T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

ISI GİRDİSİNİN VE KAYNAK SONRASI GERİLİM GİDERME ISIL İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Remzi Cenk ERSİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ISI GİRDİSİNİN VE KAYNAK SONRASI GERİLİM GİDERME ISIL İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Remzi Cenk ERSİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. MEHMET TARAKÇI

2009

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ	**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ JÜRİ ONAY FORMU**

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Tarakçı

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Hüsel GENÇER

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Osman Öztürk

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13/02/2009 tarih ve 2009/06 sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 30/04/2009 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Remzi Cenk ERSİN 'in çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu ...../...../..... tarih ve ..../..../..... sayılı kararıyla Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: ISI GİRDİSİNİN VE KAYNAK SONRASI GERİLİM GİDERME ISIL İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

YAZAR ADI: Remzi Cenk ERSİN

Kaynak işlemi günümüz teknolojisinde ve üretim yöntemlerinde önemli bir yere sahiptir. Ark kaynak yöntemleri (SAW, GTAW, SMAW, FCAW) çelik konstrüksiyon, basınçlı kaplar, rüzgar kuleleri, kazan, küresel tank, korozyon direncine karşı korunması gereken yerlerde ve boru hatlarının imalatında geniş bir çapta kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, basınçlı kaplarda kullanılan SA516Gr70N çeliğinin dört farklı kaynak prosesine ve farklı ısı girdilerine (kaynak ilerleme hızı, volt ve amper) göre ısıl işlemsiz ve kaynak sonrası ısıl işlemli malzemelerin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde genel bir giriş yapılmış olup, ikinci bölümde çelikte tanımlar ve uygulanan ısıl işlemlerden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde kaynak, kaynak prosesleri ve çelik ile ilgili tanımlar yapılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar, beşinci bölümde deneysel sonuçlar ve yorumlanması, altıncı bölümde ise genel sonuçlar ve önerileri kapsamaktadır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler hadde yönüne doğru alınmıştır. Ana malzeme ebatları 22 mm x 150 mm x 1200 mm ebatlarında olup aynı kaynak ağzı formu ile dört farklı kaynak prosesinde çoklu paso ile kaynak edilmişlerdir. Kaynak işleminde SMAW ve GTAW proseslerinde 10, 13, 16 ve 20 kj/cm, SAW ve FCAW proseslerinde ise 13, 16, 20 ve 25 kj/cm olmak üzere dört farklı enerji girişi kullanılmıştır. Kaynak işleminden sonra tüm numunelere radyografik testleri yapılmıştır. Radyografik testlerden sonra kaynaklı plakalar ikiye bölünerek deney numunelerinden biri 620°C'de gerilim giderme ısıl işlemine tabi tutulmuştur.

Yapılan işlemlerden sonra kaynak bölgesinden makro, mikroyapı, sertlik, tokluk ve çekme deneyi numuneleri çıkartılmıştır. Makro ve mikroyapı incelemeleri optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri için Vickers ölçüm yöntemi ve yük olarak beş kilogram seçilmiştir. Kaynak metali, ITAB bölgesi ve değişime uğramamış bölgelerden tokluk numuneleri çıkartılıp, - 40°C'de kırılmıştır.

Radyografik testler sonucunda dört kaynak yönteminde 10, 13, 16, 20 ve 25 kj/cm ısı girdilerinde SAW ve SMAW proseslerinde kaynak hatası yapılmamıştır. Fakat, GTAW proseslerinde 10 kj/cm ısı girdisi ile FCAW prosesinde 25 kj/cm ısı girdisinde sıralı cüruf hatası yapılmıştır.

Makro yapı numuneleri incelemeleri sonucunda ısı girdisi arttıkça kaynak dikişi ve ITAB'ın genişliğinde artış görülmüştür. 13, 16 ve 20 kj/cm ısı girdilerinde kaynak dikişi ve ITAB'ın genişliği en fazla FCAW yöntemlerinde çıkmıştır. En düşük değerlerde GTAW proseslerinde elde edilmiştir. GTAW ve SAW yöntemlerinde artan ısı girdisinin etkisiyle birlikte yavaş katılaşmanın etkilerini kaynak dikiş fotoğraflarında soğuma izlerinin azalması ile görülmektedir. SMAW, FCAW yönteminde artan ısı girdisinin etkisi kaynak dikişinde sıçrantı ve yanma oluğu gibi hataları doğurmaktadır. Kaynaklı malzemelerin makro kesitlerde artan ısı girdisi ve kaynak ağzına yığılan dolgu metali miktarı ile kaynak banyosunun boyutu artmaktadır.

Kaynaklı malzemelerin çentik deneyleri sonucunda ısı girdisine bağlı olarak kaynak bölgesinin tokluk değerleri SAW, GTAW proseslerinde artış gösterirken FCAW ve SMAW proseslerinde azalma göstermiştir. Artan ısı girdisi ITAB bölgesi tokluk değerleri FCAW yönteminde etki etmediği görülürken SAW, SMAW ve GTAW proseslerinde ise azalma yönünde etkisi olmuştur.

10, 13, 16, 20 ve 25 kj/cm ısı girdilerinde dört farklı proses ile kaynağı yapılan deney numunelerinin kaynak bölgesi mikro yapıları ferrit ve perlit yapılarından oluşmaktadır. Isı girdisinin arttıkça yavaş soğuma nedeniyle widmanstaten ferrit yapılarda azalma görülmüştür. ITAB bölgesi, mikro yapısında ise malzemeye verilen

enerjinin etkisiyle hızlı katılaşma ile meydana gelen martenzit fazı ile birlikte ferrit, perlit görülmektedir. Martenzit fazı daha çok FCAW ve SMAW yöntemlerinde görülmüştür.

Sertlik deneyleri sonuçlarına göre dört yöntem ve ısı girdilerine göre kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerleri SMAW yönteminde elde edilmiştir. ITAB bölgesinde ise 13 ve 16 kj/cm ısı girdilerinde en yüksek sertlik değerleri FCAW yöntemlerinde görülmüştür. Kaynak dolgu metali kimyasal ve mekanik özellikleri ana malzemeye göre daha iyi olduğu için dikiş bölgesi sertlik değerleri ITAB'dan daha fazladır. Kaynak merkezinden itibaren sertlik değeri değişime uğramamış bölgeye kadar düşüş göstermektedir.

Yapılan kaynak işlemleri sonrası deney numunelerine uygulanan çekme deneyi sonuçlarına göre artan ısı girdisi ve kaynak yöntemine bağlı olarak mukavemet ve uzama değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir.

Anahtar Kelimeler : Isı girdisi, kaynak yöntemleri, mekanik özellikler, kaynak parametreleri, gerilim giderme ısıl işlemi

SUMMARY

TITLE OF THESIS: THE EFFECTS OF HEAT INPUT AND POST WELDING HEAT TREATMENT TO THE MECHANICAL PROPERTIES

NAME OF THE AUTHOR: R. Cenk ERSİN

Welding process plays a very significant role in our modern-day technology and production. Arc welding processes (SAW, GTAW, SMAW, FCAW) are used enormously in steel constructions, pressure vessels, wind towers, boilers, spherical vessels, places that must be protected against corrosion, and production in pipes.

In this study, the effects of using SA516Gr70N steel with four different welding processes and heat inputs (welding speed, and voltage, amps) on pressure vessels materials' mechanical properties, pre-heat treatment and post-weld heat treatment were exanimate. At the first part of experiment, general introductions were ranked, at the second part, introduction of the steel and heat treatments, which will be carried out were mentioned. The definitions of the steel, the welding processes were mentioned in the third part. The fourth part includes experiment studies. The fifth part includes experiment result and discussion, the sixth consists of general conclusions and recommendations.

In the experiment, the used material were taken based on the rolling direction of base metal which have 22mm x 150mm x 1200mm dimension and the material was welded by for different welding process and with the same welding groove and multiple passes. 10, 13, 16 and 20 kj/cm heat input values were used in SMAW and GTAW; at SAW and FCAW 13, 16, 20, 25 kj/cm were used. After welding process radiographic test was conducted to all of specimen. Later, welded plates were divided into two; one of the specimens was exposed to heat treatment for stress relief at 620˚C.

After the processes, specimens were prepared from weld zone for microstructure, toughness, hardness, and tensile tests. Macro and microstructure examinations were carried out by optical microscope for hardness tests. Vickers method was chosen and 0.5 kg load was applied to the weld metal. HAZ and zones which were not exposed to change were extracted a specimens and charpy impact tested at -40˚C.

According to the radiographic test; at SAW and SMAW processes with 10,13,16,20 and 25 kj/cm heat input values no weld defects were found, though at GTAW process with 10kj/cm and FCAW process with 25 kj/cm heat input, consecutive slag inclusion defect were found

Then the examination of macrostructure specimen, it is found out that when heat input increases, the welding seam and the width of HAZ increase. The highest HAZ values were obtained at FCAW process. The lowest values were obtained at GTAW process.

From the Charpy Impact Test's results of welded metals, we saw that the toughness of the weld zone increases when using SAW and GTAW process; and decreases when using FCAW and SMAW processes. The toughness value of the HAZ does not change at FCAW; but it decreases at SAW, SMAW and GTAW processes.

Ferrite and pearlite microstructures were formed in welded areas when using all 4 welding processes, at 10, 13, 16, 20, and 25 kj/cm heat inputs. As the heat input increased, due to slow cooling time, a decrease in the amount of widmanstatten structures was seen. At the microstructure level, due to the effects of the heat inputs martensite phase were seen with ferrite and pearlite structures. More martensite phases were seen when using FCAW and SMAW processes then the other processes.

According to the toughness test results, of the four different welding processes, the highest toughness values were obtained using SMAW at all the heat inputs. At the HAZ, the highest toughness values at 13 and 16 kj/cm were seen when FCAW was used. Since the welding filling material's chemical and mechanical properties

are better than the main material, welded area's toughness values are higher then the HAZ's toughness values. From the welding center onward, the toughness values did not change, and decreased until the HAZ.

According to applied Tensile Tests on the specimens after the welding process, the increasing heat input and applied welding method does not significantly change the amount of change in the tensile strength and elongation values of the material.

Keywords : Heat input, welding methods, mechanical properties, welding parameters, post welding heat treatment.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen ve bana yol gösteren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mehmet TARAKÇI ve Yrd. Doç. Dr. Yücel GENÇER'e yüksek lisans eğitimim boyunca destekleri ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın Prof. Dr. Orhan ŞAHİN'e, kaynak yöntemleri üzerinde çalışmamda yardımcı olan ÇİMTAŞ Kaynak Müdürü Ercan KAPLAN ve İmalat Müdürü Nedim ÖZKAN'a, Kaynak Teknolojileri Merkezi çalışanlarına ve ÇİMTAŞ ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Bana hayatım boyunca maddi ve manevi destek olan aileme, eşime ve tez hazırlama sırasında yardımcı olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Özet	I
Summary	IV
Teşekkür	VII
İçindekiler	VIII
Simgeler ve Kısaltmalar	XI
Şekiller	XII
Tablolar	XV
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİKTE TANIMLAR VE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	3
2.1. Çelik Tanımlama	3
2.2. Fe-C Denge Diyagramı ve Yapı Dönüşümleri	4
2.3. Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi	8
2.4. Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler	12
2.4.1. Genel Terimler	12
2.4.2. Isıl İşlem Yöntemleri ve Açıklamaları	15
2.4.3. Gerilim Giderme Isıl İşlemi	18
3. KAYNAK PROSESİ	20
3.1. Kaynağın Tarihçesi ve Ülkemizdeki Gelişimi	20
3.2. Kaynak Terimleri ve Açıklamaları	23
3.3. Kaynak Yöntemleri ve Sınıflandırma	24
3.4. Kaynak Prosesleri Uygulama Alanları	25
3.5. Kaynak Proseslerinin Seçilmesi	26
3.6. Kaynak Pozisyonları	27
3.7. Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Kaynak Metali Bölgelerinin İncelenmesi	28
3.7.1. Ergime bölgesi	29
3.7.2. Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB)	30
3.7.2.1. İri taneli bölge	31
3.7.2.2. İnce taneli bölge	32
3.7.2.3. Kısmen dönüşmeye uğramış bölge	32
3.7.2.4. İçyapı değişikliğine uğramamış bölge (esas metal)	33
3.7.3. Karbon Eşdeğerinin İncelenmesi	33
3.7.4. Ön ısıtma sıcaklığı	34
3.8. Isı Girdisinin Tanımlanması	34
3.9. Kaynak Hataları	36
3.10. Elektrod Ark Kaynağı	40
3.10.1. Örtülü Elektrodlar	42
3.10.2. Örtü maddesi	43
3.10.3. Örtü çeşitleri	44
3.10.4. Kaynak makinaları	45
3.11. Gazaltı Kaynağı	45
3.11.1. Yöntemin Tanımı ve Çalışma Prensibi	47
3.11.2. Gazaltı Kaynağının Avantajları	50
3.11.3. Gazaltı Kaynağının Dezavantajları	50
3.11.4. Gazaltı Kaynağı Sırasında Tüketilen Malzemeler	51
3.11.4.1. Elektrodlar	51

3.11.4.2. Koruyucu Gazlar 52
3.11.4.2.1. Koruyucu soy gazlar 53
3.12. Argon Kaynağı 53
3.12.1. Argon Kaynağının Tanımı ve Çalışma Prensibi 53
3.12.2. Doğru Akımla Kaynakta Arkın Tutuşması 54
3.12.3. Argon Kaynağının Avantajları 55
3.12.4. Argon Kaynağının Dezavantajları 55
3.12.5. Argon Kaynağı Akım Üreteçleri 55
3.12.6. Argon Kaynak Torcu 56
3.12.7. Argon Kaynağı Elektrod Malzemeleri 57
3.12.8. Koruyucu Gazlar 58
3.12.9. Kaynak Dolgu Malzemeleri 59
3.13. Tozaltı Kaynak Yöntemi 61
3.13.1. Tozaltı Ark Kaynak Yönteminin Avantajları 61
3.13.1.1. Yüksek ergime gücü ve kaynak hızı 61
3.13.1.2. Derin nufuziyet 61
3.13.1.3. Elektrod ekonomisi 61
3.13.1.4. Emniyetli ve düzgün görünüşlü kaynak dikişi 62
3.13.1.5. Kaynak dikişinin kalitesine kaynakçının bir faktör olarak etkilemesi 62
3.13.1.6. Yüksek ark kararlılığı 62
3.13.2. Tozaltı Ark Kaynak Yönteminin Dezavantajları 62
3.13.3. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri 63
3.13.4. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları 64
3.13.5. Tozaltı Ark Kaynağı Uygulamaları 66
4. Deneysel Çalışma 67
4.1. Genel 67
4.2. Deney Malzemesi ve Boyutları 67
4.3. Ana Malzemenin Karakterizasyonu 69
4.4. Kaynak Sarf Malzemeleri 69
4.5. Kaynak Makinaları 71
4.6. Kaynak Parametreleri 71
4.7. Kaynak İşlemi 72
4.7.1. Elektrod Kaynağı (SMAW) 72
4.7.2. Tozaltı Kaynağı (SAW) 73
4.7.3. Gaz altı Kaynağı (FCAW, GTAW) 73
4.8. Kaynaklı Numunelerin Isıl İşlemi 74
4.9. Çekme Deneyi ve Numunelerin Hazırlanması 75
4.10. Sertlik Deneyi 76
4.11. Darbe Deneyi 77
4.12. Radyografik Test 78
4.13. Deney Numunelerinin İsimlendirilmesi ve Hazırlanması 79
5. Deney Sonuçları ve Yorumlanması 81
5.1. Ana Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu 81
5.2. Radyografik Test 82
5.3. Makro Yapı Resimleri 85
5.4. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları 95
5.5. Mikro Yapı Resimleri 104

5.6. Sertlik Deneyi Sonuçları 122
5.7. Çekme Deney Sonuçları 137
6. Genel Sonuçlar 144
Kaynaklar 147

SİMGELER VE KISALTMALAR

FCAW : Flux-cored Arc Welding
GTAW : Gas Tungsten Arc Welding
SAW : Submerged Arc Welding
SMAW : Shielded Metal Arc Welding
ASME : American Society of Mechanical Engineers
AISI : American Iron and Steel Institute
AWS : American Welding Society
MIG : Metal Inert Gas
TIG : Tungsten Inert Gas
MAG : Metal Active Gas
ITAB : Isının Tesiri Altında Kalan Bölge
H : Isı Girdisi (kj/inç veya mm/dakika)
E : Ark Voltajı (volt)
I : Akım (amper)
S : Hız (inç/dakika veya mm/dakika)
F : Ferrit
P : Perlit
M : Martenzit

ŞEKİLLER

Şekil	Sayfa
2.1. Demir- Karbon denge diyagramı ve ısıl işlem bölgeleri	5
2.2. Alaşım elementlerinin ferritin sertliğine etkileri	12
2.3. Isıl işlemde, genel olarak işlem prosesi	13
2.4. Isıl işlemde ön ısıtma uygulaması	14
2.5. Isıl işlemde genel soğutma yöntemleri	15
3.1. Benardos kaynak yöntemi	20
3.2. Zerener kaynak yöntemi	20
3.3. Slavianoff kaynak yöntemi	21
3.4. Kaynak İşleminin Prensibi	23
3.5. Kaynak proseslerinin seçilmesine ait şema	27
3.6. Plaka kaynak pozisyonları	27
3.7. Boruların kaynak pozisyonları	27
3.8. Kaynak Bölgesi	28
3.9. Kaynak dikişi çevresinde sıcaklık dağılımı ve tanesel yapıdaki değişiklikler	32
3.10. Kaynak hataları	36
3.11. Kaynak hatalarından gaz delikleri	37
3.12. Kaynak hataları (1) Cüruf sıkışması, (2)Yetersiz nufüziyet, (3) Kaynak çatlağı	38
3.13. GTAW kaynağı X-Ray filmi Tugsten kalıntısı	38
3.14. Kaynak hatalarına örnekler	39
3.15. Kurt deliği	39
3.16. Kaynakta zayıf birleşme	40
3.17. Örtülü elektrod ile ark kaynağında kaynak bölgesi	41
3.18. Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynak donanımı blok şeması	42
3.19. FCAW Kaynak Yönteminde Ark Bölgesi	48
3.20. Gazaltı Kaynak Donanımı	49
3.21. Bir GTAW kaynak sisteminin yapısı	54
3.22. GTAW kaynağında arktaki elektronlar ve iyonlar	54
3.23. Su soğutmalı GTAW-kaynak torcu	56
3.24. Tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilen V kaynak ağızlı parçanın kesit görünüşü	60
4.1. SA516Gr70N çeliğinin kaynak ve test işlemleri akış şeması	68
4.2. Kaynak ağzı detayı ve hazırlanmasının şematik olarak gösterilişi	69
4.3. Kaynaklı deney numunelerine yapılan ısıl işlemin temsili grafiği	74
4.4. Plakalar için enine çekme deney numuneleri	75
4.5. Kaynaklı deney malzemelerinin sertlik deneyleri ölçüm prensibi	76
4.6. Çentik deney numunesinin toleransları	77
4.7. Çentik deney numunelerinin boyutları	78
4.8. Kaynaklı malzemelerin RT işleminin şematik olarak gösterilmesi	78
4.9. Deney numunelerinin çıkartılmasının şematik olarak gösterilişi	79
5.1. Ana malzeme optik mikroskop görüntüsü	81
5.2. WA1 numunesi X-ray radyografik test sonucu kaynak hatası sıralı curufların gözükmesi	83
5.3. WT3 numunesi X-ray filmi sonucu hatasız kaynaklı malzeme	83
5.4. WT1 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı	87
5.5. WT2 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı	87
5.6. WT3 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı	87
5.7. WT4 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı	88

5.8. WG1 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı 89
5.9. WG2 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı 89
5.10. WG3 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı 89
5.11. WG4 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı 90
5.12. WE1 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 91
5.13. WE2 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 91
5.14. WE3 numunesi üstten dikiş yapısı ve makroyapı fotoğrafı 91
5.15. WE4 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 92
5.16. WA1 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 92
5.17. WA2 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 93
5.18. WA3 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 93
5.19. WA4 numunesi üstten dikiş yapısı ve makro yapı fotoğrafı 93
5.20. SAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 95
5.21. SAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 96
5.22. FCAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 97
5.23. FCAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 97
5.24. GTAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 98
5.25. GTAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 99
5.26. SMAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 100
5.27. SMAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları 100
5.28. Isıl işlemli numunelerde ITAB bölgesi ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi 101
5.29. Isıl işlemsiz numunelerde ITAB bölgesinin ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi 101
5.30. Isıl işlemli numunelerde kaynak bölgesi ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi 102
5.31. Isıl işlemsiz numunelerde kaynak bölgesi ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi 103
5.32. Isıl işlemsiz numunelerde ana malzemenin ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi 103
5.33. WA1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 104
5.34. WA1 numunesi ITAB mikro yapısı 105
5.35. WA2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 105
5.36. WA2 numunesi ITAB mikroyapısı 106
5.37. WA3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 106
5.38. WA3 numunesi ITAB mikroyapısı 107
5.39. WA4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 107
5.40. WA4 numunesi ITAB mikroyapısı 108
5.41. WG1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 109
5.42. WG1 numunesi ITAB mikroyapısı 109
5.43. WG2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 110
5.44. WG2 numunesi ITAB mikroyapısı 110
5.45. WG3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 111
5.46. WG3 numunesi ITAB mikro yapısı 111
5.47. WG4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 112
5.48. WG4 numunesi ITAB mikroyapısı 112
5.49. WE1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 113
5.50. WE1 numunesi ITAB mikroyapısı 114
5.51. WE2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 114
5.52. WE2 numunesi ITAB mikroyapısı 115
5.53. WE3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 115
5.54. WE3 numunesi ITAB mikroyapısı 116
5.55. WE4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 116
5.56. WE4 numunesi ITAB mikroyapısı 117

