J/mm}$$

2. paso için BDE hesabı:

$$q = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{V_k \times 1000} = \frac{0.75 \times 60 \times 25 \times 200}{24.5 \times 1000} = 9.18 \text{ kJ/cm} = 918 \text{ J/mm}$$

6.7.5.2 Uygulanan Pasolara Göre ITAB Genişliklerinin Teorik Hesabı

Çizelge 6.26'daki veriler ve elde edilen birim dikiş enerji değerleri kullanılarak, pasolara göre ITAB genişlikleri denklem (4.8) ile hesaplanabilir. Tüm AlMgZn numuneler için tepe sıcaklığı $T_p = 325 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Bu veriler kullanılarak denklem (4.8) yardımıyla ITAB genişlik değerleri teorik olarak

aşağıda hesaplanmış ve tablo yardımıyla gösterilmiştir.

1. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\rightarrow \frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{833} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 9.49 \text{ mm}$$

2. paso için ITAB genişliği hesabı:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \times \rho \times c_m \times t \times Y}{q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\frac{1}{325 - 20} = \frac{4.13 \times 0.0027 \times 0.898 \times 15 \times Y}{918} + \frac{1}{658 - 20} \rightarrow Y = 10.46 \text{ mm}$$

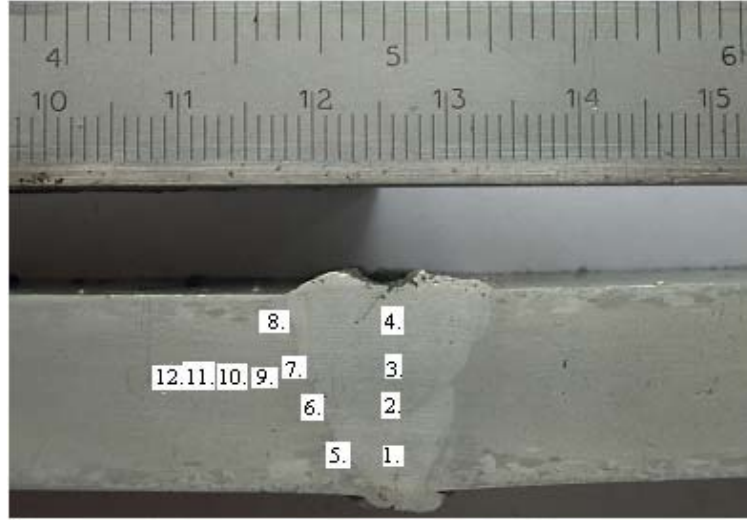
Çizelge 6.42 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin hesaplanan ITAB genişlikleri.

Paso	ITAB Genişliği (mm)
1. paso	9.49
2. paso	10.46

Tablodan görüldüğü üzere yüksek birim dikiş enerjisiyle birlikte ITAB genişliği de doğru orantılı olarak bir artma göstermiştir.

6.7.5.3 60° V Kaynak Ağzına Sahip AlMgZn Numunenin Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Bulunan Sonuçların İrdelenmesi

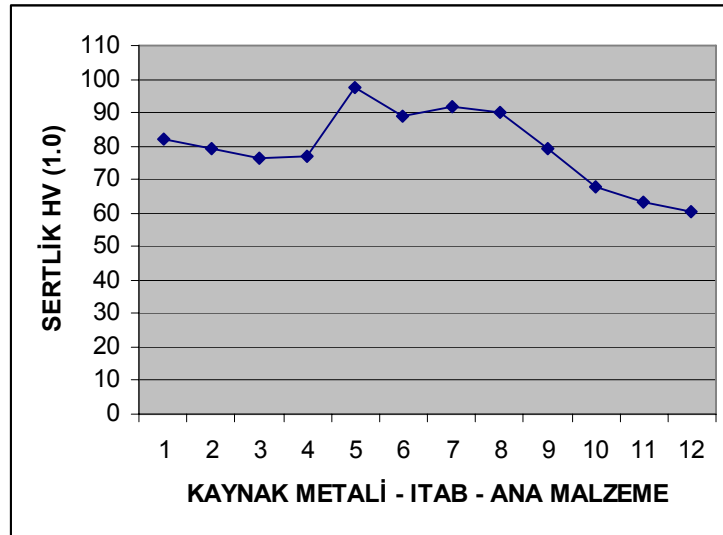
Aşağıdaki fotoğraf üzerinde sertlik taraması yapılan bölgeler ayrıca gösterilmiştir. Sertlik tarama sonuçlarının daha sağlıklı olması açısından her noktadan en az 3 ölçüm alınıp bunların ortalaması sonuca yansıtılmıştır.