5.57. WT1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 118
5.58. WT1 numunesi ITAB mikroyapısı 118
5.59. WT2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 119
5.60. WT2 numunesi ITAB mikroyapısı 119
5.61. WT3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 120
5.62. WT3 numunesi ITAB mikroyapısı 120
5.63. WT4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı 121
5.64. WT3 numunesi ITAB mikroyapısı 121
5.65. WA2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 122
5.66. WA3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 123
5.67. WA4 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 123
5.68. WE1 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 124
5.69. WE2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 125
5.70. WE3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 125
5.71. WE4 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 126
5.72. WG1 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 127
5.73. WG2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 127
5.74. WG3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 128
5.75. WT1 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 129
5.76. WT2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 129
5.77. WT3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 130
5.78. WT4 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi 130
5.79. GTAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi 131
5.80. SMAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi 132
5.81. FCAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi 133
5.82. SAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi 134
5.83. 13 kj/cm kaynak ısı girdisine proseslerin sertlik değişimi 135
5.84. 16 kj/cm kaynak ısı girdisine proseslerin sertlik değişimi 135
5.85. 20 kj/cm kaynak ısı girdisine proseslerin sertlik değişimi 136
5.86. SMAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi 138
5.87. SAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi 138
5.88. GTAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi 139
5.89. FCAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi 139
5.90. SAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi 140
5.91. SMAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi 141
5.92. GTAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi 141
5.93. FCAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi 142
5.94. Kaynak yöntemleri ısıl işlemsiz numunelerin ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi 143

TABLOLAR

Tablo **Sayfa**

2.1. Fe-C Denge diyagramında bazı açıklamalar ve yapılar 7
2.2. Çeliklere katılan alaşım elementlerinin alaşım elementi sayılacak en az miktarları 8
2.3. Isıl işlem ana yöntemlerinin sınıflandırılması 16
3.1. Metal kaynak proseslerinin sınıflandırılması 24
3.2. Karbon eşdeğerine göre ön tav sıcaklığının belirlenmesi 34
3.3. Tungsten elektrodlar; DIN 32528'e göre bileşimleri, kodları, tanıma renkleri ve uygulama bilgileri 57
3.4. Çeşitli uygulama alanları için koruyucu gazlar 58
3.5. GTAW kaynağında koruyucu gazların etkisi 59
3.6. DIN 8557'ye göre tozaltı kaynağında kullanılan tellerin kimyasal bileşimleri 64
4.1. Kaynak elektrod çapları ve kimyasal özellikleri 70
4.2. Kaynak elektrodlarının standartları ve mekanik özellikleri 70
4.3.Toz altı kaynağında kullanılan kaynak tozunun özellikleri 70
4.4. Bu çalışmada kullanılan kaynak makinelerin genel özellikleri 71
4.5. Kaynak parametreleri ve uygulanan ısı girdisi değerleri 72
4.6. Enine çekme deneylerinde kullanılan gösterimler ve sembolleri 75
4.7. Deney numunelerinin isimlendirilmesi 80
5.1. Ana malzemenin kimyasal kompozisyon değerleri 81
5.2. Ana malzemenin çekme, darbe ve sertlik deneyi sonuçlar 82
5.3. Kaynak işlemi sonucunda deney numunelerin radyografik test sonucu 84
5.4. Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş genişliğinin değişimi (mm) 85
5.5. Isı girdisine bağlı olarak ITAB'ın genişliği (mm) 86
5.6. Kaynaklı numuneleri dikiş ve makroyapı görüntülerinin açıklanması 94

BÖLÜM 1.GİRİŞ

Kaynak, metalik parçaların birleştirilmesinde kullanılan başlıca yöntemlerden birisidir. Kaynak yaklaşık 3500 yıldan beri kullanılmaktadır. Kaynak yönteminin endüstriyel uygulamaları 19. yüzyılın ikinci yarısında başlamıştır. El ile elektrik ark kaynağının tarihçesine baktığımızda başlangıçta üç ayrı yöntem ile karşılaşılır. Bunlar Bernardos kaynak yöntemi, Zerener'in geliştirdiği kaynak yöntemi ve günümüzde kullanılan elektrik ark kaynağının özünü oluşturan Slavianoff tarafından geliştirilen ark kaynak yöntemidir. Bu sayılan yöntemler ile yapılan kaynak dikişleri havadaki oksijen ve azotun olumsuz etkilerinden korunamadığı için düşük mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Kaynak banyosunu havanın olumsuz etkilerinden korumak; isveçli Osear Kjelberg'in 1904 yılında ilk örtülü elektrodu geliştirmesi sonucunda mümkün olabilmiştir [1]. Koruyucu bir gaz kullanma fikri ise ilk defa Alexander usulünde 1926 yılında hayata geçirilmiştir. Bu yöntemde kaynak dikişi metanol ile korunmuştur [2,3].

1928 yılında uygulamaya başlanan Arcogen usulünde ise hem bir elektrot hem de oksi-asetilen alevi birlikte kullanılmıştır. Burada dikişi koruma görevini üfleç alevi yapmıştır. Günümüzde bu yöntemler kullanılmamaktadır. Koruyucu gaz olarak bir soy gazın kullanılması 1940 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki "Nortrop Aircraft Company Inc." Firmasının uçak üretimleriyle başlamasına rağmen bu yöntemin patenti 1930'da Hobart ve Devers tarafından alınmıştır. Burada koruma gazı olarak helyum kullanılmıştır. Kaynak bölgesinde soy gazlardan başka aktif bir gazın kullanılması konusundaki çalışmalara 1952 yılında başlanmış ve aynı yıl uygulamaya geçilmiştir. Bu tarihte özellikle otomobil endüstrisinde, tam otomatik olarak çalışan, yüksek erime güçlü, çok hızlı, sadece yatay pozisyonda çalışabilen, $C0_2$ koruyucu gazlı kaynak makinaları kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemde görülen sadece yatay pozisyonda çalışabilme olanağı ve fazla miktarda sıçrama, araştırmacıları bu yönde çalışmalara sevk etmiştir. CO_2 gibi bir koruyucu gazla yapılan bu kaynak yöntemine Metal Active Gas kelimelerinin baş harflerinden yararlanılarak MAG adı verilmiştir [2,3].

Kısa devre halinde, akımı sınırlayan reaktanslı akım üreteçleri geliştirilerek, kısa ark boyu ile çalışılarak sıçrama en aza indirilmiştir. Diğer bir önemli gelişme de ince çaplı elektrot kullanabilme olanağı sağlamıştır. Bu şekilde her ne kadar elektrodun akım yoğunluğu arttırılmış ise de, arkın oluşturduğu ısı azalmıştır. Akım yoğunluğunun artması, arkı yoğun ve istenilen yöne kontrollü olarak doğrultulabilir hale getirmiş ve dolayısı ile her pozisyonda kaynak yapabilen bu yöntemde önceleri sadece CO_2 kullanılmıştır. Günümüzde gereken hallerde, arkı yumuşatmak, sıçramayı azaltmak için CO_2'ye argon karıştırılıp kullanılmaktadır; karışım oran %75 argona kadar çıkmaktadır. Bu yöntemde bir üçüncü gelişme de çeşitli bileşimde koruyucu gazlar ile sprey ark yönteminin bulunmasıdır. Argon içine çok az miktarda oksijen katılarak çeliklerin kaynağında bu yöntemin uygulanması sonucu, kalın çaplı elektrotlarla her pozisyonda çalışılabilmekte ve çok düzgün dikişler elde edilebilmektedir [2,3].

Son yıllarda geliştirilen, darbeli akım yönteminde, kaynak akımı, ayarlanan frekansta bir alt ve bir üst değer arasında değiştirilerek iş parçasına aktarılan ısı girdisi minimumda tutularak, özellikle ince parçalarda çarpılma azalmıştır. Sanayileşmiş ülkelerde günümüzün en popüler yarı otomatik kaynak yöntemi olan MAG kaynak yöntemi son yıllarda ülkemizde hızla yayılmaktadır. Gerek makinası ve gerekse gazaltı kaynak teli üretimindeki artış bunun en önemli göstergesidir [2,3].

BÖLÜM 2. ÇELİK ve UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

2.1. Çelik Tanımlama

Demir-karbon denge diyagramı Şekil 2.1'e göre; ağ. %2,1'e kadar karbon içeren demir-karbon alaşımlarına çelik denir [4]. Çelikler genellikle sünek malzemelerdir. Sertleştirme, ıslah etme gibi ısıl işlemler yardımıyla ve sünekliğin azalması karşılığında dayanımları büyük oranda artırılabilir. %2'den fazla karbon içeren demir-karbon alaşımları (dökme demirler) ise çoğunlukla gevrektir. Bu malzemelerden istenilen biçimde parça üretilmesi sadece döküm ve talaşlı imalat yoluyla mümkündür. Dayanım yükseltici ısıl işlemler çeliklere göre daha sınırı olarak uygulanabilir [5].

Çelikler, kimyasal bileşimlerine göre, iki sınıfa ayrılırlar:

1. Yalın karbonlu çelikler;

a) Düşük karbonlu çelikler: (ağ. <%0,25 karbon)

b) Orta karbonlu çelikler: (ağ. %0,25-0,5 karbon)

c) Yüksek karbonlu çelikler: (ağ. >%0,5 karbon).

(Çeliklerde bulunan karbon miktarı için maksimum ağ. %2,1 sınırı verilmiş olmakla beraber çok az çelikte bu miktarda karbon vardır; hatta bazı çeliklerde-AISI D3 gibi - %2,25 karbon bulunur) [4].

2. Alaşımlı çelikler;

a) Az alaşımlı çelikler: Bu gruptaki çeliklerde bulunan alaşım elementlerinin toplam miktarı %5'i geçmez. Islah çelikleri, makina yapım çelikleri, bazı takım çelikleri bu çelik grubuna dahildirler. Karbon çeliklerine göre daha kaliteli ve daha pahalı çeliklerdir.

b) Alaşımlı çelikler: Bunlarda, toplam alaşım elementi miktarı %5'den fazladır. Bu tür çelikler çoğunlukla özel tekniklerle üretilir ve özel uygulamalar için uygundur. Takım çeliklerinin büyük çoğunluğu, paslanmaz çelikler, maraging çelikleri bu gruptadırlar. Alaşım katkısının üst sınırı %50'ye yakındır [4].

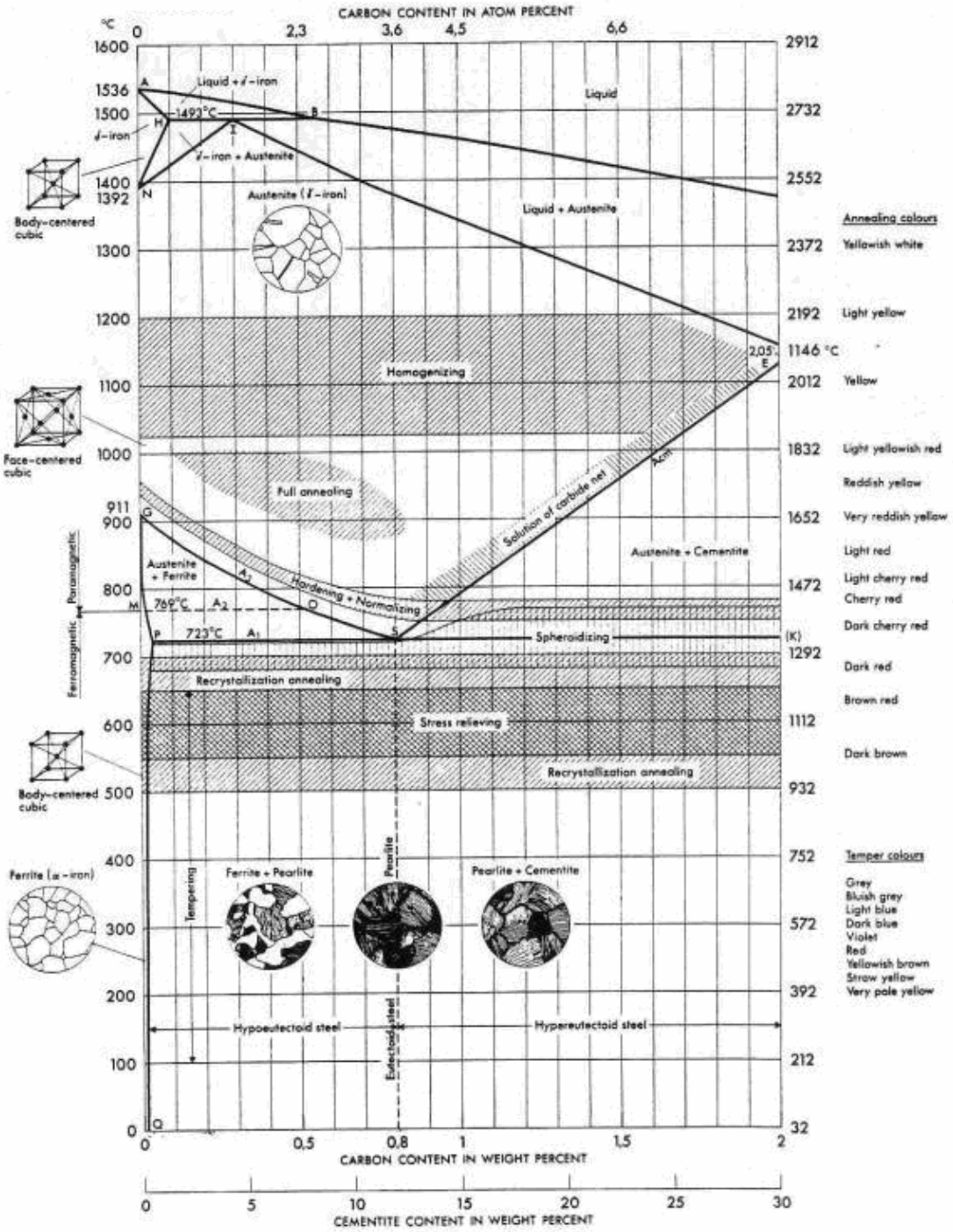
Ayrıca, çelikler kullanım alanlarına göre (inşaat çeliği, makina yapım çeliği, otomat çeliği, yay çeliği gibi), içerdikleri ana alaşım elementlerine göre (kromlu çelik, karbon çeliği, silisli çelik, krom-nikelli çelik, tungstenli yüksek hız takım çeliği gibi), ana yapıyı oluşturan fazın adına göre (ostenitik paslannmaz çelik, ostenitik mangan çeliği, ferritik paslanmaz çelik, martanzitik paslanmaz çelik gibi) ana yapı bileşenlerinin sayısına göre (çift fazlı çelik, dupleks paslanmaz çelik gibi), ısıl işlem ortamına göre (havada sertleşen çelik, suda sertleşen çelik, yağda sertleşen çelik gibi), şeklinde sınıflandırılabilmektedir [4].

2.2. Fe-C Denge Diyagramı ve Yapı Dönüşümleri

Saf demirin ergime sıcaklığı 1538°C, yoğunluğu 7,8 gr/cm^3'dür. Saf demir, oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar üç farklı kristal yapıda bulunur: Oda sıcaklığından 912°C'ye kadar hacim merkezli kübik (HMK) (α-Fe), 912°C'den 1394°C'ye kadar yüzey merkezli kübik (YMK) (γ-Fe) ve 1394°C'den ergime sıcaklığına (1538°C) kadar hacim merkezli kübik (HMK) (δ-Fe) yapıdadır. Bir malzemenin kimyasal yapısı değişmeden kristal yapısı değişiyorsa, bu tür malzemelere allotropik veya polimorfik özellik gösteriyor denir. Demirin allotropik özellik göstermesi, onun ve alaşımlarının çok geniş bir istek yelpazesine (sertlik, süneklik, tokluk, aşınma direnci gibi) olumlu cevap vermesine ve bundan dolayı sayılamayacak kadar çok alanda kullanılmasına imkan tanıyan olağanüstü bir avantajdır. Demir 768°C'de (Curie sıcaklığı) ferromanyetik karakterden paramanyetik karaktere geçmektedir; yani, demir 768°C'nin altında mıknatıslanma özelliği gösterirken, bu sıcaklığın üzerinde mıknatıslanma göstermez [4].

Şekil 2.1'de demir ile karbonun meydana getirdiği ikili denge diyagramı görülmektedir. Diyagramın sol tarafında demir, sağ tarafında ise Fe_3C (demir karbür-sementit) bulunmaktadır. Diyagramın alt ekseni demire katılan karbonun ağırlık olarak yüzdesini, dikey ekseni ise sıcaklığı göstermektedir. %100 Fe_3C bileşiğinin oluşması için demir içerisine ağırlıkça %6,67 C konulması gerektiği açıkça görülmektedir. Esasen, dikkat edilirse, sementit oluşumunun çok düşük karbon oranlarında başladığı ve yapının tamamının Fe_3C olması için %6,67 karbonun demire

katılması gerektiği anlaşılır. Diyagramda, daha yüksek karbon oranları göz önüne alınmamıştır. Bu tür demir-karbon alaşımları teknolojik olarak önem taşımaz [4].



Şekil 2.1. Demir- Karbon denge diyagramı ve ısıl işlem bölgeleri [6].

Saf demirde bulunan farklı kristal yapılı bölgeler denge diyagramında da vardır. HMK yapılı bölge 727^0C'de en fazla olmak üzere (%0,02) karbon çözündürmekte ve karbon çözünürlüğü sıcaklık düştükçe ve yükseldikçe azalmaktadır. Bu şekilde oluşan α-Fe bölgesi ferrit olarak adlandırılmaktadır. Saf demirdeki YMK yapılı γ-Fe daha geniş bir alan oluşturmuştur. Bu alanın en fazla karbon çözündürdüğü sıcaklık 1148°C ve en fazla çözündürdüğü karbon miktarı da ağırlıkça %2,1'dir. Bu bölge ostenit adını alır. δ-Fe de diyagramda bir bölge şeklindedir; içerisinde 1495°C'de maksimum ağ. %0,1 karbon çözünmüştür.

Ferrit ve ostenitin teknolojik olarak çok önemli olmasına karşılık, delta bölgesi çok yüksek sıcaklıklarda kararlı olması sebebiyle bir çok teknolojik işlemde ilgi duyulan bir alan değildir. Diyagramda üç önemli dönüşüm vardır: 1495°C'de %0,15 karbon bileşiminde "sıvı+delta"dan ostenit oluşmaktadır. Bu dönüşüm peritektik olarak adlandırılır ve teknolojik olarak çok önemli değildir. 1148°C'de %4,3 karbon bileşiminde ise sıvı faz "ostenit+sementit" fazlarından oluşan bir karışıma dönüşür. Bu reaksiyon ötektik adını alır ve denge diyagramında sıvının görüldüğü en düşük sıcaklığı gösterir. Ötektik reaksiyon dökme demir teknolojisi açısından çok önemlidir ve ötektik reaksiyon ile oluşan ürün ledebürit adını alır.

Diyagramdaki üçüncü reaksiyon ise çelik teknolojisi açısından çok önemli olan ötektoid reaksiyondur, ötektoid reaksiyon 727°C'de ve ağ %0,8 karbon bileşiminde ostenitin "ferrit+sementit"e dönüşümü şeklinde olur ve ötektoid dönüşüm ürünü perlit (ferrit+sementit) adıyla bilinir. [4]

Sementit (cementite) veya demir karbür (Fe_3C) ağırlıkça %6,67 karbon içerir. Çekme mukavemeti düşük, basma mukavemeti yüksek, sert ve gevrek metaller arası bir bileşiktir. Diyagramda görülen en sert yapı sementittir. Ortorombik kristal yapılıdır.

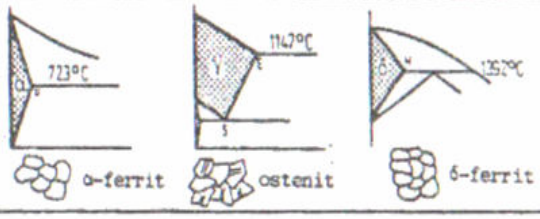
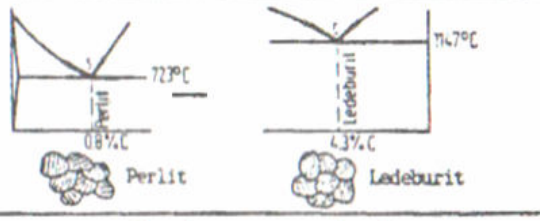
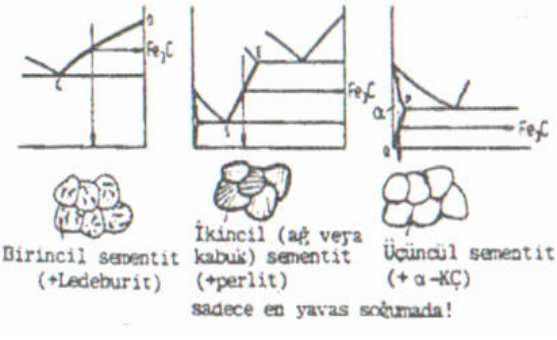
Ostenit (austenite) γ katı çözeltisine verilen addır. YMK γ-demirde çözünmüş karbonun arayer katı çözeltisidir. Maksimum karbon çözünürlüğü 1135^0C'de ağ. %2'dir. Normal olarak oda sıcaklığında kararlı değil; ancak bazı koşullar altında ostenit elde edebilmek mümkündür.

Ledeburit (ledeburite) ostenit ve sementitin oluşturduğu ötektik karışımının adıdır. 1135°C'de ağ. %4,3 C içerir.

Ferrit (ferrite) α katı çözeltisinin adıdır. HMK α-demirde çözünmüş karbonun bir katı çözeltisidir Maksimum çözünürlük 723°C'de ağ. %0,025'dir. Bu çözünürlük sıcaklık düşüşü ile azalır ve oda sıcaklığında sadece %0,008 kadar olur. Ostenitten daha yumuşak ve daha az mukavemetlidir.

Perlit (pearlite) %0,80 karbon içeren ötektoid karışım olup çok yavaş soğuma sonucunda 723°C'de oluşur. Ferit ve sementitin çok ince plaka veya lamellerinden oluşan bir karışımdır. Orta seviyede mukavemeti vardır [4]. Fe-C denge dyagramına ilişkin bazı açıklamalar ve iç yapılar şematik olarak tablo 2.1'de verilmiştir [5].

Tablo 2.1. Fe-C Denge diyagramında bazı açıklamalar ve yapılar [5].

Adı	Açıklama		DKD'da konumu ve içyapının şematik gösterimi
	En büyük C-miktarı	Metallografik adlandırma	
α-KÇ γ-KÇ δ-KÇ	%0,02, P noktası %2,06, E noktası %0,1 , H noktası	α-ferrit ostenit δ-ferrit	
	İçeriği	Metallografik adlandırma	
Ötektoid, S noktası. Ötektik, C noktası.	% 88 ferrit+ % 12 sementit+ % 51,4 ostenit+ % 48,6 sementit	Perlit Ledeburit	
	oluşumu		
Birincil sementit İkincil sementit Üçüncül sementit	Eriyikten birincil kristalleşme (CD-çizgisi) Ostenitten ayrışma (ES-çizgisi) Ferritten ayrışma (FQ-çizgisi)		

2.3. Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi

Çelik, esasen bir demir-karbon alaşımıdır. Ancak, en basit çeliklerde dahi demir ve karbon dışında başka elementler de bulunur. Sade karbonlu çeliklerde, her zaman yaklaşık olarak ağ.%1 mertebesine kadar manganez ile ağ.%0,6 mertebesine kadar silisyum vardır. Bu seviyelerdeki manganez ve silisyum alaşım elementi olarak nitelendirilmez. Yine, genellikle arzu edilmemekle beraber, ergitme pratiğinin sonucu olarak kükürt ve fosfor da çelik bileşimininde bulunur. Mn ve Si'dan başka, çeliklere çeşitli özellikleri kazandırmak maksadıyla; Cr, Ni, Mo, W, V, Co, Ti, N, B, Cu, Pb, Se ve Te gibi elementler de bileşimde bulunabilmektedir. Cu, Pb, Se, Te gibi elementler sadece bazı çeliklere çok özel maksatlarla çok az miktarlarda katılmaktadır.

Tablo 2.2. Çeliklere katılan alaşım elementlerinin alaşım elementi sayılacak en az miktarları [4].

element	ağ.%,min	element	ağ.%,min	element	ağ %,min
Cr	0,3	Nb	0,05	Mo	0,1
Ni	0,3	Al	0,1	Ti	0,1
W	0,1	Cu	0,4	Pb	0.40
V	0,1	Si	0,6	B	0,0008
Co	0,1	Mn	1		

Çelik bileşiminde bulunan elementlerin alaşım elementi sayılabilmeleri için gerekli minimum miktarları Tablo 2.2.'de verilmiştir. Alaşım elementleri, çeliklere ya yeni değişik özellikler kazandırmak veya var olan özellikleri geliştirmek gayesi ile katılırlar. Alaşım elementlerinin hem tek tek etkileri ve hem de başka elementler ile birlikte etkileri değerlendirilerek alaşım dizaynı yapılmalıdır. Alaşım elementlerinin çeliklere sağladıkları avantajlar şunlardır: Sertleşme kabiliyetini artırırlar, olağan sıcaklıklarda mukavemeti iyileştirirler, düşük ve yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri iyileştirirler, sertlik/mukavemet ve tokluk arasındaki optimizasyona yardımcı olurlar, aşınma, korozyon direncini artırrlar ve manyetik özellikleri düzeltirler [4].

Alaşım elementlerinin çeliğe yaptığı etkiler;

Karbon: çelikte bulunan ana alaşım elementidir. Arayer katı çözeltisi yapar. Fazlaca bulunduğu takdirde, demirle sementit (Fe_3C) ve karbür yapıcı alaşım elementlerinin de bileşimde bulunması halinde alaşım karbürü oluşturur. Katı çözelti halindeki karbon, çeliğin sertliğini en fazla artıran elementtir. Sade karbonlu çeliklerde, denge şartlarında, %0,6 C içeriğine kadar sertlik yükselir ve daha fazla karbon içeriklerinde sabit kalır. Sertliğe paralel olarak mukavemet de artar; fakat süneklik, dövülebilirlik ve kaynak kabiliyeti azalır (kaynak özelliklen %0,25 C üzerinde kötüleşir) [4].

Manganez: Her türlü çelikte bulunan bir elementtir. Çeliğe ergitme prosesleri sırasında oksijen tutucu olarak katılır. Karbon çeliklerinde, manganez miktarının üst sınırı %0,8-1,0 olarak gösterilmektedir. Fazla bulunması halinde, çelik, mangan alaşımlı çelik olarak kabul edilir. Manganez zayıf bir karbür yapıcıdır. (ortorombik, Mn_3C) Fakat, manganezin asıl etkisi katı çözelti sertleştiricisi olarak kullanıldığında görülür. Bu durumda, manganez çeliğin mukavemetinde sağladığı artış, çeliğin karbon içeriği ile doğru orantılıdır. Manganez, sertleşme kabiletini artırır; kaynak edilme özelliğini iyileştirir ve korozyon özelliklerini geliştirir. Manganez, çeliğin sıcak şekillendirme prosesleri sırasında meydana gelen sıcak yırtılma eğilimini azaltır veya önler. Sıcak yırtılma, işlem sıcaklıklarında demir sülfürün sıvılaşması sonucu meydana gelir. Manganez, demirden daha etkili bir kükürt bağlayıcı olduğu için, kükürtle birleşir ve sıcak yırtılmayı önler.

Silisyum: Manganez gibi, üretim kademelerinden itibaren çelikte bulunan bir elementtir; cevherden ve/veya ferro-silis veya ferro-siliko-manganez olarak katılan oksit gidericilerden bünyeye girer. Silisyum, alaşım elementi olarak, silisyumlu saclarda ve yay çeliklerinde kullanılır.Silisyum, çeliklerin mukavemetini ve özgül ağırlıklarını artırır; çeliklerde domain yapısını değiştirerek elektrik akısını kuvvetlendirir, yani elektrik ve manyetik kayıpları azaltır. Bu nedenle, silisyumlu çelikler silisli sac olarak elektrik trafolarında çekirdek olarak kullanılır. Ayrıca silisyum katı çözelti sertleştirmesi yaparak mukavemeti çok artırır.

Krom: Çeliklerde en yaygın olarak kullanılan alaşım elementi kromdur. Ağırlıkça %30'a kadar Cr kullanılabilmektedir (AISI 446 paslanmaz çeliklerde %27 Cr). Krom, çelikte, ferrite çözünerek katı çözelti sertleşmesi yaptığı gibi, aynı zamanda kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Krom, çeliklerin mukavemetini artırır; fakat tokluğu da az da olsa bir düşüşe neden olur. Çeliklerin korozyon direncini, sıcak

oksidasyon direncini artırır; ilave olarak tufalleşmeyi azaltır. Bu nedenle, yüksek kromlu çelikler (paslanmaz çelikler ve ısıl direnç alaşımları) korozyon ve oksidasyona karşı dayanım gereken yerlerde kullanılırlar [4].

Nikel: Çeliklerde, kromla birlikte, en çok kullanılan alaşım elementidir. Nikel, çelik, yapımı sırasında ilave edilir. Kromla birlikte bulunduklarında, sertleşme derinliğini artırır ve tufalleşme direncini olumlu yönde etkiler. Düşük sıcaklıklarda, çeliğin çentik darbe direncini artırır.

Vanadyum: Kuvvetli karbür yapıcı bir elementtir. Genellikle, düşük oranlarda kullanılır. Daha çok takım çeliklerine katılır (AISI A7'de %4,75 ve AISI T 15'de %5 V bulunur). Vanadyum, az miktarlarda bile, sıcak mukavemeti artıran bir elementtir; tane büyümesini engelleyici olarak davranır. Kesici uçların ömrünü uzatır. Çeliğin akma ve çekme mukavemetlerini artırır, aşınma özelliklerim iyileştirir [4].

Molibden: Kuvvetli karbür yapan refrakter bir elementtir. Çeliğin mukavemetini, aşınma dayanımını artırır. Temper gevrekliğini ve pitting korozyonunu engelleyici etkisi vardır; temperlemede ikincil sertleşmeye neden olur.

Wolfram: Yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştiren karbür yapıcı bir elementtir. Özellikle takım çeliklerinde (T serisi yüksek hız çeliklerinde) kullanılır. Pahalıdır.

Niobyumun: Etkileri vanadyuma benzer. NbC şeklinde kübik karbür yapar. Aşınma direncini artırır. Paslanmaz çeliklerde ve ısıl direnli alaşımlarda kullanılır. Vanadyum kadar yaygın kullanımı yoktur. Tane inceltici etkisi vardır.

Titanyum: Bazı paslanmaz çelikler ile yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlarda katı çözelti sertleştirici ve karbür yapıcı olarak kullanılır (TiC). Çökeltme ile serleştirilen paslanmaz çelikler ile maraging çeliklerinde serleştirici partikül oluşumuna yardım eder.

Kobalt: Karbür yapmaz; katı çözelti sertleşmesi ile mukavemet artışına neden olur. Yüksek sıcaklık özelliklerinin gelişmesinde en önemli elementtir. Özellikle sıcak iş takım çelikleri ile yüksek hız çeliklerine katılır [4].

Çeliklerde daha az kullanılan diğer alaşım elementleri ve bunların temel fonksiyonları şöyledir:

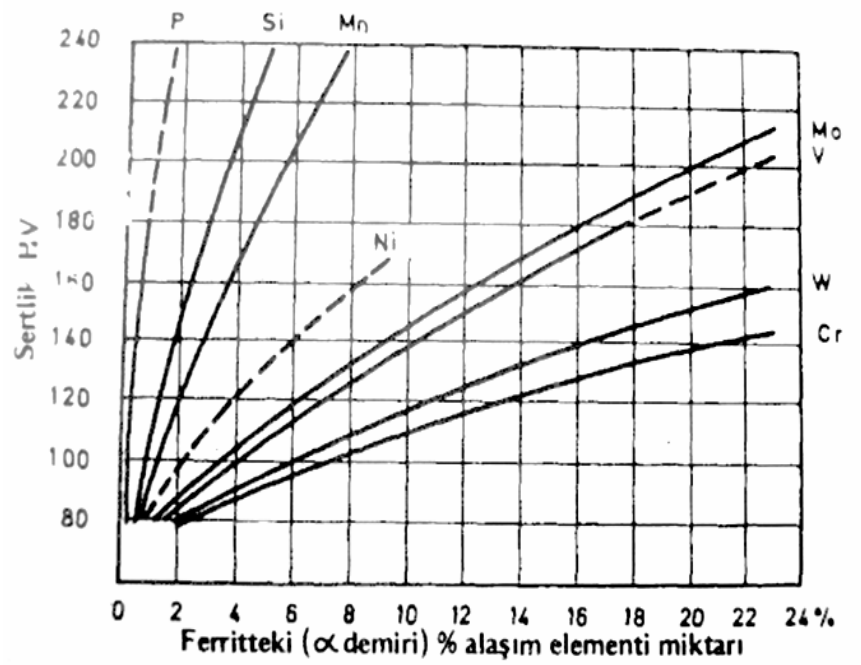
Aluminyum: Çeliğe deoksidant olarak girer; tane küçültücüdür ve özellikle yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı dayanıklılık sağlar.

Kükürt, fosfor, kurşun: Bunlar esasen çelikte arzu edilmez. Fakat, talaş kaldırma kabiliyetini artırdıkları için otomat çeliklerinde özellikle bulunmaları arzu edilir (%0,3'e kadar).

Azot, bor: Arayer katı eriyik yaparak çeliğin mukavemetini artırırlar. Çökelti partikülü oluşturur ve sertleşebilirlik özelliğine yardımcı olur.

Selenyum: Bazı paslanmaz çeliklerde az miktarda kullanılır. Talaş kaldırma kabiliyetini iyileştirir. Korozyon direncini kükürde nazaran daha az düşürür [4].

Alaşım elementlerinin Fe-C denge diyagramına etkileri ferrit (α) ve ostenit (γ) faz alanlarını değiştirmesi ile birlikte meydana gelir. Nikel ve manganez ötektoid sıcaklığı (A_1-723°C) düşürme yönünde etki ederken, molibden, alüminyum, silisyum, tungsten ve vanadyumun etkisi artırma yönündedir. Kromun da artırma yönünde fakat diğer elementlere nazaran zayıf bir etkisi vardır Alaşım elementleri, ötektoid noktanın karbon miktarını da değiştirirler. Molibden, krom silisyum, vanadyum ve titanyum gibi elementler ise A_1 kritik sıcaklığını yükseltirler; böylece, ostenit faz alanı küçülürken aksine ferrit faz alanını (ve δ-ferrit faz alanını) genişletirler. [4] Ferrit içinde katı eriyik oluşturan tüm alaşım elementleri ferritin sertliğine etki ederler. Şekil 2.2'de bu elementlein sertliğe etkileri ne kadar değiştirdikleri görülmektedir. Çeliklerde en çok bulunan alaşım elementlerinden Si ve Mn, ferritin sertliğine en fazla etkide bulunan iki elementtir.Cr ise en az etkiyi gösterir. Bu nedenle, Cr soğuk işlem görecek çeliklerde kullanılan en yaygın alaşım elementidir [7].



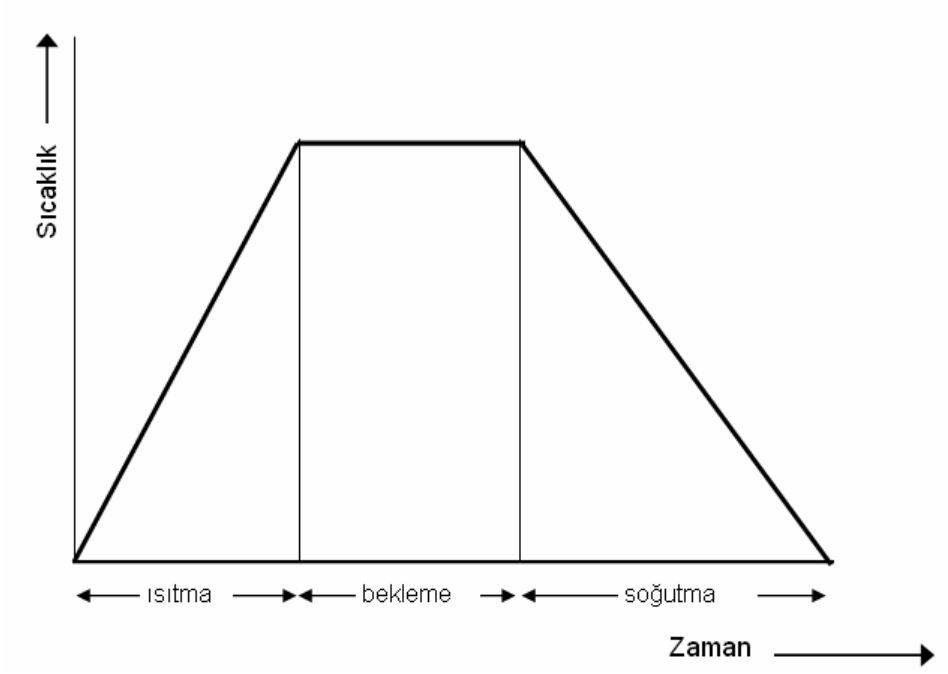
Şekil 2.2. Alaşım elementlerinin ferritin sertliğine etkileri [7].

2.4. Çelikleri Uygulanan Isıl İşlemler

2.4.1.Genel Terimler

Isıl işlem teriminden, metal malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun özellik değişimleri anlaşılır. Isıl işlemde bu tanıma uygun olarak, parçaların belirli bir sıcaklığa ısıtılması 'ısıtma', bu sıcaklıkta uygun bir süre tutma 'bekleme' ve belirli bir programa uygun olarak sıcaklığın düşürülmesi 'soğutma' ile üç kademede özellik değişimleri sağlanır. Derin soğutmalı ısıl işlem türü dışında, her tür ısıl işlem için geçerli olan bu proses Şekil 2.3'de belirtilmiştir [8].

Isıtma, parçanın sıcaklığını, oda sıcaklığından ısıl işlemde öngörülen belirli bir sıcaklığa yükseltme işlemidir. Isıtma projesinin herhangi bir anında, ısıtılan parçanın yüzeyindeki ve merkezindeki sıcaklık değerleri farklıdır.



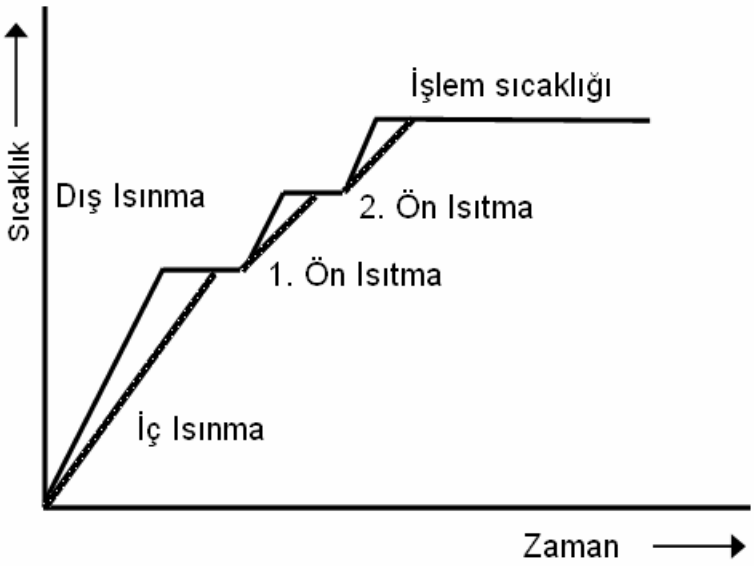
Şekil 2.3. Isıl işlemde, genel olarak işlem prosesi [8].

Isıtılan malzemenin direnç olarak kullanılarak elektrikle ısınması dışında, ısıtma ortamı ne olursa olsun, ortamın ısıtma gücüne bağlı olarak, parçanın yüzeyi belirli bir sıcaklığa ulaştığında, parçanın çekirdeği (merkezi), malzemenin boyutuna ve ısı iletme kabiliyetine bağlı olarak daha geç ısınacağından, sıcaklık daha düşük olur (Şekil 2.3). Diğer bir anlatım ile, parçanın yüzeyi öngörülen belirli bir sıcaklığa geldiğinde, çekirdeğinin de aynı sıcaklığa gelmesi için, biraz daha fazla sürenin geçmesi gerekir. Bu nedenlerle, ısıtma işleminde parça yüzeyinin ısınması dış ısınma ve merkezinin ısınması iç ısınma olarak ayrılır. Oda sıcaklığından itibaren, parça yüzeyinin öngörülen işlem sıcaklığına kadar ısınması için geçen süre dış ısınma süresi, merkezin işlem sıcaklığına gelmesine kadar geçen süre iç ısınma süresi ve parça yüzeyi işlem sıcaklığına geldikten sonra, merkezinin işlem sıcaklığına gelmesi için geçen süre de iç ısınma için bekleme süresi olarak adlandırılır.

Bu sıcaklık farkının artması büyük ısıl gerilmeler oluşturacağından, genellikle istenmez. Sıcaklık farkını azaltmak amacıyla, öngörülen ısıtma sıcaklığının altında bir ya da iki ayrı sıcaklıkta ara ısıtma yapılabilir. ‘Ön ısıtma’ adı verilen bu işlemle, parçalarda daha düzenli ve homojen ısıtma sağlanır (Şekil 2.4), aynı zamanda iç ısıtma için bekleme süresi kısalır. Ayrıca, ısıtma hızını azaltarak da, yüzey ve çekirdek arasındaki sıcaklık farkı azaltılabilir. Çeliklerin ısıl işleminde daha çok

ön ısıtma tercih edilirken, döküm malzemelerde yavaş ısıtma da tercih edilmektedir [8].

Isıtma sıcaklığı olarak da belirtilen işlem sıcaklığı, ısıl işlemde ulaşılması öngörülen en yüksek sıcaklıktır. Ancak ısıl işlem türüne bağlı olarak, ısıtma sıcaklığı terimi yerine, tavlama sıcaklığını, sertleştirme sıcaklığı, ostenitleştirme sıcaklığı, ani soğutma sıcaklığı, meneviş sıcaklığı, çözme sıcaklığı, yaşlandırma sıcaklığı ve çökeltme sıcaklığı gibi terimlerde kullanılmaktadır. Isıtma sıcaklığında yapılan, sıcaklığı sabit tutma işlemine, bekleme ve bu esnada geçen süreye de bekleme süresi adı verilir. Bekleme süresi, teorik olarak iç ısınmanın bitmesini müteakip soğutma başlangıcına kadar geçen süredir. Ancak, iç ısınmanın tam bittiğini anın saptanması ya da hesaplanarak kesin olarak bulunması çok zor olduğundan ve pratikte dış ısınmanın bittiği an kolayca ölçülebildiğinden, uygulamalarda daha çok dış ısınmanın bitiği an, bekleme süresinin başlangıcı olarak alınır. Öngörülen sıcaklık değerinin hatalı olarak üzerine çıkılması ya da sürenin olması gerekenden fazla uygulanmasına aşırı ısıtma adı verilir [8].