Şekil 6.28 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik taraması yapılan bölgeler.

Çizelge 6.43 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunede sertlik tarama sonuçları.

Bölge No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sertlik (HV)	81.81	79.1	76.64	76.71	97.41	88.91	91.67	90.33	79.32	67.55	63.21	60.53



Şekil 6.29 60° V Kaynak ağzına sahip AlMgZn alaşımı numunenin sertlik tarama sonuçlarının grafik analizi.

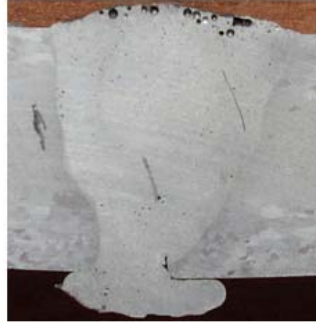
Şekil 6.29 incelendiğinde, sertlik değerinin en yüksek olduğu bölge bu numunede de ITAB bölgesi olarak göze çarpmaktadır. Numunenin dayanımının en düşük olduğu bölge ITAB bölgesidir. Genel olarak baktığımızda AlMgZn numunelerin hepsinde en yüksek sertlik değerleri ITAB bölgesinde çıkmıştır. Bu da literatürü desteklemektedir.

6.8 Kaynak Uygulamalarında Meydana Gelen Hatalar ve Nedenleri

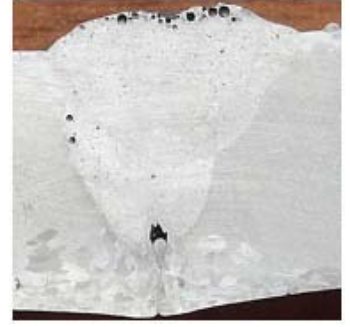
AlMgZn numunelerin kaynak işleminin MIG kaynak yöntemiyle gerçekleştirilmiş olduğu daha önceki konularda da belirtilmişti. Kaynak işlemlerinin hepsi Murex Transmatic 305 markalı yarı otomatik MIG - MAG kaynak makinasında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan makine yarı otomatik olduğundan kaynak hızı sabitlenememiş olup, kaynak hızı tamamen operatör inisiyatifinde olmak üzere işlem gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla elde edilen sonuçların yorumlanmasında bu konu da gözönünde bulundurulacaktır. Sonuç olarak aşağıda resimleri görülen uygulamalarda değişken parametreler ağız açısı ve kaynak hızıdır. Diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur.



Kaynak ağız açısı : 40°



Kaynak ağız açısı : 45°



Kaynak ağız açısı : 50°

Kaynak hızı (cm/dak)	
1. paso	18.2
2. paso	20.4

Kaynak hızı (cm/dak)	
1. paso	25.8
2. paso	32.9

Kaynak hızı (cm/dak)	
1. paso	30.8
2. paso	27



Kaynak ağız açısı : 55°



Kaynak ağız açısı : 60°

Kaynak hızı (cm/dak)	
1. paso	29.5
2. paso	25.3

Kaynak hızı (cm/dak)	
1. paso	27
2. paso	24.5

Şekil 6.19 Kaynak edilmiş AlMgZn numunelerin nüfuziyetlerinin karşılaştırılması.

Uygulama esnasında AlMgZn numunelerin kaynak işlemi St37 numunelere göre daha zor gerçekleştirilmiştir. Gerek her pasodan sonra meydana gelen oksitlenmeler, gerek parçanın kök aralığının ayarlanamaması, gerekse kaynakçının St37 uygulamalarında gösterdiği performansı AlMgZn numunelerde gösterememesi nedeniyle kaynak dikişlerinde istenilen

verim düzeyine erişilememiştir. Bu yüzden resimlerden de görülebildiği gibi kaynak dikişlerinde boşluklar, taşma, eksik nüfuziyet ve küçük gözenekler gibi çeşitli kaynak hataları meydana gelmiştir.

Meydana gelen kaynak hatalar üzerine yorum yapacak olursak; 40° ve 45°'lik kaynak ağzına sahip parçalarda arka yüzeyde bir taşma dikkate çarpmaktadır. Aynı kaynak taşması 60°'lik ağız açısına sahip numunede de görülmektedir. Meydana gelen bu kaynak taşmalarının nedeni parçaların iyi sabitlenememesinden oluşan kök aralığıdır, eksik nüfuziyetin nedeni olarak kaynak işleminin hızlı yapılmasını gösterebiliriz. Meydana gelen gözeneklerin nedeni ise, kaynak bölgesine koruyucu gazın eksik ve düzensiz gitmesinden oluşmuştur diyebiliriz. Yine boşlukların oluşma nedeni ise kaynak işleminden önce kaynaklanacak bölgenin yeterince temizlenememesinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak AlMgZn alaşımı numuneler üzerine yapılan çalışmalarda meydana gelen kaynak hatalarından dolayı nüfuziyet üzerine bir yorum yapmak mümkün olamamaktadır.