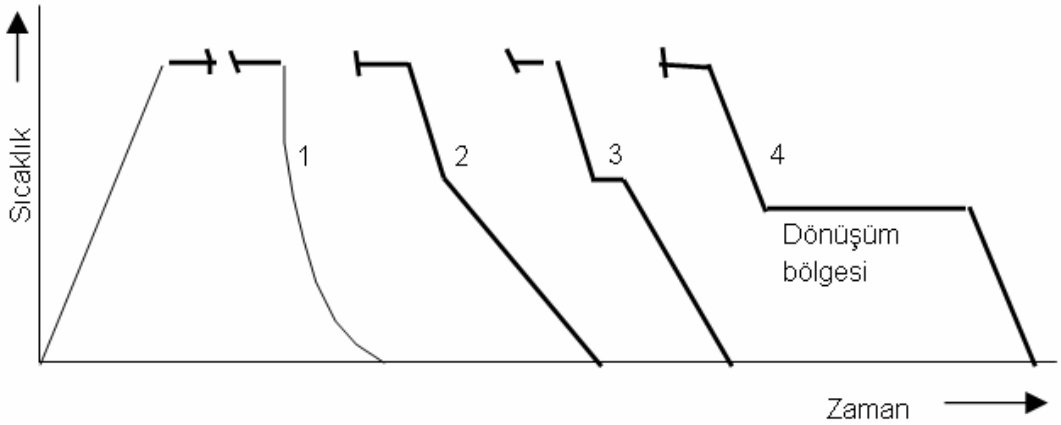


Şekil 2.4. Isıl işlemde ön ısıtma uygulaması [8].

Isıl işlemin üçüncü kademesi olan soğutma işlemi, parçanın ısıtma ortamında bırakılarak ortamla birlikte soğuması, açık havada ya da belirli bir soğutma ortamında, oda sıcaklığına kadar sürekli ısı vererek sürekli soğutma tarzında

olabileceği gibi, önce yağ daha sonra su veya hava ya da tersi olarak önce su sonra yağ gibi iki ya da üç değişik ortamda birbiri peşi sıra hızlarda soğuması kademeli soğutma, belirli bir sıcaklığa kadar sürekli soğutup, bu sıcaklıkta sıcaklık dengesi sağlanacak kadar beklendikten sonra soğutmaya devam edilmesi kesintili soğutma tarzında olabilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıktan belirli bir sıcaklığa ısıtılmış banyo içerisine daldırılıp, bu sıcaklıkta yapısal dönüşme yaptıracak şekilde bekleme ve tekrar sürekli soğutmaya devam etme olarak izotermik (eşısıl) dönüşümlü soğutma tarzında da uygulama yapılabilir (Şekil 2.5) [8].

Çeliklerin sertleştirilmesinde yapılan hızlı soğutma işlemi de, ani soğutma olarak tanımlanır. Bazı soğutma işlemlerinde, parça sıcaklığının sıfırın altına düşürülmesi gerekebilir. Bu tür soğutmaya da, aşırı soğutma, alçak soğutma, sıfır altı soğutma ya da derin soğurma denilmektedir.



Şekil 2.5. Isıl işlemde genel soğutma yöntemleri [8].

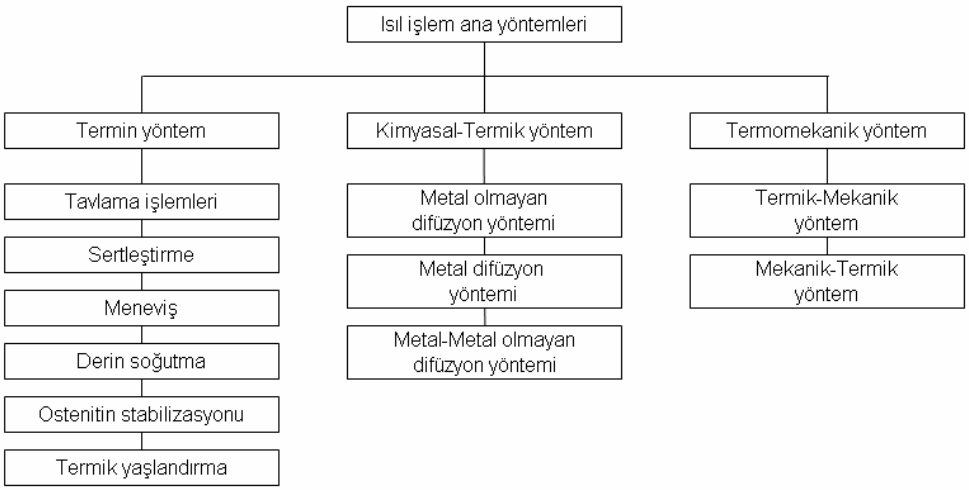
2.4.2. Isıl İşlem Yöntemleri ve Açıklamaları

Alaşımın hazırlanmasından sonra, çeliğin özellikleri mekanik ve/veya ısıl işlemlerle geliştirilebilir. Isıl işlem, çeliğin, genellikle, oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklık aralığında (100-1300°C) faz dönüşümlerini/yeni faz oluşumlarını içeren maksatlı ısıtma/soğutma peryotlarıdır. Isıl işlem süreleri, iş parçasının boyutlarına bağlı olarak saniye ölçeğinden günler/haftalar ölçeğine değişir. Bu ısıl işlemler sonucunda elde edilen yapılar demir-karbon denge diyagramında bulunan denge

fazları dışında denge diyagramında olmayan martenzit, beynit gibi denge dışı fazları da bulundurur. Dolayısı ile, arzu edilen özelliklerin elde edilebilmesi için çok sayıda yol olabilir. Her halukarda, en uygun yol (parça güvenliği, çalışan güvenliği, maliyet, kullanım ömrü açısından) aranmalı ve takip edilmelidir [4] . Metal malzemelerde ısıl işlemle özellik değişmeleri bağlanırken, malzemenin kimyasal bileşiminde değişiklik yapılmadan, kristal ya da kafes yapısında düzenlemeler yapılabilir. Termik yöntem ya da ısıl yöntem adı verilen bu tür ısıl işleme örnek olarak, difüzyon tavlaması (homojenleştirme tavlaması), kaba tane tavlaması, gerilim giderme tavlaması, yumuşak tavlama, normal tavlama gibi çeliklerdeki tavlama işlemleri ile sertleştirme ve meneviş işlemleri söylenebilir [8].

Malzemenin tümünde ya da yalnızca cidarında (yüzeyinde) kimyasal bileşimde değişme yapılarak, özellik değiştirme de olanaklıdır. Kimyasal-termik yöntem ya da kimyasal-ısıl yöntem adı verilen bu tür işlemlere örnek olarak sementasyon, nitrasyon, karbonitrasyon, sülfonitrasyon, sülfokarbonitrasyon, silisyumlama, borlama, metal ya da metal olmayan element ya da bileşiklerinin difüzyonu gösterilebilir. Ayrıca, teknolojik ve termik işlemler birbiri peşi sıra uygulanarak mekanik-termik yöntem (Termomekanik yöntem) ya da mekanik-ısıl yöntem ile örneğin rekristalizasyon tavlaması, toparlanma tavlaması, patentleme tavlaması ve bazı özel sertleştirme işlemleriyle özellik iyileştirilmesi yapılabilir. Yukarıda ana hatları ile belirtilen yöntemler, çoğu zaman birbiri peşi sıra uygulanabilmektedir. Tablo 2.3'de ısıl işlem yöntemlerinin sınıflandırmaları verilmiştir [8].

Tablo 2.3. Isıl işlem ana yöntemlerinin sınıflandırılması.



Çeliklere sıklıkla tatbik edilen bazı ısıl işlemler şunlardır:

Homojenlestirme: Hemen hemen bütün döküm parçalarına uygulanır. Döküm ürünlerinin yapısını rafine etmeyi ve de özellikle, segregasyonun şiddetini azaltmayı (alaşım bileşimini homojen hale getirmeyi) hedefler [4].

Normalizasyon: İş parçasının yüksek sıcaklıktan (ostenit bölgesi) oda sıcaklığına havada soğuması işlemi olup, yapıyı normalize etmeyi hedefler. Normalizasyon, yüksek hız çelikleri için sertleştirme işlemi yerine geçer.

Tavlama: Isıl işlem teknolojisinde iki farklı şekilde kullanılır. Birincisi, mekanik olarak soğuk şekillendirilmiş parçaların tokluğun artırmayı amaçlar (proses tavlaması). İkinci durumda, iş parçasının ostenit sıcaklığından oda sıcaklığına fırın içerisinde soğutulması işlemidir (tam tavlama); hedef, talaş kaldırmak veya döverek şekillendirmek için en yumuşak yapıyı elde etmektir.

Gerilme giderme: Özellikle talaş kaldırma veya kaynak işlemi sırasında oluşabilecek fazla gerilmeleri azaltmak için uygulanan bir işlemdir.

Su verme (sertleştirme): Martenzitik yapı elde etmek için çeliğin ostenit sıcaklığından oda sıcaklığına çok hızlı bir şekilde soğutulması işlemidir. Soğutma su, yağ, polimer katkılı sıvı, tuz banyoları, hava gibi çeşitli ortamlarda yapılabilir. Sonuçta sert ve gevrek martensit yapısı oluşur.

Temperleme (menevişleme): Su verme ile oluşan martenzitik yapının gevrekliğini azaltmak ve iş parçasının sertliğini ayarlamak için dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta uzun olmayan bir süre tutulması işlemidir.

Karbürleme: Düşük karbonlu az alaşımlı sertleştirilebilmesi için yüzeyinin karbonca zenginleştirilmesi işlemi olup ostenit bölgesinde yapılır.

Nitrürleme: Çelik yüzeyinin azotça zenginleştirilmek suretiyle sertliğinin artırılması işlemidir ve 500-580°C arasındaki sıcaklılarda uygulanır.

Alevle veya İndüksiyonla sertleştirme: Sertleşebilen bir çeliğin yüzeyinde belirli bir kalınlıktaki bölgenin alevle veya indüksiyonla ostenit sıcaklığına ısıtılması ve sertleştirilmesi işlemidir.

Küresellestirme: Çelik yapısını yumuşatmak, talaş kaldırma kabiliyetini artırmak için çeliğin ostenit sıcaklığının hemen altındaki sıcaklıklarda uzun süre tutulması (ve bu sırada sementitin küreselleşmesi) işlemidir.

Bir çelik için hangi ısıl işlemin uygun olduğu (işlem sıcaklığı, süresi, soğutma ortamı, temperleme sıcaklığı, vb) çeliğin bileşimi ve kullanım amacına bağlı olarak değişir [4].

2.4.3 Gerilim Giderme Isıl İşlemi

Termal ve mekanik prosesler sırasında üretilmiş çelik parça ve donanımların performansını kötüleştirebilen kalıntı gerilmeler meydana gelir. Kalıntı gerilmeler, ısıl işlem veya proses sırasında distorsiyon veya çatlamaya veya servisde dizayn gerilmeleri altında hasara sebep olabilir. Kalıntı gerilmelerin bir kaynağı ostenitlemeden sonra büyük kesitlerin soğutulmasıdır. Havada soğutma sırasında bile, büyük bir kesitin yüzeyi merkezinden daha önce ferrit ve sementite dönüşebilir. Sonunda, merkez dönüştüğü zaman, ferrit oluşumu ile birlikte meydana gelen hacim artışı daha soğuk olan zaten dönüşmüş yüzey tarafından zorlanır. Bir sonuç olarak, yüzey basmada ve merkez çekmededir. Martensit oluşturmak için su verilmesi benzer bir etki yapar, ancak kalıntı gerilme problemi daha şiddetlidir, hatta küçük kesitlerde bile meydana gelir; bu, daha düşük soğutma hızlarında martenzit oluşumuna izin vermek için sertleşebilir çeliklerin niçin alaşımlandığının bir cevabıdır. Martenzitik çelikler, her zaman kalıntı gerilmeyi azaltan ve süneklik ve tokluğu artıran bir proses olan temperlemeye tabi tutulurlar. Talaş kaldırma ve soğuk işlem de parçanın yüzeyi ve iç bölgeleri arasındaki deformasyon miktarındaki farklılıklardan dolayı çelikte kalıntı gerilme meydana getirebilir. Kalıntı çekme gerilmeleri meydana getiren bir başka proses kaynaktır. Kaynak metali katılaştıkça ve büzüldükçe, bitişik ana metal tarafından zorlanır. Bir sonuç olarak, kaynaklı parçalarda sık sık gerilme giderme işlemleri uygulanır [9].

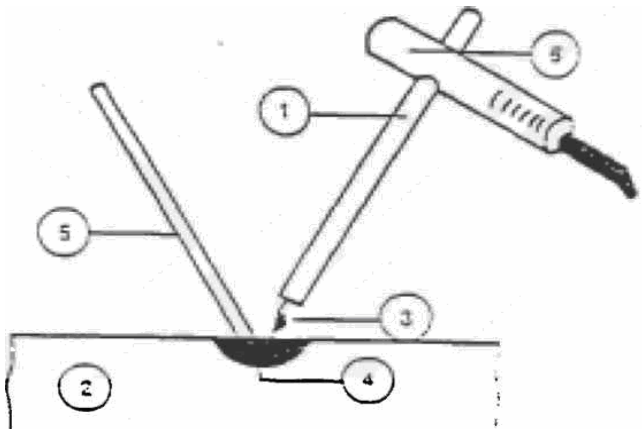
Kalıntı gerilmeler proses veya yeniden kristalleşme sıcaklık aralığının biraz altında veya o aralıktaki sıcaklılarda gerçekleştirilen kritikaltı ısıl işlemleri ile azaltılmakta veya elimine edilmektedir. Gerilme giderme sıcaklığına ısıtma veya soğutma, özellikle kalın kesitlerde veya büyük kaynaklı parçalarda bizatihi gerilme giderme işlemi sırasında yeni termal gerilmeler meydana getirmekten ve mümkün çatlamalardan kaçınmak için, yavaş yapılmalıdır. Gerilme gidermenin amacı kritikaltı tavlama işlemlerinde yapıldığı gibi yeniden kristalleşme ile mekanik özellikler büyük ölçüde değiştirmek değildir. Gerilme giderme, daha çok yeniden kristalleşmeden önce vuku bulan toparlanma mekanizmaları ile başarılmaktadır. Toparlanma ısıtma ve sıcaklığa ulaşmakla hemen başlar. Toparlanma hızı başlangıçta çok yüksektir ve sabit sıcaklıkta zamanın ilerlemesi ile azalır[9]. Parçalar, döküm ya da sıcak şekillendirme sonrası soğumada dengesiz sıcaklık akımı nedeniyle ya da işletmedeki mekanik zorlamalarda dolayı, genellikle iç gerilme (kalıcı gerilme) içerirler. Eğer bu iç gerilmeler, malzemenin elastiklik ve akma sınırlarını aşarsa, plastik şekil değiştirme meydana getirirler ve gerçek akma sınırını yükseltirler. Ayrıca bu iç gerilmeler daha çok yüksek olur ve kopma gerilmesine ulaşır ya da aşarsa, plastik deformasyonla birlikte kırılma meydana getirirler [8].

Gerilim giderme tavlamasında tavlama sıcaklığı, dönüşüm olmayacak şekilde 723 °C'nin altında seçilir. Alışılmış sıcaklık sahası 550-650 °C arasındadır. 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar, tufallaşmanın artması nedeniyle nadiren kullanılır. Islah edilmiş parçalarda, yüksek sıcaklıktaki menevişten dolayı gerilim giderme olayı kendiliğinden olur. Komplike parçalarda normal tavlamadan sonra, havada hızlı soğumada oluşan gerilmeleri azaltmak içinde gerilim giderme tavlaması uygulanabilir. Ayrıca, kaynak edilmiş parçalarda da, kaynak gerilmelerinin azaltılması için uygulanır. Büyük parçalarda kaynak yerinin çevresi, elektrotla, üfleçle ya da benzeri cihazlarla bölgesel olarak ısıtıldığında büyük gerilmeler meydana gelir. Bu durumda, parçanın tamamı ya da bölgesel olarak yavaş ve dengeli bir şekilde homojen ısıtarak, gerilme çatlakları önlenir. Hızlı ısıtmada yeterli olmayan ısıtmada, çatlama ya da plastik şekil değiştirme doğabilir. Tavlamadan sonra da soğutmanın, yeni kalıcı gerilmelere sebep olmamak için yavaş yapılması gerekir [8].

BÖLÜM 3. KAYNAK PROSESİ

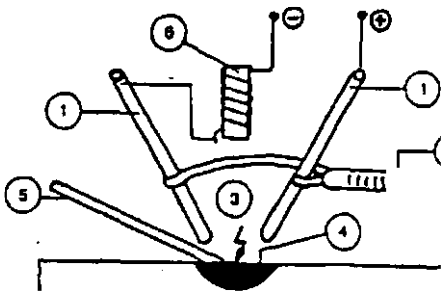
3.1. Kaynağın Tarihçesi ve Ülkemizdeki Gelişimi

El ile yapılan elektrik ark kaynağının tarihçesine göz atıldığında başlangıçta üç ayrı yöntem karşımıza çıkar. Elektrik ark kaynağı ile ilgili ilk patent 3 Aralık 1885'te Benardos tarafından alınmıştır. Benardas karbon bir elektrod ile iş parçası arasında ark oluşturmuş ve bir tel elektrod kullanarak kaynak yapmıştır (Şekil 3.1.) [1,10].



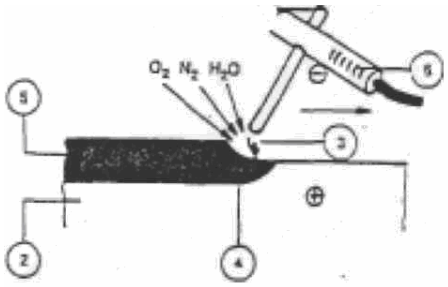
Şekil 3.1. Benardos kaynak yöntemi [1,10].

Daha sonraları 1889 yılında Zerener, geliştirdiği yöntemde elektrik arkını iki karbon elektrod arasında oluşturmuş ve iki elektrod arasında bulunan manyetik bir bobin yardımı ile de arkın parçaya doğru üflenmesini sağlamıştır. Yine burada da bir tel elektrod kullanılmıştır (Şekil 3.2.) [1,10].



Şekil 3.2. Zerener kaynak yöntemi [1,10]

1889 yılında da Slavianoff bugünkü elektrik ark kaynağının özünü oluşturan yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemde karbon elektrod yerine, çıplak bir metal elektrod ile iş parçası arasında ark oluşturulmakta ve ark sıcaklığında eriyen elektrod kaynak ağzını doldurmaktadır (Şekil 3.3.) [1,10].



Şekil 3.3. Slavianoff kaynak yöntemi [1,10].

Ancak bu yöntemler ile elde edilen kaynak dikişleri, havadaki oksijen ve azotun olumsuz etkilerinden korunamadığı için, düşük mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Kaynak banyosunun havanın olumsuz etkilerinden korunması; ancak. İsveçli Oskar Kjelberg'in 1904 yılında ilk örtülü elektrodu geliştirmesi sonucunda mümkün olabilmiş ve bu büyük buluş, Birinci Dünya Savaşından sonra kaynak tekniğini tamir yöntemi almanın yanında üretim aracı haline de getirmiştir [1]. Savunma ve uzay endüstrisinin sistemleri sonucunda kaynak konusunda son elli yıl içinde sayılamayacak derecede gelişmeler kaydedilmiştir.

Üretim hızının artmasıyla birlikte daha hızlı kaynak usullerinin araştırılması yoluna gidilmiş ve 1933'lerde Tozaltı kaynak metodu keşfedilerek önce ABD'de ve Rusya'da daha sonrada Avrupa'da kullanılmaya başlanmıştır. Tozaltı kaynak yöntemiyle kalın sacların, gemi ve tank zırhlılarının kaynağı yapılabilmektedir. İkinci Dünya Savaşı esnasında uçaklarda kullanılan alüminyum-magnezyum alaşımlarının kaynağında karşılaşılan sorunlar soy gaz koruması altında yapılan TIG kaynak yönteminin gelişmesine ve yaygınlaşmasına neden olmuştur [1,10].

MIG diye adlandırılan eriyen elektrodla soy gaz altında kaynak yöntemi bir çok alanda TIG yönteminin yerine alarak işlemin hızlanmasına ve otomatikleşmesine olanak sağlamıştır.

Kaynak bölgesine soy gaz yerine aktif bir gazın gösterilmesi sonucunda oluşan MAG diye adlandırılan aktif gaz altında eriyen elektrod ile kaynak yöntemi, son yıllarda büyük gelişmeler göstermiş az alaşımlı çeliklerin kaynağında diğer yöntemlere karşı büyüyen bir rakip haline gelmiştir [1].

Türkiye'de ilk kaynak uygulamalarına İstanbul Tersanelerinde başlanmıştır; daha sonra sırası ile 1929'da Askeri Fabrikalarda, 1930'da Sümerbank Hereke Fabrikasında, 1931'de Karayolları Merkez Atölyesinde, 1933'de Eskişehir Hava İkmal Merkezinde ve 1934'de de Devlet Demir Yollan Eskişehir Fabrikasında kaynak uygulamalarının başladığı bilinmektedir [1,11].

Türkiye'de kaynak konusunda ilk planlı çalışmaya 1937 yılında Devlet Demiryollarında başlanmıştır. Devlet Demiryollannın Eskişehir Fabrikasında 1934 yılında dağınık durumda bulunan birkaç kaynak cihazı daha sonralan 1937 yılında kurulan özerk bir kaynak bölümünde toplandı. Türkiye'de kaynağın gelişmesi 1950'!i yılların ortasından itibaren olmuştur. İ.T.Ü. eğitim planına kaynağı 1954'de almıştır. Makine malzeme ve İmal usulleri Enstitüsü, endüstriye ilk kaynak kurslarını 1955 yılında açmıştır. Yine aynı Enstitü 1958 yılında Alman Kaynak Tekniği Cemiyetinin esaslarına uygun Kaynak Mühendisliği kursunu da 1955 yılında yapmıştır. Aynı yıllarca şimdiki Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde ark kaynak teknikleri, oksi-gaz kaynağı ve ocak kaynağının eğitimi en üst düzeyde verilmekteydi.

Ülkemizde alışılmış oksi-gaz ve elektrik ark kaynak yöntemlerinin kullanma alanları büyük bir gelişme göstermektedir. Gemi yapımı, çelik konstrüksiyon. basınçlı kaplar ve büyük makine konstrüksiyonlarında tozaltı kaynağının klasik tek tel ile yapılan yönteminin geniş çapta kullanılmasına karşın, çift telle yapılan tondem, seri ve paralel yöntemleri ile band elektrod uygulaması henüz yoktur.

Aktif gaz koruması altında yapılan MAG kaynağı ve Soygaz koruması altında yapılan TIG ve MIG kaynak yöntemleri son on yıl içerisinde, artan oranda endüstrimizin çeşitli alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [1,11].

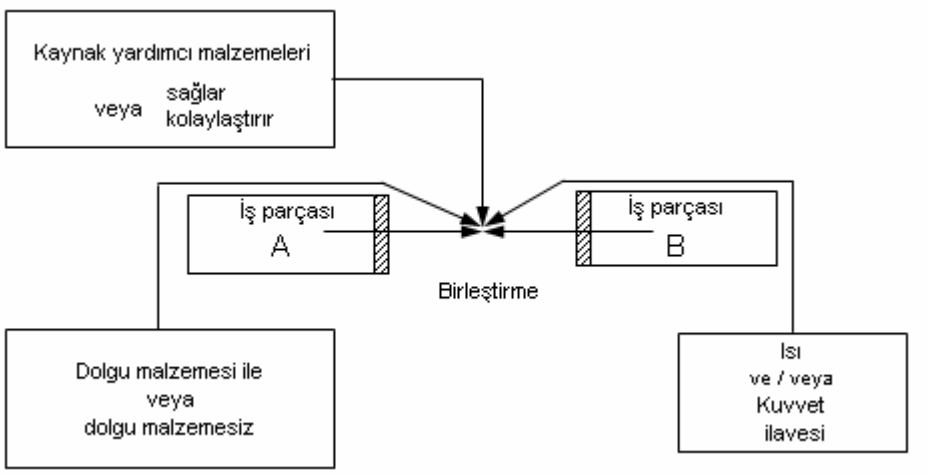
3.2. Kaynak Terimleri ve Açıklamaları

Kaynak işlemi sırasında yoğun olarak kullanılan temel tanımlar ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Kaynak; malzemelerin ısı enerjisi ve/veya basınç ile sürekli bir iç yapıya sahip olacak şekilde birleştirilmesi işlemidir. Dolgu malzemesinin erime sıcaklığı, ana malzemelerinliyke eşdeğer seviyededir. Kaynağın sonucu kaynak dikişidir [12].

Basınç kaynağı; birleştirilecek her iki üzerine yeterli kuvvet uygulanarak az veya çok plastik deformasyon oluşturup kaynaklanması işlemidir. Genellikle, dolgu malzemesi kullanılmaz. Genellikle, birleşme yüzeyleri bağlantıyı sağlamak veya kolaylaştırmak amacıyla ısıtılır.

Eritme kaynağı; birleşecek yüzeylerin, dış bir kuvvet kullanmadan, genellikle eritilmiş dolgu malzemesi ilavesi ile beraber eritilerek kaynaklanması işlemidir.



Şekil 3.4. Kaynak İşleminin Prensibi [12].

Birleştirme Kaynağı; iki veya daha fazla iş parçası arasında sökülemeyen bir bağlantı oluşturma işlemidir. Kaplama kaynağından ayırt etmek için kullanılan bir terimdir.

Kaplama Kaynağı; metal yüzeyine kaynaklama yoluyla farklı bir tabakanın

kaplaması işlemidir. Örneğin ana malzemeye kıyasla korozyona, aşınmaya veya ısıya daha dirençli bir tabakanın kaplanması.

Kaynak koşulları; kaynaklı birleştirmenin yapılması esnasında karşılaşılan koşullardır. Bunların arasına çevre koşulları (örneğin hava şartları), fiziksel etkiler (gürültü, ısı, dar alan) ve de iş parçasına bağlı şartlar (ana malzeme kaynak pozisyonu) dahildir.

Kaynak parametreleri; belirli kaynak prosesi ile teknik anlamda bir kaynaklı birleştirmenin yapılabilmesi için gerekli verilerdir. Bunlar arasında dolgu malzemesi, mekanik ve elektriksel ayarlama değerleri, ön ısıtma, bekletme ve pasolar arası sıcaklıklar, dikiş sıralamaları gibi parametreler dahildir.

Kaynak yardımcı malzemeleri; gaz, toz veya pasta gibi kaynak işleminin gerçekleştirilmesi veya kolaylaştırılması için kaynak esnasında kullanılan malzemelerdir. Fakat bu malzemeler, kaynak dikişinin ana bileşeni olamazlar [12].

3.3 Kaynak Yöntemleri ve Sınıflandırma

Bir kaynaklı birleştirmede çoğunlukla şu özellikler aranmaktadır; mukavemet, tokluk, yüksek ve çok düşük sıcaklıklara karşı direnç gösterme kabiliyeti, korozyon ve aşınmaya karşı direnç, gaz, buhar, basınç veya vakuma karşı sızdırmazlık gibi çok özel şartlar aranmaktadır.

Tablo 3.1. Metal kaynak proseslerinin sınıflandırılması [12].

Enerji taşıyıcısı cinsine göre	Ana malzemenin cinsine göre	Kaynak işlemi amacına göre	Kaynak işlemi işleyiş şekline göre	İmalat türüne göre
▪ Gaz ▪ Elekreik akımı ▪ Ark ▪ Işın ▪ Hareket ▪ Sıvı	▪ Metaller ▪ Plastikler ▪ Kompozit malzemeler	▪ Birleştirme kaynağı ▪ Kaplama kaynağı	▪ Eritme kaynağı ▪ Basınç kaynağı	▪ Elle kaynak (m) ▪ Yarı mekanik kaynak (t) ▪ Tam mekanik kaynak (v) ▪ Otomatik kaynak(a)

Çok sayıda ana malzeme (çelik, demir dışı metaller) ve bunların üretilen kalınlığı 0,001 mm ile 1000 mm arasında değişen yarı mamuller (levha,boru,profil) ve çeşitli enerji sağlayıcılar, cihaz teknolojileri, kaynak dolgu malzemeleri (çubuk elektrodlar, tel elektrodlar, koruyucu gazlar vs.) göz önüne alındığında günümüze pratik anlamda 50'den fazla farklı kaynak prosesi uygulanmaktadır.

Bunu ilave olarak, çeşitli biçimlerdeki dolgu malzemeleri, yardımcı malzemeler, cihaz düzenekleri ve farklı imalat koşullarında doğan teknolojik şartlar göz önüne alındığında 100'ün üzerinde varyasyon ortaya çıkmaktadır.

3.4. Kaynak Prosesleri Uygulama Alanları

Çelik Konstrüksiyon: Kaynak teknolojisinde, çelik konstrüksiyon denildiğinde çelik malzeme kullanılarak imal edilmiş taşıyıcı yapılar anlaşılmaktadır. Bunlar, endüstriyel binalar, fabrika binaları, direk, kule, baca, karayolu ve demir yolu köprüleri, konveyör yapılar, boru montajı, su tesisleri inşası, vinç yolu inşası, kömür deposu, kap vs. gibi yapılardır. Çelik konstrüksiyon alanındaki kaynaklı kostrüksiyonlar büyük oranda haddelenmiş profillller ve kabaca saçlardan (levhalardan) meydana gelmektedir [12].

Kaynaklı taşıyıcıların imalatında kullanılan önemli prosesler: Yakarak kesme, makasla kesme, kıvırma, eğme, yarı mekanik MAG kaynağı, tam mekanik MAG ve tozaltı kaynağıdır.

Gemi İnşası: Günümüzde, gemi inşa eden bütün ülkelerde kaynak tekniği gemi gövdesinin imalatını belirler. Gemi tipi ve büyüklüğüne bağlı olarak gemi gövdesi üzerindeki kaynak operasyonlarının imalattaki oranı %20-40 arasındadır [12].

Boru Hattı İnşası ve Elektrik Santrali İnşası: Boru hattı inşasında kaynaklı birleştirme prosesidir. Kaynaklanan başlıca parçalar; kaynaklı çelik borular, dirsek, şekilli boru parçaları, boru alt destekleridir. Boru imalatlarında kullanılan önemli kaynak prosesleri: Yüksek frekans kaynağı, tozaltı kaynağı (ince etli borularda TIG

ve Plazma kaynağı), yukarıdan aşağıya pozisyonlarda elle ark kaynağı, otomatik makinelerle tam otomatik MAG kaynağı, gaz kaynağı ve lehimlemedir.

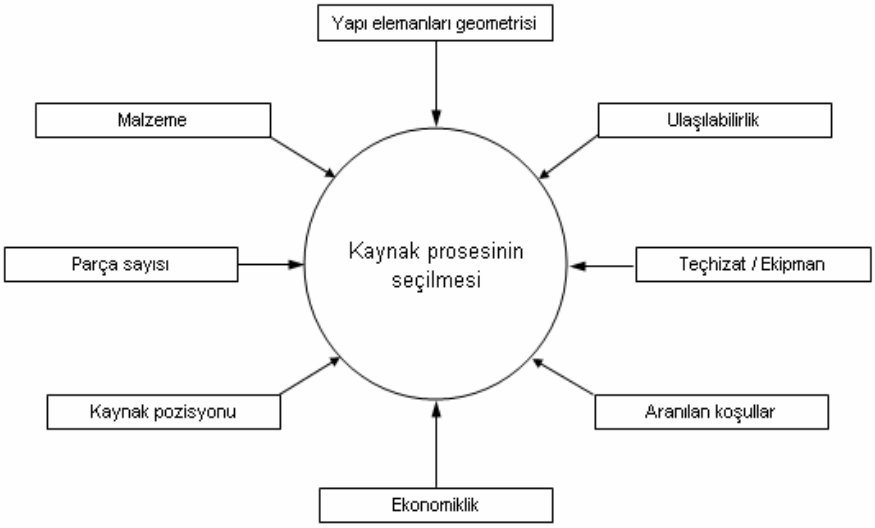
Kap ve Kimya Tesisi İnşası: Bu kapsamdaki önemli yapı grupları: Boru tipi fırınlar, reaktörler, ısı eşanjörleri, kolonlar, seperatörler ve çeşitli kaplardır.

Sıcaklık, kuvvet yüklemeleri ve kimyasal ortam sebebiyle oluşan farklı yüklemeler farklı malzeme ve malzeme kombinasyonlarının kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir[12]. Önemli kaynak prosesleri; elle ark kaynağı, MAG ve TIG kaynağı, tam mekanik MAG ve tozaltı kaynağı (kaynak düzenek ve aparatlarıyla) ve TIG orbital tekniğidir.

3.5. Kaynak Proseslerinin Seçilmesi

Kaynak proseslerinin uygulama alanlarının sınırlandırılmasında aşağıdaki faktörler göz önüne alınır: Kaynaklanacak malzemelere, yapı elemanı formu (geometri, boyutlar), levha veya dikiş kalınlığı, ekonomiklik, birim zamanda dikişin birim uzunluğundaki enerji verimi ve birim zamanda eritilen malzeme miktarıdır.

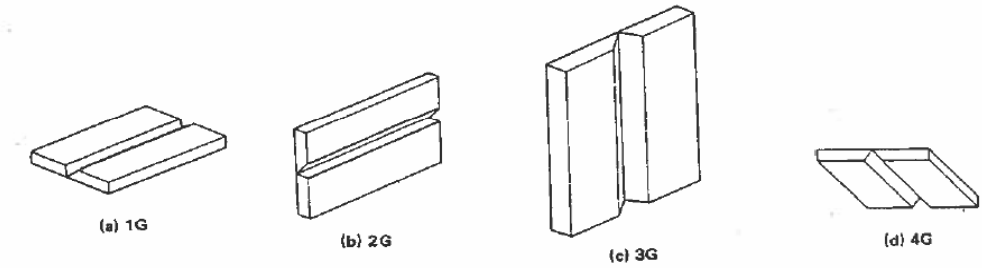
Ayrıca imalat maliyetleri göz önünde bulundurularak; birim zamanda imal edilecek miktar (gerekli parça sayısı), imalat bakış açıları veya mevcut cihaz tekniği, tek parça, seri, kitlesel imalat, diğer teknolojik bakış açıları (kalite koşulları, muayene çerçevesi, güvenilirlik) ve konstrüktif bakış açıları, yükleme türü (statik, değişken yük, kullanım ömrüne ait güvenilirlik). Kaynak proseslerinin uygulama alanı kapsamı şu temellere bağlı olarak belirlenir. Meydana getirilen kaynak dikişi kesiti, harcanılan iş süresi, kullanılan personel ve bunların kalifikasyonu, kaynak dolgu malzemesi vb. harcanması ve aynı zamanda maliyet hesabı temeline bağlıdır [12].



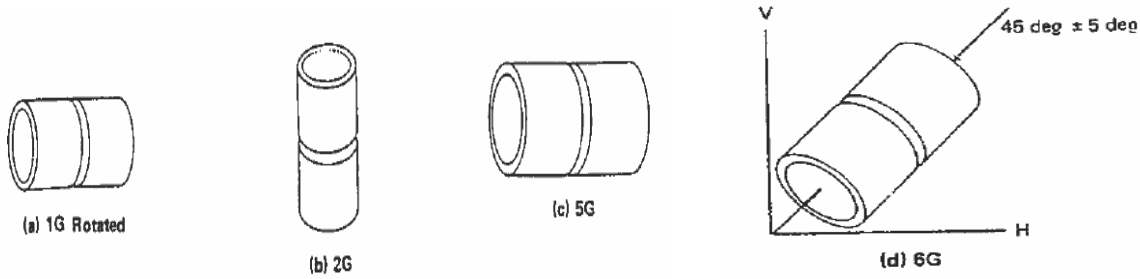
Şekil 3.5. Kaynak proseslerinin seçilmesine ait şema [12].

3.6.Kaynak Pozisyonları

ASME Section IX'a göre kaynak pozisyonları aşağıdaki şekillerde tanımlanmıştır[13].



Şekil 3.6. Plaka kaynak pozisyonları (a) Düz, (b) Yatay, (c) Dikey, (d) Baş üstü

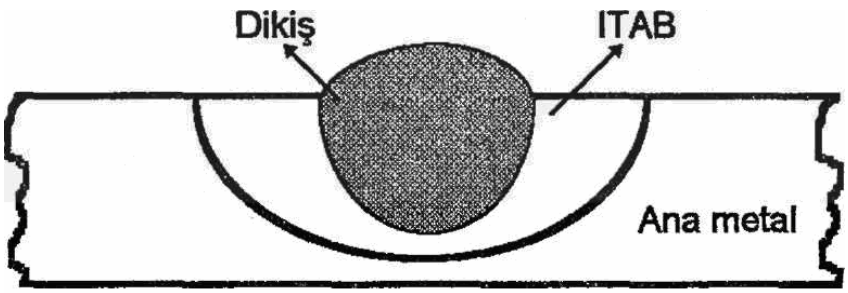


Şekil 3.7. Borular için kaynak pozisyonları (a) Düz, (b) Dikey, (c) Yatay, (d) Boruların kaynağında 45°'lik eğik pozisyon.

3.7. Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Kaynak Metali Bölgelerinin İncelenmesi

Metalik malzemeler bir kaynak işlemi gördükleri zaman, kaynak dikişine bitişik olan bölge, kaynağa uygulanmış olan sıcaklık derecesinin, daha doğrusu ısı çevriminin etkisi altında kalır. Yüksek mukavemetli yapı çeliklerinde bu ısı çevrimi, çeliğin eldesi esnasında görmüş olduğu ısı çevriminden farklı olduğundan, ortaya içyapısı, buna bağlı olarak da mekanik özellikleri farklı bir bölge ortaya çıkmaktadır.

Kaynak yapılan bir parçada kaynak bölgesi, erime bölgesi (dikiş) ve ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) olmak üzere iki bölümde incelenmektedir. Şekil 3.8'de kaynak bölgesi görülmektedir [3].



Şekil 3.8. Kaynak Bölgesi.

Kaynakta çeliğin maruz kaldığı ısının etkisi sonucu malzemede çoğu zaman devamlı değişmeler meydana gelir. Bir çelik, geniş önlemler almayı gerektirmeden ve bu değişmeler kaynaklı konstrüksiyonda sakıncalar oluşturmadan kaynak edilebiliyorsa bu çelik iyi kaynak kabiliyetli olarak tanımlanır. Buna karşılık normal bir kaynak işlemi malzemede, konstrüksiyondan beklenenleri ciddi tehlikeye sokacak şekilde değişmelere yol açar veya kaynak işlemi sırasında veya bu işlemden hemen sonra, çatlaklar gibi malzeme kusurları meydana getirirse özel önlemlerin alınması veya bazı kaynak öncesi veya kaynak sonrası işlemleri gerektirir. Böyle çeliklere de sınırlı kaynak kabiliyetli çelikler denir. Aslında "kaynaklanamaz" çelik diye bir malzeme yoktur. Doğru metalurjik şartlar yerine getirilmesi şartı ile her çelik kaynaklanabilir. Ancak bu şartlar bazen o kadar çapraşık olabilir ki bunların pratikte uygulanması gerçekçi olmaz. Çeliği yerel olarak etkileyen çabuk ısınma ve soğuma olayları bakımından kaynak işlemi, çelik üzerinde termik şok etkisi veya böyle etkilerin bir serisi olarak tanımlanabilir [14].

Kaynak kabiliyeti yalnız malzemeye ait bir özelliğe değil, aynı zamanda kaynak usulüne ve konstrüksiyona da bağlıdır. Bir metal, bir kaynak usulünde gayet iyi bir derecede kaynak kabiliyeti göstermesine rağmen, diğer bir usulde çok zayıf bir kaynak kabiliyetine sahip olabilir. Örneğin, Alüminyum ve Paslanmaz çelikler oksi-gaz kaynak yönteminde zayıf bir kaynak kabiliyeti göstermelerine rağmen gazaltı (TIG-MIG) kaynak yönteminde oksi-gaza göre iyi bir kaynak kabiliyetine sahiptir [15].

3.7.1. Ergime bölgesi

Ergime bölgesi, kaynak anında oluşan ısının etkisi ile ergiyen ve kaynaktan sonra katılaşan bölgedir. Isının tesiri altında kalan bölgeden, ergime çizgisi adını verdiğimiz ergimiş ve ergimemiş kısımlar arasındaki sınırla, ayrılır. Bu sınır bir kaynak bağlantısından çıkartılarak dağlanan ve parlatılan enine kesit üzerinde çıplak gözle dahi kolayca izlenebilir [16].

Ergime bölgesi kaynak metali ve esas metalin karışımından ibarettir. Tek pasolu kaynak dikişlerinde, bu bölgede esas metal ve kaynak metali, kaynak banyosundaki şiddetli türbülanstan ötürü iyice karışmıştır ve oldukça homojen bir bileşim gösterir. Buna karşın çok pasolu kaynaklarda, her pasonun esas metale karışma oranı farklıdır. Örneğin, kalın parçaların çok pasolu kaynak dikişlerinde, orta kısımlarda, esas metale rastlanmayabilir .

Ergime bölgesinde, esas metal ve kaynak metali oranı tam olarak bilinse dahi hesap yolu ile ergime bölgesinin bileşiminden belirlenmesine imkan yoktur. Çünkü birçok alaşım elementleri kaynak anında yanma dolayısıyla kayba uğrarlar. Bu kayıpları azaltmak için kaynak bölgesi, kaynak anında atmosferin etkisinden korunur. İyi bir kaynak bağlantısı kaynak bölgesinin atmosferin etkisinden korunması ile elde edilebilir; zira, oluşan kimyasal ve metalurjik reaksiyonlar ancak bu şekilde kontrol altına alınabilir. Oksijenle olan reaksiyonları kontrol için erime bölgesine çeşitli yöntemlerle (örtüye, toza, tele katılarak) deoksidasyon maddeleri ile yanan alaşım elementleri katılır. Bu bölgede ayrıca, bir cüruf örtüsü veya oluşturulan kontrollü bir atmosferlede korunur [16].

Sıvı haldeki metal içinde atomlar birbirleri arasında hareket serbestisine sahiptirler. Soğuma anında; sıcaklık, metal veya alaşımın katılaşma noktasına kadar düşünce, atomların

kristal kafesleri meydana getirmek üzere bileşimleri ile çekirdek oluşur. Bu sırada metalden ısı çekilir ve soğumaya devam edilirse, çekirdekler taneleri oluşturmak üzere yeni atomların ve kristal kafeslerin ilavesi ile büyümeye devam eder. Katılaşma anında ortaya çıkan ergime ısısı tabii soğuma hızını etkileyerek tanelerin fazla büyümesini önler. Tanelerin büyüyebilmesi için ısının sürekli olarak metalden çekilmesi gereklidir. Kaynak halinde ısının büyük bir kısmı ergime bölgesinden esas metale iletilir, dolayısıyla soğuma hızı yönünde paralel, oldukça iri sütunsal taneler oluşur, özellikle kalın parçaların, tek paso ile yapılmış kaynak dikişlerinde, bu iri sütunsal tanelerin birleştiği orta kısımlarda kalıntı elementler segregasyonuna rastlanır; bu olay, bu tip dikişlerin zayıflamasına sebep olur. Bu tür hata oluşumuna engel olmak için kaynak hızı azaltılır, çok pasolu kaynak tercih edilir [1,16].

3.7.2. Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB)

Ergime çizgisinin esas metal tarafında, kaynak sırasında uygulanmış olan ısının oluşturduğu çeşitli ısıl çevrimlerden etkilenmiş ve dolayısıyla iç yapı değişimine uğrayan bir bölge vardır, bu bölgeye, ısının tesiri altında kalan bölge adı verilir [1]. Isının tesiri altında kalan bölge kaynak metali ile esas metalin birleştiği sınırdan başlayarak, kaynak işlemi anında sıcaklığın iç yapıyı, dolayısıyla metalin özelliklerini etkilediği bölgedir [1,17].