Bu çalışma daha ziyade farklı kök aralıklarında ve yanlış parça sabitleme durumunda meydana gelen kaynak hataları konusunda bizi aydınlatmaktadır.

Buna rağmen numunelerin sertlikleri ve ITAB genişlikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar oldukça verimli ve kullanılabilir. Çünkü, ITAB genişlikleri ve sertlikleri etkileyen ısı girdisi sonucu uygulanan birim dikiş enerjisi, kaynak parametreleriyle değişmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada birim dikiş enerjisinin ITAB bölgesi üzerindeki çeşitli etkileri teorik açıdan ve deneysel açıdan incelenmiştir. Deney sonuçları teorik sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulukları bir kez daha sorgulanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları aşağıda yer almaktadır.

1. St37 numuneler üzerinde yapılan çalışma sonucunda numunelerin ITAB boyutları ölçülmüş ve teorik hesaplarla elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde, birim dikiş enerjisinin artması ile ITAB genişliğinin de artacağı belirtilmektedir. Bu durumu, St37 numuneler üzerine yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar aynen destekler niteliktedir. Farklı V kaynak ağız açılarının ITAB genişliği üzerine belirgin bir etkisi görülmemiştir.

Tüm numunelerde kök pasoya ait hesaplanan ve ölçülen değerler arasında belirgin bir fark olmamasıyla birlikte, genellikle diğer pasoların hesaplanan ve ölçülen değerleri arasında nispeten büyük farklar dikkat çekmektedir. Bunun nedeni, ardarda yapılan kaynak pasolarında, atılan her kaynak pasosundan sonra parçanın soğuması beklenmeden diğer kaynak pasosunun uygulanmasıdır. Her paso bir sonraki paso için bir tavlama işlemi haline gelmiştir ve meydana gelen tavlama sıcaklığı ölçülemediği için. Bunun neticesinde teorik hesaplamada kullandığımız formüldeki T_0 ; parçanın kaynak öncesi sıcaklık değeri ölçülemediğinden, bu değer formüle gerçekçi bir yaklaşımla yansıtılamamıştır.

Bununla birlikte, bahsedildiği üzere kök pasolarda hesaplanan ve ölçülen ITAB genişlikleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu bize teoride ITAB genişliğini hesaplamak için kullanılan formülün tek pasolu kaynak işlemleri için gayet başarılı sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Bir başka çalışmada pasolar arası parçanın soğuması beklenerek çoklu pasolu işlemlerde teorik formülün ne denli geçerli olduğu daha net bir şekilde incelenebilir.

2. St37 numuneler üzerinde yapılan diğer bir çalışmada kaynak sonrası kaynak bölgesinin sertlikleri HV Vickers sertliği cinsinden ölçülmüştür.

45° ve 50° V kaynak ağız açısına sahip numunelerde en yüksek sertlik değerleri, kaynak metalinde ölçülmüştür. Bu sonuçlar literatürü destekler nitelikte değildir. Literatüre göre, kaynak işleminden sonra en yüksek sertlik çatlama riskinin yüksek olduğu ITAB bölgesinde olmalıydı. Sertliğin kaynak metalinde en yüksek değere ulaşmasının nedeni olarak, kaynak metalinin ITAB'dan daha hızlı soğuması sonucu elde edilen yapıların, ITAB'da elde edilen yapılardan daha sert olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 50°, 55° ve 60° kaynak ağız açısına sahip numunelerde ise en yüksek sertlik değerleri ITAB bölgelerinde görülmüştür. Bu

sonuçlar literatürü desteklemektedir. Çatlak riskinin, kaynak metaline göre daha yüksek olduğu ITAB bölgesinde sertliğin yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur.

Genel olarak tüm numuneler üzerindeki sertlik ölçüm sonuçlarına bakılacak olursa, kaynak metalinin ve ITAB bölgesinin sertliğinin ana malzeme sertliğinden yüksek olduğu dikkati çekmektedir. Kaynak işlemi esnasındaki ısı etkilerinin kaynak bölgesinin dayanımını olumsuz etkilediği buradan da anlaşılmaktadır.

3. 200x160x15 boyutlarında çoklu paso yöntemiyle kaynak edilmiş olan St37 numunelerde en iyi kaynak nüfuziyetinin 55° V kaynak ağız açısına sahip olan numunede meydana geldiği görülmüştür. Buna rağmen bu konstrüksiyon için en uygun kaynak ağız formu budur denilmemesi gerekmektedir. Çünkü kaynak işlemi esnasında değişken tek parametre olarak kaynak ağız açısı tutulamamıştır. Kaynak makinasının yarı otomatik olmasından dolayı kaynak hızı da her pasoda değişme göstermiştir. Kaynak hızı ayarı, tamamen kaynakçı inisiyatifine kalmıştır. Dolayısıyla, kaynak ağız açısı kadar kaynakçının performansı da kaynak nüfuziyetine etkimiştir. Buna rağmen literatüre bakılacak olursa, bu boyutlardaki bir parçanın kaynağında tavsiye edilen ağız açılarının 50° ila 60° arasında olduğu görülmektedir.

4. AlMgZn numuneler üzerine yapılmış olan çalışmada öncelikli olarak teorik ITAB genişlikleri hesaplanmıştır. Teorik sonuçlarda ITAB genişlikleri, St37 numunelerin ITAB genişlikleri ile karşılaştırıldığında, biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum, iki malzeme arasındaki ergime sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Bunun yanısıra, numuneler üzerinde kaynak metalini ITAB sınırı görülebilmesine rağmen; ITAB genişliği numuneler üzerinde görülemediği için, ITAB genişliğinin ölçümü yapılamamış dolayısıyla hesaplanan ve ölçülen değerler karşılaştırılamamıştır.

5. AlMgZn numunelerde de kaynak metalini – ITAB - ana malzeme hattı üzerinde Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda tüm numunelerde en yüksek sertlik değerleri ITAB bölgesinde çıkmıştır. Bu literatürü de desteklemektedir. Kaynak metalini sertliği ise ana malzeme sertliğinden yüksek olsa da aralarında çok büyük bir fark olmadığı görülmüştür. Tüm numunelerde benzer sonuçlar elde edildiğine göre; kaynak ağız açısının, kaynak bölgesi sertliğine belirgin bir etkisinin olmadığını söyleyebiliriz.

6. AlMgZn numunelerin kaynak bölgesi incelendiğinde, nüfuziyetlerin istenilen düzeyde olmadığı söylenebilir. Çünkü, AlMgZn numunelerin kaynağı esnasında kaynakçı, St37 numunelerin kaynağında gösterdiği performansı gösterememiştir. Bu yüzden kaynak bölgelerinde çeşitli kaynak hataları görülmüştür. Bu nedenle AlMgZn numunelerin

nüfuziyetlerine dair herhangi bir saptama yapılamamıştır. Buna rağmen çalışma bize hangi durumlarda ne tür kaynak hataları oluşabileceğini göstermektedir. Örneğin; 40° ve 45° kaynak ağızlarına sahip olan numunelerde, kök pasonun taşıdığı görülmektedir. Bunun nedeni, kaynak öncesi bırakılan kök aralığıdır. Standartlara bakıldığında AlMgZn numune için kök aralığı $b \leq 2$ mm olduğu görülmektedir. Buna rağmen yapılan işlemlerde, kök aralığının sadece 0 olduğu, yani aralık bırakılmadığı durumlarda iyi sonuç alınabileceği görülmüştür.

AlMgZn numuneler üzerinde yapılan çalışmada nüfuziyetler incelenememesine rağmen, sertlik ve ITAB genişliği üzerine yapılan çalışmaların sonuçları geçerlidir.