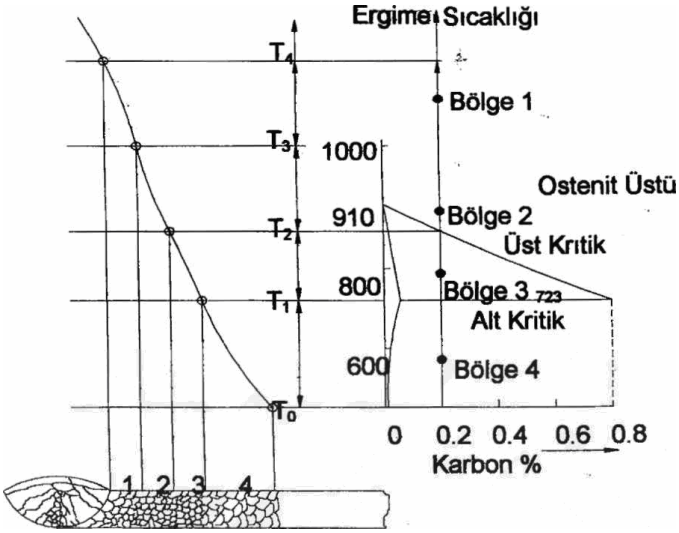
Çeliklerin kaynağında bu bölgede sıcaklık 1450 °C ile 700 °C arasında değişmektedir. ITAB' ın genişliği, kaynak yöntemi, ısı girişi, kalınlık, esas metalin ısı iletim katsayısı, bu bölgede ulaşılan maksimum sıcaklık derecesine ve esas metalin sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bu bölgede erişilen maksimum sıcaklık derecesi, kaynak dikişi eksenine olan mesafenin ve sıcaklık değişimi de zamanın fonksiyonu olarak bilinirse; kaynak işlemi sonunda oluşabilecek mikro yapı, esas metalin özellikleri ve bileşimi dikkate alınarak bir dereceye kadar önceden tahmin edilebilir. Kaynak anında ısının etkisi altında kalan bölge hızlı bir şekilde ısınmakta ve sonra da parça kalınlığı, kaynağa uygulanan enerji ve ön tav sıcaklığının fonksiyonu olarak yine hızlı bir şekilde soğumaktadır. Çeliğin bileşimine göre bu soğuma hızı, kritik soğuma hızının geçtiğinde, genellikle 900°C' nin üstündeki bir sıcaklığa kadar ısınmış bölgelerde sert dolayısıyla kırılgan bir yapı elde edilir [15,16].

ITAB, kaynak bağlantısının en kritik bölgesidir ve bir çok çatlama ve kırılmalar bu bölgede oluşur. Çeliklerin hemen hepsinin ısının tesiri altında kalan bölgede, çeşitli derecelerde sertleşme ve dolayısı ile de bir süneklik azalması ve mukavemet artması görülür. Çeliklerin kaynağında ısının etkisi altında kalan bölge, iç yapıdaki tane büyüklüğü bakımından şu değişik bölgeleri gösterir [1,16]. İri taneli bölge (Bölge 1), ince taneli bölge (Bölge 2), kısmen dönüşmeye uğramış bölge (Bölge 3) ve iç yapı değişikliğine uğramamış (esas metal) bölge (Bölge 4).

3.7.2.1. İri taneli bölge

Ergime bölgesine bitişik olan ve kaynak anında 1450-1150 °C sıcaklıklardaki bölgedir (Şekil 3.9.T_3-T_4). Metaller yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında tane büyümesi meydana gelir. Bu bölge tamamen iri tanelidir ve tane büyümesi hızı sıcaklık arttıkça artar ve metalin katılaşma sınırına yaklaşıldığında büyüme çok hızlanır. İri taneli yapılar, ince taneli yapılara oranla daha gevrek ve kırılgan olduklarından oluşmaları istenmez. Çeliklerde kaynak anında ergime çizgisine bitişik olan esas metal, katılaşmaya yakın bir sıcaklığa eriştiğinden ostenit içinde fazla miktarda tane büyümesine rastlanır. Bir çeliğin kaynak edilebilirliği açısından tane büyümesi çok önemlidir, çünkü soğuma olayı sürecinde oluşan dönüşümlere ostenit tane büyüklüğünün etkisi oldukça şiddetlidir [16].

Ostenit tane büyümesi için gerekli olan tane sınırı ilerlemesi tane sınırlarına çökelmiş bulunan Alüminyum, Vanadyum, Titanyum ve Niobyum nitrür ve Karbonitrürleri tarafından engellenir. Bu durum özellikle modern çelik yapımında, üretim sırasında tane büyümesine engel olmak için geniş çapta kullanılır; nitrür ve Karbonitrürler 900 °C nin üzerinde tane içinde çözelti haline gelmeye başlarlar; 1150 °C civarında tümü çözelti haline geçtiğinden, artık bunların da tane büyüme olayına engel olma ihtimalleri ortadan kalkar
[16].



Şekil 3.9. Kaynak dikişi çevresinde sıcaklık dağılımı ve tanesel yapıdaki değişiklikler [1].

Kaynak dikişi ve çevresinde en fazla martenzit oluşumu iri taneli bölgededir. Dolayısıyla iri taneli bölgede sertlik doruğa ulaşır çünkü, bu bölgede dönüşüm meydana gelmektedir, iri taneli bölgede yapı hem kaba taneli hem de serttir. Kaynak dikişinin en zayıf yeri, normal olarak burasıdır. Gerek çatlama ve gerekse korozyonla yıpranma en fazla burada yer alır [17].

3.7.2.2. İnce taneli bölge

Kaynak sırasında 900-1150 °C arasında bir sıcaklığın etkisinde kalan bölgedir (Şekil 3.9. T_3-T_2). Bu bölgede de ostenit oluştuğundan, soğuma anında, soğuma hızı ve çeliğin bileşimine bağlı olarak aynen iri taneli bölgede görülen iç yapıya benzer bir iç yapı görülür. Gerek sıcaklığın nispeten düşük kalması ve gerekse bu sıcaklıkta kalış süresinin kısalığı ince taneli bir yapıyı ortaya koymuştur. Bu bölgede taneler malzemenin orijinal tanelerinden de küçük ve martenzit oluşumu da azdır. Dolayısıyla sertleşme fazla değildir[16].

3.7.2.3. Kısmen dönüşmeye uğramış bölge

İnce taneli bölgenin devamı olan bu bölge, kaynak işlemi sırasında A3 ile A1 arası (Şekil 3.9. T_1 - T_2) olup, bölgesel bir ostenitleşmeye uğramıştır. Ostenit dönüşüme uğradığından yapısındaki ostenit miktarına bağlı olarak, ilk iki bölgeyi andıran bir iç yapı gösterir[16].

3.7.2.4. İç yapı değişikliğine uğramamış bölge (esas metal)

Bu bölge sıcaklık bakımından Aı'in altında kalmış olan kısımdır (Şekil 3.9. T_0-T1). Bu bölgeye temperleme bölgesi de denir. Isınma dolayısıyla soğuma sırasında çelik de bir dönüşüm meydana gelmemiş sadece bazı iç yapılarda hafif bir temperleme etkisi gözlenmiştir [15,16].

3.7.3. Karbon Eşdeğerinin İncelenmesi

Çeliğin bileşimindeki alaşım elementlerinin oluşturduğu sertliğe eş sertliği veren karbon miktarına "Karbon eşdeğeri" adı verilir[1,16].

Alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerin kaynakla ilgili sorunu, kaynak dikişi bölgesinde oluşabilen martenzit ve onunda getirdiği mikro çatlaklardır. Çeliğin kaynağa uygunluğunu belirlemede zaman-sıcaklık dönüşüm diyagramları, çeliğin 800 °C den 500 °C' ye kadar geçen soğuma süresi ve karbon eşdeğerliliği değerleri önemli göstergelerdir. Uygulanabilirlik açısından, karbon eşdeğerliliğinin dikkate alınması, çeliğin kimyasal bileşiminin bilinmesi kaydıyla, en kolay ve en etkili yoldur [18]. Karbon eşdeğeri tamamen çeliğin bileşimi ile ilgili olup, kaynağa uygulanan enerji, kaynak ağzı formu, parçanın geometrisi ve kalınlığı ile ilgili faktörleri içermemektedir. Bunlar soğuma hızını birinci derecede etkileyen ve dolayısı ile de ısının tesiri altında kalan bölgede oluşan mikro yapıyı etkileyen faktörlerdir [16].

Karbon eşdeğerinin hesaplanması konusunda, literatürde çok değişik formüllere rastlanılmaktadır. Bunlar yalnız bilimsel açıdan düşünüldüğünde, ne çelikleri sınıflandırmak için kriter olabilmekte ve ne de kaynak kabiliyetinin bir ölçüsü olarak kullanılabilmektedirler; bunlar ancak, uygulamada kullanılabilen ve yeterli sonuçlar veren amprik bağıntılardır [1,16].

Karbon eş değeri; sertleşebilirliği gösterir. Ayrıca, kaynak işlemi yapılacak ise alınması gereken önlemleri ve kaynak prosedürü hakkında bize ön bilgi verir. Karbon eş değeri Tablo 3.2'den görüleceği üzere %0,45'ten küçük ise kaynak kabiliyeti mükemmel ön tavlamaya gerek yoktur. %0,45 ile 0,60 arasında ise kaynak kabiliyeti orta 100-200°C'de ön tav yapılmalıdır. %0,60'dan büyük ise kaynak kabiliyeti düşük 200-350°C'de ön tav yapılmalıdır.

$$C_{eş} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$$

kısaca,

$$C_{eş} = C + Mn/6 \quad [19].$$

3.7.4. Ön ısıtma sıcaklığı

Karbon eşdeğeri büyüdükçe kaynaktan sonra soğumanın yavaşlatılması gerekmektedir. Bunun içinde tek çözüm parçaya kaynaktan önce bir tavlama uygulayarak soğuma hızını yavaşlatmaktır [1,16]. Tablo 3.2'te karbon eş değerine bağlı olarak istenilen tavlama sıcaklıkları verilmektedir.

Tablo 3.2. Karbon eşdeğerine göre ön tav sıcaklığının belirlenmesi [15,16].

Karbon Eşdeğeri %	Ön tavlama Sıcaklığı °C
0.45 ten küçük	Normal atmosfer şartlarında
0.45 ile 0.60	100 ile 200 °C arasında
0.60 tan büyük	200 ile 350 °C arasında

Milletlerarası Kaynak Enstitüsünün Kaynak Kabiliyeti Komisyonu, çatlamaya karşı bir emniyet olarak ısının tesiri altında kalan bölgede sertliğin 350 Vickers'i (kg/mm^2) geçmemesini önemle tavsiye etmektedir. Isının tesiri altında kalan bölgenin sertliğini düşürmek için uygulanan en emin yol parçayı kaynaktan önce tavlamak ve bu sıcaklık derecesinde kaynağı yapmaktır.

3.8. Isı Girdisinin Tanımlanması

Ark kaynakta, enerji kaynak elektrotundan kaynak yapılacak malzemeye elektrik akımı ile iletilir. Kaynakçı kaynağı başlattığında hem malzeme hem de malzemeyi dolduracak olan kaynak metali, kaynağı oluşturmak için erir. Elektroda güç ve enerji verildiği için bu erime gerçekleşir[20].

Isı girdisi birim uzunluğa aktarılan enerjinin bağıl ölçümüdür. Isı girdisi malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini ön ısıtma sıcaklığı, geçiş sıcaklığı ve

soğutma hızı gibi etkilediği için önemli bir özelliktir. Isı girdisi gücün arkın hızına oranı ile hesaplanır.

$$H = \frac{60\ EI}{1000\ S}$$

H: ısı girdisi (kj/inç veya kj/mm).
E:ark voltajı (volt).
I:akım (amper).
S:hız (inç/dakika veya mm/dakika).

Bu bağıntı farklı iki kaynak prosedürünün karşılaştırılması için çok önemlidir. Isı transfer verimi gibi bilgiler elinizde yoksa iki faklı kaynak türünü (örneğin elektrot kaynakla gaz altı kaynağı) karşılaştırmak uygun değildir [20]. Isı girdisi direkt hesaplanamaz. Voltaj, akım ve hızla hesaplanır.

Ark voltajı: Voltaj hesaplamasında, voltaj arka mümkün olduğunca yakın yerden ölçülmelidir ve voltaj değeri kaynak makinesini göstergesinde gösterilir. Voltaj hesaplama voltajın gerçek değerini düşürür. Kaynak makinesin göstergesi voltajın gerçek değerinden hep daha fazla okur. Bunun nedeni kaynak kablolarının direncidir. Makinenin gösterdiği voltaj ortalama ısı girdisi hesaplarında kullanılır, gerçek ısı girdisi hesaplamalarında hataya neden olur.

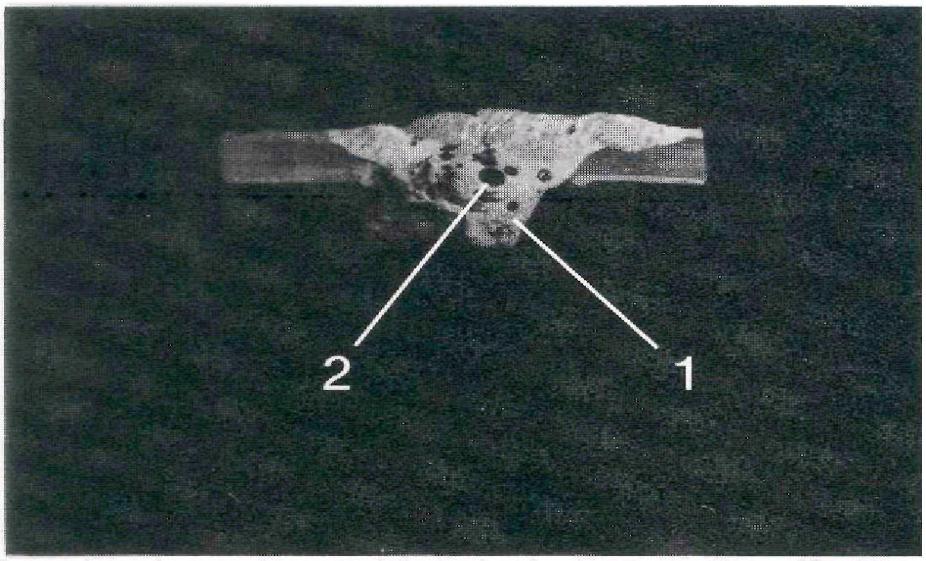
Akım: Kaynak akımı iletken bir metre veya şönt ile ölçülür. Akım asla zamana göre ayarlanmaz. Elektrot kaynakta, akım ark dalgasının bir fonksiyonudur. Isı girdisi hesabında ortalama akım değeri alınır.

Hız: Arkın birim dakikada kaç mm veya inç ilerlediğidir. Sadece arkın ilerlemesindeki hız kullanılır hesaplamalarda. Dokuma tekniğin de sadece ilerleme hesaplanır, titreşim hızı hesaplanmaz. Dikey kaynakta aşağı ve yukarı doğru olan hızlar kullanılır. Hız dakika olarak hesap
lanmalıdır, saniye olarak değil [20].

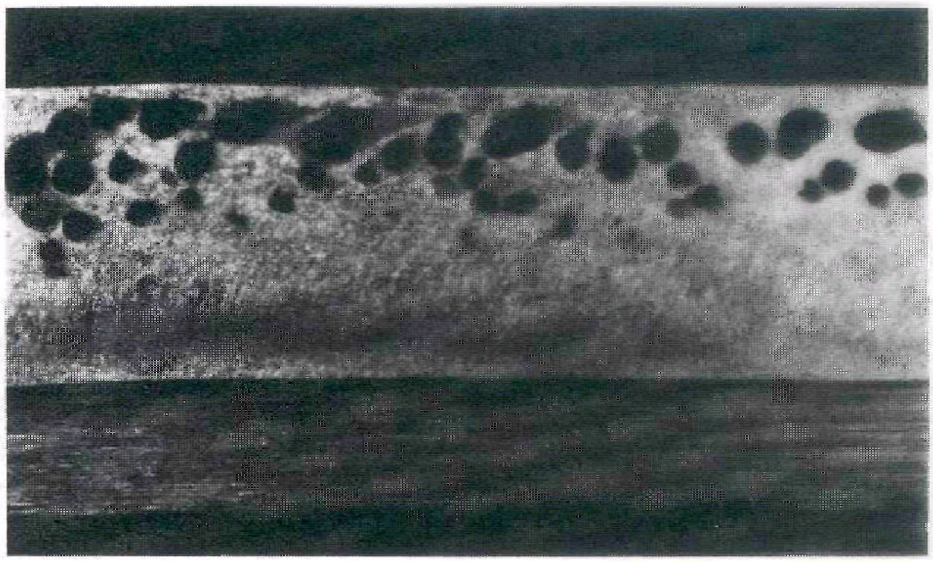
3.9. Kaynak Hataları

Ark kaynağın hataları, gözeneklilik, kırılmalar ve cüruf en fazla görülen kaynak hatalarıdır. Mesele, işlemleri göz önünde bulundurarak bunların ne kadar önemli olduğuna karar vermektir. Genelde kodlar ve prosedürlerde bu kaynak hatalarının izin verilen maksimum değerleri belirtilir. Bazen mekanik özellikleri değiştirmeyen kusurlar, paslanmayı engelleyebilir. ITAB bölgesinin özellikleri, kaynağın sağlamlığının hesaplanmasında başlıca faktörlerden biridir. HAZ bölgesi bir hata olarak görülebilir. Çünkü ısıdan dolayı metalürjik değişimler olur. Tanecik büyüklüğü, faz değişimleri, çökeltiler; ITAB bölgesinin özellikleri üzerinde çok önemli etkileri vardır [21]

Gözenek: Temel sebebi ana malzeme üzerindeki kir, yağ, pas, nem vb. temizlenmeden kaynağa başlanılmasıdır. Yetersiz gaz koruması veya aşırı gaz korumasından dolayı oluşan türbülans da gözenek oluşmasının diğer nedenleri arasındadır[22].



Şekil. 3.10. Kaynak hataları (1) Aşırı nüfuziyet, (2)Cüruf sıkışması.

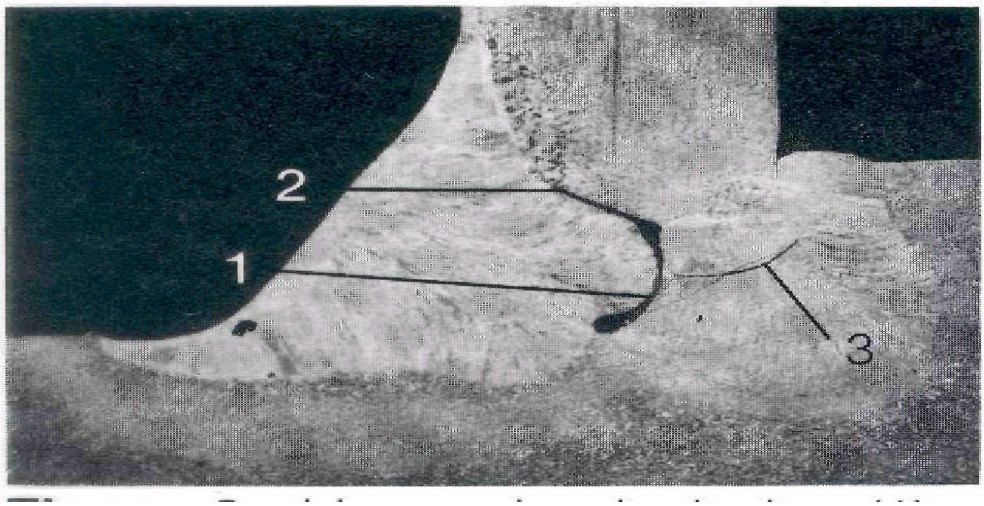


Şekil 3.11. Kaynak hatalarından gaz delikleri

Cüruf Sıkışması: Metalik olmayan katı materiallerin (elektrot ortüsü, veya tozaltı tozu, gazaltı tel cürufu vb.) kaynak metali içerisinde veya kaynak ile ana malzeme arasında sıkışmasıdır. Pasolar arası temizliğe dikkat ederek ve doğru elektrot manipulasyonu ile engellenir[22].Oksitler veya diğer metal olmayan kalıntılar metalde kalır. Kirden ve yeteri düzeyde olmayan geçişlerin temizliği nedeniyle ortaya çıkar. Kaynak süresinde akıdan türeyen cüruflar bi tel fırça veya taşlama çekici ile giderilmelidir [21].

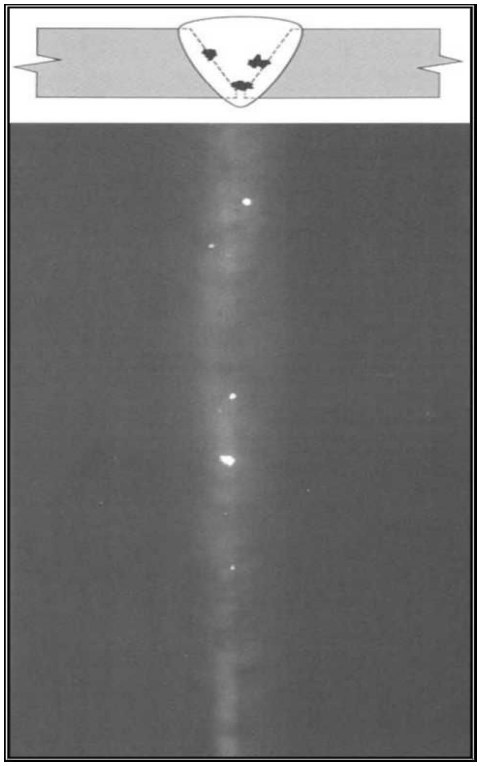
Çatlak : Kaynak çatlakları bazı lokal gerilimlerin belli noktalarda kaynak metalin dayanım mukavemetinden yüksek olması nedeniyle oluşur.Doğru kaynak dolgu metali seçimi ile ve kontrollü soğutma, kaynaktan önce malzemeye ön ısıtma uygulanarak önlenebilir[22].

Yetersiz nüfuziyet: Dolgu metali ile malzeme kökünün tam olarak doldurulamamasını tanımlar. Kaynak ağzı hazırlığının düzgün yapılmamasından ve parametrelerin uygun seçilmemesinden kaynaklanır.



Şekil 3.12 Kaynak hataları (1) Cüruf sıkışması, (2)Yetersiz nufüziyet, (3) Kaynak çatlağı [22].

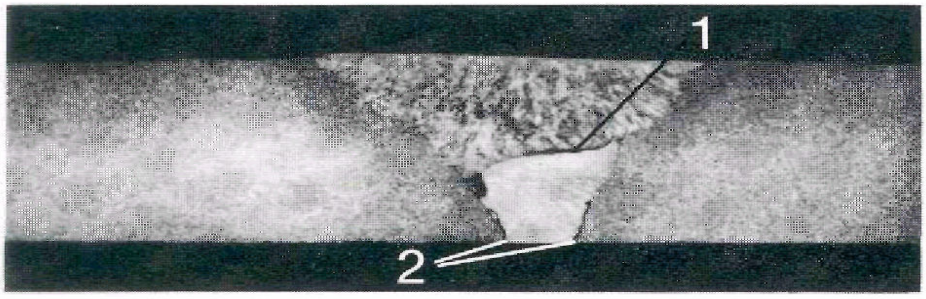
Tungsten kalıntısı: TIG kaynak işlemlerinde, elektrotun metale değmesi nedeniyle tungsten parçaları metale girebilir. Bu kalıntılar x ışınları ile araştırılır. Çelikten daha yoğun oldukları için parlak parçacık olarak gözükürler[21].



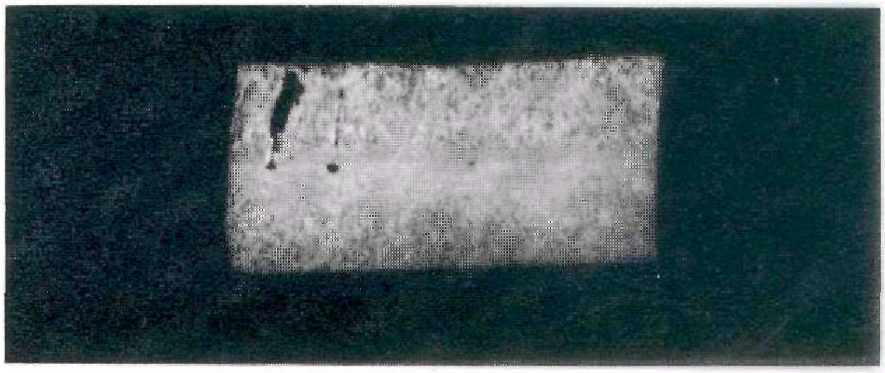
Şekil 3.13. TIG kaynağı X-Ray filmi Tugsten kalıntısı[21].

Yapışmama: Kaynak pasolarının birbirleri içerisinde veya kaynak metali ile ana malzemenin birbirine yapışmaması olarak tanımlanır. Elektrodun yanlış pozisyonlanmasından, gerektiği şartlarda ön ısıtma yapılmamasından ve yanlış kaynak parametre kullanımından kaynaklanır.

Yanma olukları: Ana malzeme yan duvarlarının aşırı erimesi nedeniyle oluşan kesin geçişlerdir. Yüksek kaynak amperi kullanılmasından ve pasolar arası sıcaklığa dikkat edilmediği için oluşur [22].

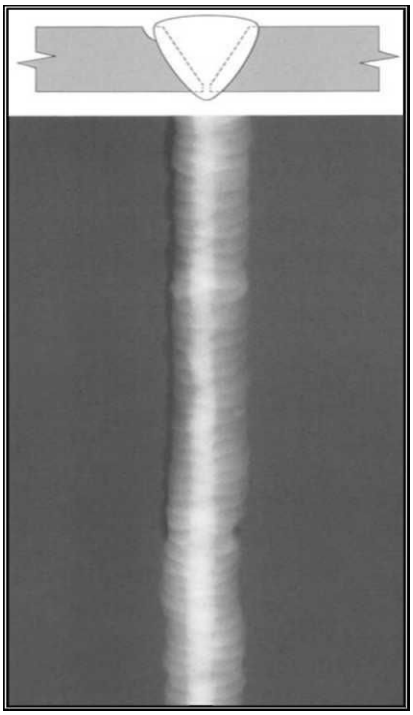


Şekil 3.14. Kaynak hatalarına örnekler (1)pasolar arası yapışmama.(2) kaynak ile malzeme yapışmama [22].



Şekil 3.15. Kurt deliği

Zayıf birleşme: Bu durum açılan kaynak ağzının yeteri kadar doldurulmaması ile oluşur [21].



Şekil 3.16. Kaynakta zayıf birleşme.

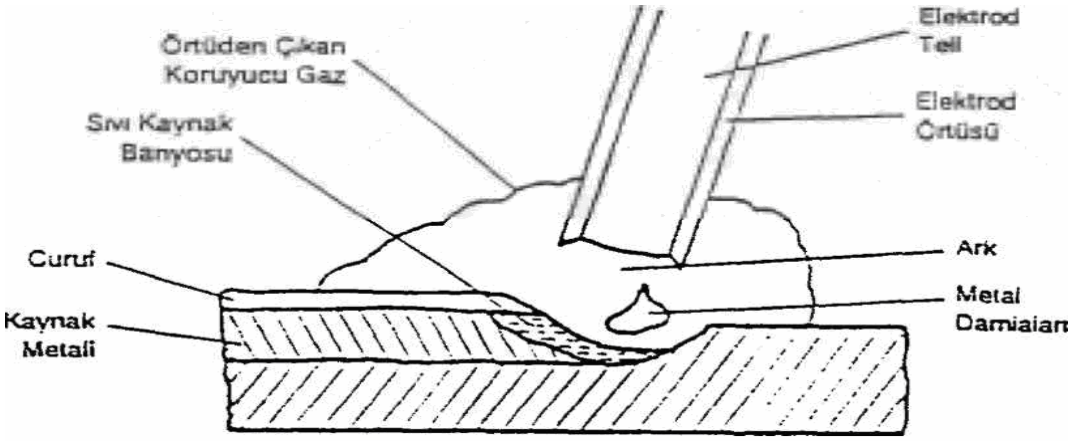
3.10. Elektrod Ark Kaynağı

Elektrik ark kaynağında birleşmeyi sağlayan ısı ark tarafından sağlanmaktadır. Elektrik ark kaynağının, birleştirmede kullanılan ek kaynak metalinin katılma biçimi ve kaynak bölgesinin havanın olumsuz etkilerinden korunma biçimine göre çeşitli yöntemleri geliştirilmiştir.

Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağında ark, iş parçası ile elektrod arasında oluşur ve meydana gelen ısıdan dolayı eriyen elektrod, aynı zamanda kaynak metali olarak birleşmeyi sağlar. Elektrod örtüsüde yanarak erir ve yanma esnasında açığa çıkan gaz kaynak banyosunu havanın olumsuz etkisinden korur. Yanma sırasında oluşan cürufsa kaynak dikişini örterek kaynak bölgesinin kontrollü bir şekilde soğumasını sağlar (Şekil 3.17). Ayrıca elektrod örtüsüne katılan alaşım elementleri sayesinde kaynak dikişi alaşımlandırılarak istenen özelliklerde kaynak bağlantısı elde edilmektedir [1].

Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağında ark enerjisinin % 85'i ısı. % 15'i de

ışık enerjisine dönüşmektedir. Burada meydana gelen ışınlardan dolayı gözlerde ve ciltte yanmalar olmaktadır. Bu gibi durumların önüne geçmek için kaynak işlemi sırasında koruyucu maskeler kullanılmaktadır [23].



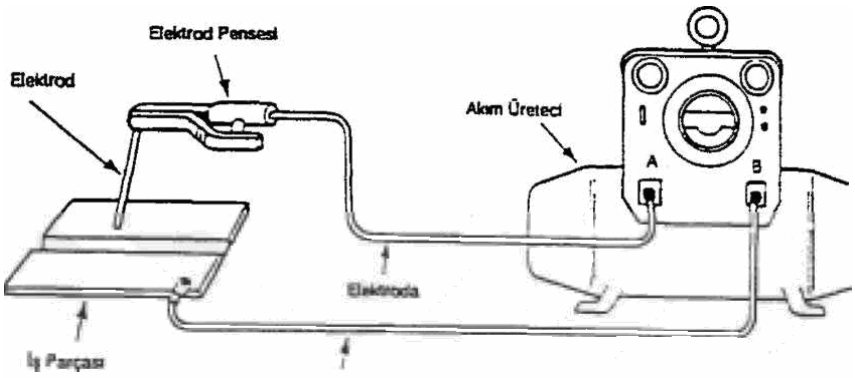
Şekil 3.17. Örtülü elektrod ile ark kaynağında kaynak bölgesi.

Bu yöntemde kaynak için gerekli elektrik akımı bir kaynak akım üreteci tarafından sağlanmaktadır. Akım üreteçlerinin görevi kaynak arkını sürekli oluşturacak gerilim ve şiddette kaynak akımını sağlamaktır (Şekil 3.18) [3].

Elektrik ark kaynağı hem doğru akımda hem de alternatif akımda yapılabildiğinden kaynak makineleri de iki gruba ayrılır. Bunlar; doğru akım kaynak makineleri kaynak jeneratörleri ve redresörleridir. Alternatif akım kaynak makineleri: Kaynak transformatörleridir.

Kaynak makineleri tarafından üretilen akım kablolar yardımı ile iş parçası ve elektrod pensesine iletilir. Elektrik ark kaynağında kullanılan elektrodlar. kaynağın amacına göre birleştirme ve dolgu kaynağı elektrodları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Kullanılan elektrodların oluşturduğu kaynak metalinin mekanik özelliklerinin iyi olması istenir [1,10].

Kaynak dikişinin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak için malzemeye uygun elektrod seçiminin yapılması gerekir. Bunun için esas metalin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.18. Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynak donanımı blok şeması.

Örtülü elektrod ile ark kaynağında, alın, iç köşe, dış köşe, ve bindirme birleştirmeleri yapılmaktadır. Kaynakla birleştirilecek parçalara, kaynak bağlantısının kesit boyunca işleyebilmesi için kalın parçalara kaynak ağzı açılması gereklidir [24]. Örtülü elektrod ile ark kaynağında, yatay, düşey, korniş ve tavan pozisyonları da birleştirmeler yapılabilmektedir. Örtülü elektrod ile ark kaynağında iç parçasına uygun bir kaynak ağzı açılır, uygun bir elektrod seçimi yapılır ve elektrod çapına uygun olarak kaynak akım şiddeti ayarlandıktan soma kaynak işlemine başlanır. Ark oluşturulduktan sonra ark boyunun iyi bir şekilde ayarlanması gerekir. Aksi taktirde kaynak banyosu havanın olumsuz etkilerine maruz kalır [1.24]. Bu yöntemde arkın başlatılması, yanması, boyunun ayarı, söndürülmesi, kaynak hızı ve eriyen elektrod metalinin kaynak ağzını doldurması için gerekli ayarlar tamamen kaynakçı tarafından yapılır.

3.10.1. Örtülü Elektrodlar

Örtülü elektrod, çekirdek ve örtü olmak üzere iki kısımdan oluşur. Çekirdek, kaynak metalinin oluşmasını ve akımın geçişini sağlar. Örtü ise, kaynak metalini havanın olumsuz etkilerinden koruyarak alaşım elementleri sayesinde kaynak

dikişini alaşımlandırır ve kaynak dikişinin geç soğumasını ve düzenli görünümünü sağlar [25].

Ergitmen" kaynak yöntemlerinde elektrik arkı ergime için gerekli ısıyı temin ederken dekapan da koruma, temizleme ve çoğu zaman da bunlarla beraber metalurjik kontrol işlevini yerine getirir.

Örtülü elektrodlan, örtü kalınlıklarına göre üç ana kısımda toplamak mümkündür [1].

a) İnce örtülü elektrotlar (Elektrod dış çapı, elektrod çubuğu çapının % 120'sine kadar olan elektroddur.)
b) Orta örtülü elektrodlar (Elektrod dış çapı, elektrod çubuğu çapının % 120'sinden %155'ine kadar olan elektroddur.)
c) Kalın örtülü elektrodlar (Elektrod dış çapı, elektrod çubuğu çapının %155'inden büyük olan elektroddur.)

3.10.2. Örtü maddesi

Örtülü elektrotların kaynak özellikleri hemen hemen örtünün birleşimine bağlıdır. Kaynak metali, kaynak dikişinin nufuziyeti ve belirli bir sınıra kadar dikişin bileşimi, örtü maddesi ile kontrol altına alınabilir. Kaynak dikişinin aldığı formun dış bükey veya iç bükey oluşu, yüzeyin düzgünlüğü gibi bazı özelliklerin de örtü maddesinin çeşidi ve miktarı ile ilgili olduğu bilinmektedir. Kaynak elektrodlarının üretiminde en fazla kullanılan elektrod örtü maddeleri şu şekilde sıralanabilir [1].

a) Cüruf oluşturan maddeler
b) Arkı stabilize eden maddeler
c) Gaz atmosferi oluşturan maddeler
d) Ekstrüzyon işlemini kolaylaştıran maddeler
e) Bağlayıcı maddeler
f) Örtüye dayanım kazandıran maddeler
g) Deoksidasyon ve alaşımlama yapan maddeler

Elektrod örmelerinin sağladığı faydalar [25].

a) Arkın tutuşmasını ve oluşmasını kolaylaştırır. Bu sayede doğru akım ve alternatif akımda kaynak yapabilme imkanı doğar.

b) Ergiyik haldeki metal damlalarının yüzey gerilimlerine etki ederek tavan ve dikine kaynak işlemlerinin yapılmasına imkan sağlar.

c) Koruyucu bir gaz atmosferi sağlayarak kaynak dikişini atmosferin olumsuz etkilerinden korur.

d) Kaynaktan sonra dikişin üzerini kaplayarak yavaş soğumasını sağlar.

e) Gerektiği hallerde dikişi alaşımlandınr.

f) Erime hızım yükseltip kaynak dikişim deokside eder.

3.10.3. Örtü çeşitleri

Örtülü elektrodlarda kullanılan örtü maddeleri belirli oranlarda harmanlanarak ekstrüzyon veya başka bir yöntemle elektrod çekirdeği üzerine kaplanır. Her tür elektrod örtüsü için özellikle ana bileşenlerin bazı oranlar dahilinde kalmaları gerekir. Bu, elektrodun ana özelliğini belirler. Aksi takdirde elektrod örtüsü kendinden beklenen özellikleri sağlayamayacaktır. Bu da kaynak dikişinin metalurjik ve mekaniksel özellikleri açısından istenen özellikleri vermeyecektir. Örtülü elektrodlar, örtülerinde bulunan ana bileşenlerin türüne, asitlik ve bazlık durumuna göre çeşitli gruplara ayrılmaktadırlar [1,26]. Bunlar;

a) Rutil elektrodlar
b) Asit elektrodlar
c) Oksit elektrodlar
d) Bazik elektrodlar
e) Selülozik elektrodlar
f) Özel elektrodlar

3.10.4. Kaynak makinaları

Kaynak makinaları kullanıldıkları akım türüne göre doğru akım ve alternatif akım kaynak makinaları olarak iki gruba ayrılır. Doğru akım kaynak makineleri; kaynak jeneratörleri ve kaynak redresörleri bu gruba girmektedir. Kaynak jeneratörleri, elektrik motoru ve kaynak dinamosundan meydana gelir. Bu makinalar mekanik enerjiyi kaynak için gerekli olan enerjiye çevirerek kaynak akımım çalışma yerine iletir. Kaynak jeneratörlerinde akım üreteci olan dinamo tahrik edildiğinde, motoru manyetik bir alan içinde dönmeye başlar, böylece elektrik akımını üretmiş olur [1].

Kaynak redresörleri de jeneratörlere benzerler. Kaynak redresörleri bir tranformatör ve bir de redresörden meydana gelirler. Transformatör, şebekeden aldığı akımı kaynak için gerekli olan düşük gerilim, yüksek akım şiddetine çevirir. Redresör de alternatif akımı doğru akıma çevirir.

Alternatif akım veren kaynak makinaları olan transformatörler, gerilimi yüksek ve akım şiddeti düşük olan şebeke akımını, gerilimi düşük fakat akım şiddeti yüksek olan kaynak akımına çevirirler. Transformatörler, kaynak jeneratörleri gibi yeni bir akım üretmezler, sadece mevcut olan akımın gerilimim ve akım şiddetim değiştirirler. Transformatörlerde dönen bir parça olmadığı için aşınma gibi sorunlar söz konusu değildir [1].

3.11. Gazaltı Kaynağı

Gazaltı kaynak yöntemi, genel olarak kaynak yeri bir gazla korunan özel bir ark kaynağı yöntemidir. Koruyucu bir gazın kullanılması fikri oldukça eskidir. İlk defa 1926 yılında ortaya atılan Alexander usulünde, dikiş metanol gazı ile korunmuş ve daha sonraları 1928'de de Arcogen usulü geliştirilmiştir. Arcogen usulünde hem bir elektrot hem de oksi-asetilen alevi birlikte kullanılmış, kaynak dikişinin havanın tesirinden korunması üfleç alevi ile sağlanmıştır.

Koruyucu gaz olarak soy bir gazın kullanılması, ancak 1930 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Henry M. Hobart ve Philip Dewers tarafından patent olarak

alınmış ve 1940 yılında da "Nontrop Aircraft Company Inc." firması uçak inşasında magnezyum ve alaşımlarının kaynağında kullanmıştır.

Soygazlardan başka kaynak yerinde aktif bir gazın kullanılması konusunda ilk çalışmalar 1952 yılında CO_2 gazının kullanımı ile başlamış; günümüzde çeşitli soy gaz ve aktif gazların kullanıldığı, donanım olarak aynı fakat gaz karışımı olarak farklı değişik gazaltı kaynak yöntemleri mevcuttur[27].

Kullanılan elektrot ve gazların cinslerine göre koruyucu gaz kaynak usullerini çeşitli sınıflara ayırmak mümkündür. Bugüne kadar pratikte kullanılan koruyucu gaz kaynak usullerini aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz: Ergimeyen elektrot ile yapılan gazaltı kaynak

yöntemleri;

1. Ergimeyen iki elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı (ark atom kaynağı),
2. Ergimeyen bir elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı (TIG ya da PA plazma ark).

Ergiyen elektrot ile yapılan gazaltı kaynağı;

1) Ergiyen elektrot ile soygazaltında yapılan gazaltı kaynağı (MIG),
2) Ergiyen elektrot ile aktif gazaltında yapılan gazaltı kaynağı (MAG).

Yapılan araştırmalar sonucu geliştirilmiş ve ilk kez 1948 yılında ABD'de alüminyum ve alaşımlarının, sonra da sırası ile yüksek alaşımlı çeliklerin, bakır ve alaşımlarının, karbonlu çeliklerin kaynağında uygulanmış olan MIG (Metal Inert Gas) kaynak yönteminde de ark, helyum ve argon gibi soy bir gazın koruması altında yanar; bu yöntemin TIG yönteminden farkı, arkın iş parçası ile kaynak metali gereksinimini de karşılayan sürekli beslenen ergiyen bir elektrot arasında oluşturulmasıdır [28].

3.11.1. Yöntemin Tanımı ve Çalışma Prensibi

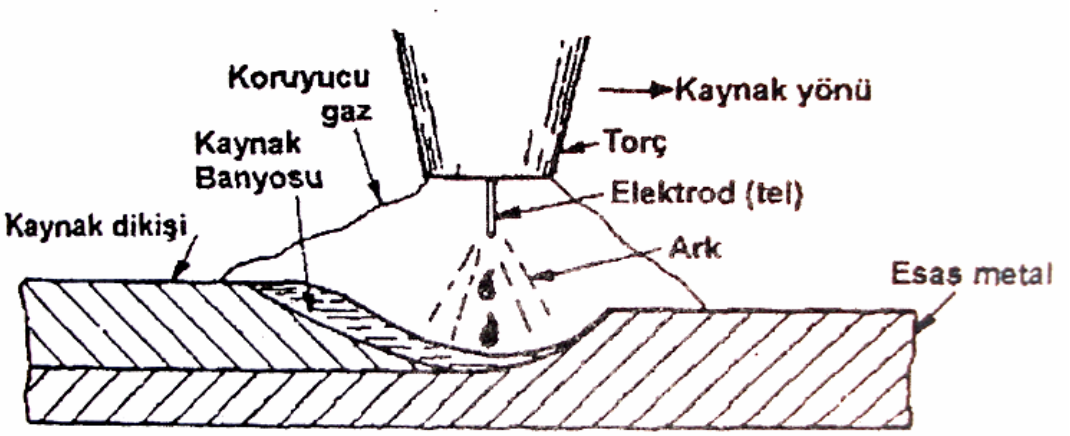
Bu yöntemde kaynak için gerekli ısı, sürekli beslenen ve eriyen bir tel elektrodla kaynak banyosu arasında oluşturulan ark yoluyla ve elektroddan geçen kaynak akımının elektrodda oluşturduğu direnç ısıtması yoluyla üretilir. Elektrod çıplak bir tel olup, bir elektrod besleme tertibatıyla kaynak bölgesine sabit bir hızla sevkedilir. Çıplak elektrod, kaynak banyosu, ark ve esas metalin kaynak bögesine komşu bölgeleri, atmosfer kirlenmesine karşı, dışarıdan sağlanan ve bölgeye bir gaz memesinden iletilen uygun bir gaz veya gaz karışımı tarafından korunur.