7. Yapılan çalışmada birim dikiş enerjisinin farklı malzemelerde ITAB üzerine olan etkisi incelenmiştir. Artan birim dikiş enerjisiyle, ITAB genişliğinin de doğru orantılı olarak arttığı tüm numunelerde görülen ortak sonuçtur. Ayrıca malzeme özelliklerinin ITAB genişliği üzerine belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aichele, G., (2001), “Kaynak ve Kesme Teknolojisinde Parametre ve Değer Tabloları”, Çev., S.Anık ve M. Varol, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Air Products PLC, (1999), “Welder’s Handbook: For Gas Shielded Arc Welding, Oxy Fuel Cutting & Plasma Cutting”, 3rd Edition.
- Anık, S., (1996), “Kaynak Teknolojisi”, 170:153-222, Makine Mühendisliği El Kitabı Cilt 2, M. Cerit, (Der.), TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını.
- Aslan, S., Erolu, M., (2001), “Düşük Karbonlu Bir Çelikte Molibden’in ITAB’ın Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Kaynak Teknolojileri III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Cary, H.,B., (1989), “Modern Welding Technology”, Englewood Cliffs, N.J.,Prentice Hall.
- Cin, M., (1978), “Elektrik Ark Kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgenin Etüdü”, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Çavuşoğlu, İ., (1997), “Çeliklerin Kaynağında Isıl İşlemlerin Isı Etkisi Altında Kalan Bölgedeki Oluşumlara Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.
- Durmuşoğlu, Şenol., (2006), “Gazaltı Kaynağında Kaynak Kalitesine Tesir Eden Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
- Ertürk, İ., (1994), “MIG/MAG Kaynak Yönteminde Kaynak Parametrelerinin Sıçrama Kayıplarına Etkilerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Funderburk, S. R., (1999), “Key Concepts in Welding Engineering”, Welding Innovation Vol.XVI, No. 1.
- Gourd, L.M., (1996), “Kaynak Teknolojisinin Esasları”, Çev., B. Eryürek, O. Bodur ve A. Dikicioğlu, Birsen Yayınevi, 21-122, İstanbul.
- Gültekin, N., (1991), “Kaynak Tekniği”, Engin Ofset, İstanbul.
- Gültekin, N., (2006), “Kaynak Metalurjisi ve Problemleri”, Yüksek Lisans Ders Notları, YTÜ, İstanbul.
- Handbook Committee, (1989), “Metals Handbook Volume 6 Welding, Brazing and Soldering”, ASM International.
- Handbook Committee, (1976), “Welding Handbook Volume 1”, AWS ,Miami.
- Hu, J., Tsai, H. L., (2006), “Heat And Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part I : The Arc”, International Journal of Heat and Mass Transfer.
- İnce, H., (1982), “Elektrik Ark Kaynağında Isı Tesiri Altındaki Bölgede Tane İrileşmesinin Etüdü, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Kakaç, S., (1998), “Örneklerle Isı Transferi”, Tıp&Teknik Yayıncılık, Ankara
- Kaluç, E., (2004), “Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını, 356.
- Kılık, R., (1983), “Kaynak Bölgesindeki Sıcaklık Dağılım ve Değişimine Isıl Özelliklerin,

Gizli Ergime Isısının ve Elektrot Çapının Etkisi”, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.

Kongel, A., (2005), “Ergitme Esaslı Kaynak Uygulamalarında Kimyasal Bileşimi Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.

Kou, S., (1987), “Welding Metallurgy”, Wiley Interscience Publication.

Liu, S., (1992), “Metallography of HSLA Steel Weldments”, Key Engineering Materials, Vol.69 and 70, 1-20.

Losz, J., Challenger, K., (1990), “HAZ Microstructure in HSLA Steel Weldments”, AWS Conference, pp.207 – 225.

Million, K., Datta, R., Zimmermann, H., (2005), “Effects of heat input on the microstructure and toughness of the 8 MnMoNi 5 5 shape – welded nuclear steel” Journal of Nuclear Materials 340 S:25 – 32.

Muthupandi, V., Srinivasan, P. B., Seshadri, S.K., Sundaresan, S., (2003), “Effect of Weld Metal Chemistry and Heat Input on the Structure and Properties of Duplex Stainless Steel”, Materials Science And Engineering pp. 9-16.

Oğuz, B., (1989), “Ark Kaynağı”, Oerlikon Yayınları, İstanbul.

Özsaraç, U., Karadeniz, E., Yıldız, C., (2005), “The Effect of Process Parameters On Penetration in Gas Metal Arc Welding”, Materials and Design, 28:649-656.

Shome, M., (2006), “Effect of Heat – Input on Austenite Grain Size in The Heat Affected Zone of HSLA – 100 Steel”, Materials Science and Engineering A.

Tülbentçi, K., (1998), “MIG-MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi”, REM Matbaacılık, İstanbul.

Yalçın, A.E., (2005), “Koruyucu Gaz Kaynak Uygulamalarında Gaz Karışımları – Dikiş Formu İlişkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.

İNTERNET KAYNAKLARI

www.airproducts.com/maxx

<http://www.makinamuhendisi.com/images/alu-alasimli-sekill.jpg>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 06.02.1982

Doğum yeri Edirne

Lise 1996-1999 Edirne Süleyman Demirel Fen Lisesi

Lisans 2000-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurum

2005-Devam ediyor YTÜ Makine Fakültesi Araştırma Görevlisi