Bu yöntemle ilgili diğer bir gelişme de elektrodda meydana gelmiştir. Dolu tel yerine içi metal tozu ile doldurulmuş tüpten oluşturulmuş "özlü elektrodlar" geliştirilmiştir. Böylece, örtülü elektrodlardaki örtünün bazı görevlerini özün, çekirdek telinin görevini de özü saran çelik tüpün görmesi sağlanmıştır.

Gazaltı kaynağında, ark boyu kaynak makinası tarafından kontrol edilir. Kaynakçıdan beklenen, gaz memesini kaynak banyosu üzerinde sabit bir yükseklikte tutarak (genellikle 20 mm) belirli bir hızda hareket ettirmesidir. Ark boyunun kaynak makinası tarafından kontrol edilmesi nedeniyle bu yönteme "yarı otomatik" kaynak yöntemi adı verilmiştir. Otomatik kaynak yönteminde yukarıda açıklanana ek olarak gaz memesi de işparçası üzerinde belirli bir hızda otomatik olarak hareket eder. Bu durumda kaynakçının kaynak işlemine fiili bir katkısı yoktur.

Alaşımsız çelikler, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, aluminyum, bakır, titanyum ve nikel alaşımları gibi ticari açıdan önemli tüm metaller uygun koruyucu gaz, elektrod ve kaynak değişkenleri seçmek şartıyla, bu yöntemle kaynak edilebilirler.

Bu yöntemle dışarıdan sağlanan gazla korunan ve otomatik olarak sürekli beslenen ve eriyen elektrod kullanılır[28].

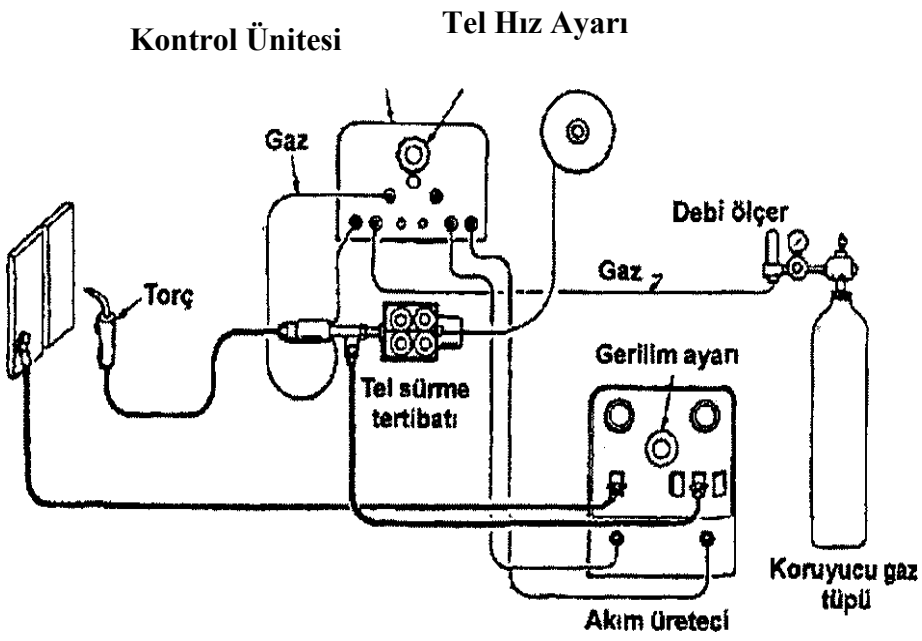


Şekil 3.19. FCAW Kaynak Yönteminde Ark Bölgesi [29].

Kaynakçı tarafından ilk ayarlar yapıldıktan sonra arkın elektriksel karakteristiğinin kendi kendine ayarını otomatik olarak kaynak makinası sağlar. Bu nedenle yarı otomatik kaynakta kaynakçının gerçekleştirdiği elle kontroller, kaynak hızı, doğrultusu ve torcun pozisyonundan ibarettir. Uygun donanım seçilip, uygun ayarlar yapıldığında ark boyu ve akım şiddeti (elektrod besleme hızı) kaynak makinası tarafından otomatik olarak sabit değerde tutulur.

Gazaltı kaynağı için gerekli donanım Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Kaynak donanımı 4 temel gruptan oluşmuştur: Kaynak torcu ve kablo grubu, elektrod besleme ünitesi, güç ünitesi ve koruyucu gaz ünitesidir.

Torc ve kablo grubu üç görevi yerine getirir. Koruyucu gazı ark bölgesine taşır, elektrodu temas tüpüne iletir ve güç ünitesinden gelen akım kablosunu temas tüpüne iletir. Kaynak torcunun tetiğine basıldığı zaman, işparçasına aynı anda gaz, güç ve elektrod iletilir ve bir ark oluşur. Ark boyunun kendi kendisini ayarlamasını sağlamak için tel besleme ünitesi ile güç ünitesi arasında ilişki sağlayan iki türlü çözüm mevcuttur. Bunlardan en fazla bilinenin de sabit gerilimli bir güç ünitesi ile sabit hızlı elektrod besleme ünitesi kullanmaktır. İkinci çözüm ise azalan bir gerilim-akım karakteristiği sağlar ve elektrod besleme ünitesinin besleme hızı ark gerilimi yoluyla kontrol edilir.



Şekil 3.20. Gazaltı Kaynak Donanımı [29]

Sabit gerilim/sabit besleme hızı çözümünde torcun pozisyonundaki değişme kaynak akımında değişmeye neden olur. Kaynak akımındaki değişme ise derhal serbest elektrod uzunluğunu değiştirerek (elektrod erime hızı değiştiğinden) ark boyunun sabit kalmasını sağlar. Torcu iş parçasından uzaklaştırma nedeniyle serbest elektrod uzunluğunda meydana gelen artma kaynak akımında azalmaya neden olarak elektrodda direnç ısıtmasının da aynı değerde kalmasını sağlar. Diğer çözümde ise, ark geriliminde meydana gelen değişmeler elektrod besleme sisteminin kontrol devrelerini yeniden ayarlar ve bu sayede elektrod besleme hızı uygun bir şekilde değiştirilir[28].

FCAW kaynağında ark, aynı zamanda ilave tel görevi yapan eriyen bir elektrot ile iş parçası arasında yanar. "Uçsuz" elektrot bir tel ilerletme mekanizması yardımıyla bir tel makarasından akım kontak borusuna gelir. Serbest tel ucu nispeten kısadır; böylece ince elektrota yüksek akım şiddeti (> 100 A/mm^2) uygulanabilir. Kaynak makinasınm kutuplarından biri elektrota diğeri de parçaya bağlanır. Böylece ark, eriyen elektrot ile parça arasında yanar. Elektrot aynı anda hem enerji taşıyıcı hem de kaynak ilave metali görevi yapar. Koruyucu gaz elektrotun eşeksenli olarak

bulunduğu bir memeden akar ve arkı, eriyen damlaları ve arkın altındaki erimiş banyoyu atmosferi etkisinden korur [30].

3.11.2. Gazaltı Kaynağının Avantajları

Yöntemin yaygın olarak kullanılma nedeni, doğal olarak sağladığı üstünlüklerden kaynaklanmaktadır. Bu üstünlükler aşağıda sıralanmıştır:

● Ticari metal ve alaşımların tümünün kaynağında kullanılabilen yegane eriyen elektrodla kaynak yöntemidir.
● Elektrik ark kaynağında karşılaşılan sınırlı uzunlukta elektrod kullanma problemini ortadan kaldırmıştır.
● Kaynak her pozisyonda yapılabilir. Bu tozaltı kaynağında mümkün değildir.
● Metal yığma hızı elektrik ark kaynağına nazaran oldukça yüksektir.
● Sürekli elektrod beslenmesi ve yüksek metal yığma hızı nedeniyle, kaynak hızları elektrik ark kaynağına nazaran yüksektir.
● Elektrod beslenmesinin sürekli olması nedeniyle hiç durmadan uzun kaynak dikişleri çekilebilir.
● "Sprey iletim" kullanıldığında, elektrik ark kaynağına nazaran daha derin nüfuziyet elde edilir. Böylece içköşe kaynaklarında aynı mukavemeti sağlayan daha küçük kaynak dikişi çekmek mümkün olur.
● Yoğun bir cürufun mevcut olmayışı nedeniyle pasolar arası temizlik için sarfedilen zaman çok azdır.

Bu üstünlükleri yöntemi yüksek üretime ve otomatik kaynak uygulamalarına özellikle uygun hale getirilmiştir. [28].

3.11.3. Gazaltı Kaynağının Dezavantajları

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi gazaltı kaynağının kullanılmasını zorlaştıran bazı sınırlamalar da mevcuttur. Bu sınırlamalar aşağıda sıralanmıştır :

● Kaynak donanımı, elektrik ark kaynağına nazaran, daha karmaşık, daha pahalı ve bir yerden başka bir yere taşınması daha zordur.

● Kaynak torcunun elektrik ark kaynağı pensesinden daha büyük olması nedeniyle ve kaynak metalinin koruyucu gazla etkin bir şekilde korunması amacıyla torcun bağlantıya 10 ila 19 mm. arasında değişen yakın bir mesafeden tutulması gerektiği için, bu yöntemin ulaşılması güç olan yerlerde kullanılması pek mümkün değildir.
● Kaynak arkı koruyucu gazı bulunduğu yerden uzaklaştıran hava akımlarından korunmalıdır.
● Bu nedenle, kaynak alanının etrafı hava akımına karşı muhafaza altına alınmadıkça, yöntemin açık alanlarda kullanılması mümkün değildir.

Göreceli olarak yüksek şiddete ısı yayılması ve ark yoğunluğu nedeniyle, kaynakçılar bu yöntemi kullanmaktan kaçınmaktadır. [28].

3.11.4 Gazaltı Kaynağı Sırasında Tüketilen Malzemeler

Aşınan ve değiştirilmesi gereken eletrod klavuz hortumunun gömleği ve temas tüpü gibi kaynak makinası elemanlarına ek olarak işlem sırasında tüketilen maddeler koruyucu gaz ve elektroddur. Elektrodun, esas metalin ve koruyucu gazın bileşimleri kaynak metalinin kimyasal bileşimini belirler. Kaynak metalinin bileşimi ise, kaynak bağlantısının kimyasal ve mekanik özelliklerini büyük ölçüde belirler. Kaynak elektrodunun ve koruyucu gazın seçimi sırasında aşağıdaki faktörleri göz önünde bulundurmak gerekir:

a) Esas metal
b) Kaynak metalinden beklenen mekanik özellikler
c) Esas metalin hangi şartlarda olduğu ve temizliği
d) Kaynaklı bağlantının çalışma şekli veya varsa şartname talepleri
e) Kaynak pozisyonu
f) Arzu edilen metal iletim tipi

3.11.4.1. Elektrodlar

Birleştirme işlerinde elektrodun bileşimi esas metalin bileşimine benzerdir. Kaynak arkında oluşan kayıpları karşılamak veya kaynak banyosuna oksit giderici maddeler sağlamak amacıyla elektrodun bileşimi hafif bir şekilde değiştirilebilir. Bazı hallerde bu, esas metalin bileşiminden çok az bir değişikliğe neden olur. Ancak

bazı uygulamalarda, başarılı bir kaynak karakteristiği ve kaynak metali özellikleri elde etmek için esas metalden farklı kimyasal bileşime sahip elektrod gerekebilir. Örneğin, manganez bronzunun gazaltı kaynağı için en başarılı elektrod ya alüminyum bronzu veya bakır-manganez-nikel-alüminyum alaşımı elektroddur.

Gazaltı kaynağında kullanılan elektrodlar tozaltı ark veya özlü elektrodla ark kaynağında kullanılanlara nazaran çok daha küçük çapa sahiptirler. Genelde elektrod çapları 0,8 ila 1,6 mm. arasındadır.

Çaplarının küçük olması nedeniyle elektrodlar yüksek yüzey / hacim oranına sahiptir. Elektrod yüzeyinde kalan herhangi bir çekme bileşiği ve yağlaycısı kaynak metalinin özelliklerini kötü bir şekilde etkileyebilir. Sonuç olarak elektrodlar yüzeylerine kirleticiler yerleşemiyecek kadar yüksek kalitede yüzeye sahip olacak şekilde üretilmektedir [28].

Gazaltı kaynağı birleştirme amacıyla kullanıldığı gibi, malzeme yüzeyine aşınma veya korozyon direnci kazandırmak veya bir başka amaç için yüzey dolgusu olarak da geniş ölçüde kullanılmaktadır. [28].

3.11.4.2.Koruyucu Gazlar

Metallerin çoğu oksit oluşturmak üzere oksijenle birleşmeye kuvvetli bir eğilim ve metal nitritleri oluşturulmak üzere azotla birleşmeye daha düşük ölçüde bir eğilim gösterirler. Oksijen erimiş çelikteki karbonla, karbon monoksit gazı oluşturmak üzere reaksiyona girer. Bu reaksiyonların ürünlerin tümü aşağıdaki kaynak hatalarının oluşumuna neden olur :

a) Oksitler nedeniyle erime hataları
b) Gözenek, oksit ve nitritler nedeniyle mukavemet kaybı
c) Oksitler ve nitritler nedeniyle kaynak metalinin gevrekleşmesi

Koruyucu gazın temel görevi çevredeki atmosferin erimiş kaynak banyosu ile temasını engellemektir. Yani koruyucu gaz burada örtülü elektrotlardaki örtünün görevini görür. Koruyucu gazın bu temel görevi dışında aşağıda belirtildiği şekilde kaynak işlemi ve oluşan kaynak dikişine önemli etkileri de vardır [31].

Atmosfer yaklaşık % 80 azot, % 20 oksijenden oluştuğu için kaynak sırasında bu reaksiyonların ürünleri kolaylıkla oluşur. Koruyucu gazın temel görevi çevredeki atmosferin erimiş kaynak banyosuyla temasını engellemektir. Esas görevi dışında koruyucu gazın kaynak işlemine ve sonuçta elde edilen kaynak dikişine aşağıda belirtilen hususlar yoluyla önemli etkileri vardır :

a) Arkın karakteristiği
b) Metal transferin şekli
c) Nüfuziyet ve kaynak dikişinin profili
d) Kaynak hızı
e) Yanma oluğu oluşma eğilimi
f) Temizleme etkisi
g) Kaynak metalinin mekanik özellikleri [28].

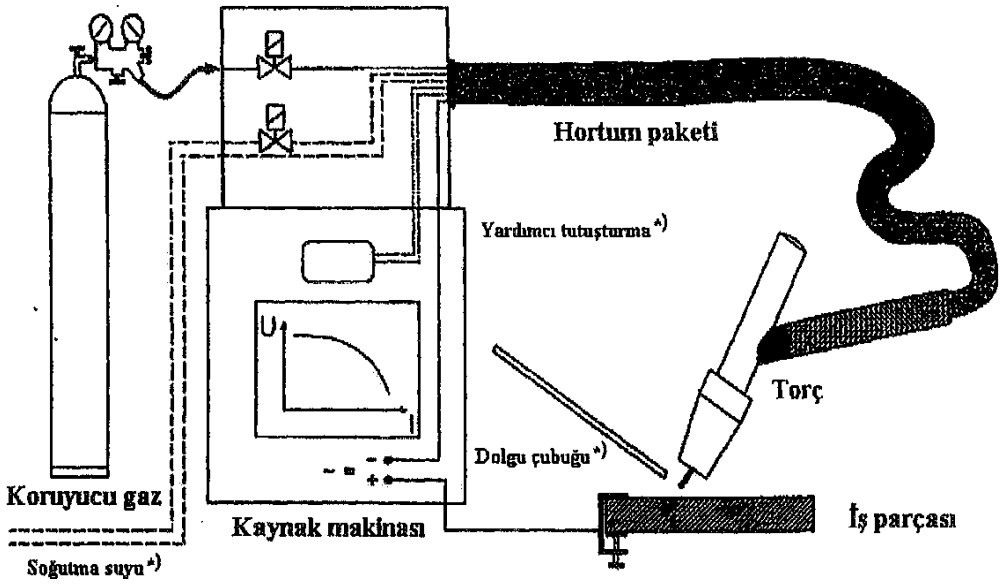
3.11.4.2.1. Koruyucu soy gazlar

Bilindiği gibi soy gazlar diğer elementlerin atomları ile elektron alışverişinde bulunmazlar, herhangi bir koşulda reaksiyona girmezler. Bundan dolayı gazaltı kaynak yöntemlerinin ilk geliştiği yıllarda koruyucu gaz olarak helyum ve argon gibi soygazlar kullanılmıştır. Ancak günümüzde soy gazların yerine aktif gazlar ve aktif soygaz karışımları kullanılmaktadır. TS EN 439 gazaltı kaynağında kullanılan koruyucu gazları standartlaştırmıştır.

3.12. Argon Kaynağı

3.12.1. Argon Kaynağının Tanımı ve Çalışma Prensibi

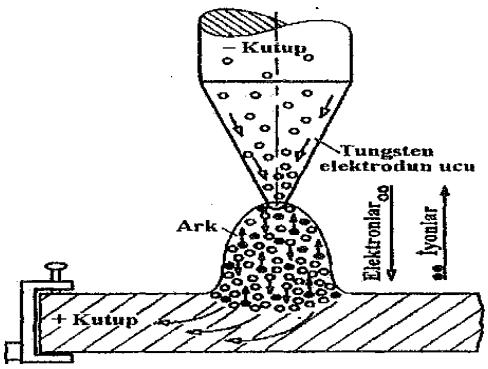
GTAW kaynak yönteminde ark, erimeyen bir tunsten elektrod ile iş parçası arasında oluşturulur. Ark, elektrod ve erimiş banyo havanın olumsuz etkilerinden soygaz (Argon, Helyum ve karışımları) atmosfer tarafından korunmaktadır. Burada elektrod sadece arkı oluşturmaktadır. Kaynak işlemi için gerektiğinde ayrıca bir kaynak teline ihtiyaç vardır [3]. GTAW kaynağında, erimeyen bir elektrod ile iş parçası arasında bir ark yanar. Dolgu malzemesi, ayrı olarak ilave edilir. Kaynak yeri bir koruyucu gazla örtülür [33].



Şekil 3.21. Bir GTAW kaynak sisteminin yapısı [33].

3.12.2. Doğru Akımla Kaynakta Arkın Tutuşması

Arkın oluşması ve süreklilik göstermesi, elektrod-iş parçası arasındaki mesafenin, elektronlar ve iyonlar gibi elektrik yükü taşıyıcıları tarafından iletken hale getirilmesi ile mümkündür (Şekil 3.22). Tutuşturma için, elektrod malzeme üzerine temas ettirilebilir. Elektrod yukarı kaldırılırken, oluşan kısa devre akımı sayesinde bir miktar metal buharlaşır; elektronlar elektroddan çıkabilirler ve elektrod-iş parçası arası mesafe elektrik iletkeni halini alır. Bu durumun dezavantajı, tungsten parçacıklarının elektroddan koparak kaynak banyosuna girme ihtimalinin olmasıdır [33].



Şekil 3.22. GTAW kaynağında arktaki elektronlar ve iyonlar [33].

3.12.3 Argon Kaynağının Avantajları

GTAW kaynağı ile, kaynağa uygun olan malzemelerin tamamına yakını birleştirilebilir. Yüzeyinde, yüksek sıcaklıkta eriyen bir oksit tabakası bulunan malzemelerin (örneğin alüminyum, alüminyum alaşımları, magnezyum, magnezyum alaşımları v.s.) kaynağında, özel önlemler gereklidir.

Isı kaynağı (ark) ve dolgu malzemesinin birbirinden ayrı olması nedeniyle, başlangıç hataları önlenebilmektedir. Bu sayede, dikiş kalitesi son derece yüksektir. GTAW kaynağı tüm pozisyonlarda uygulanabilir. Bu yöntemle, kök dikişlerinin ve ince levhaların kaynağı mümkündür [33].

3.12.4. Argon Kaynağının Dezavantajları

Elle GTAW kaynağında, sadece düşük kaynak hızları ve eritme güçlerine ulaşılabilir. Yüksek dikiş kalitelerine ulaşmak için, kaynakçının iyi eğitilmiş olması gereklidir.

3.12.5. Argon Kaynağı Akım Üreteçleri

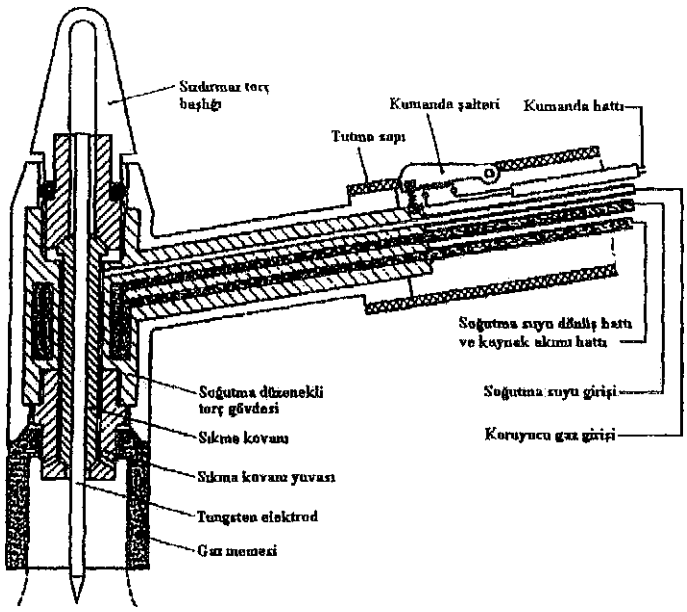
GTAW kaynağında, malzemelerin tamamına yakını (alüminyum, magnezyum vb. hariç) için, elektrod negatif kutba bağlanarak doğru akım kullanılır. Akım üreteçleri, düşen tipte bir akım-gerilim karakteristiğine sahiptirler. Burada, gerilimdeki büyük değişiklikler (ark boyu değişimleri), akım şiddetini sadece önemsiz miktarda değiştirmektedir. Kaynak akım şiddeti, kademesiz olarak ayarlanabilmektedir. Bu işlem, eski cihazlarda açık göbekli transformatör veya transdüktörlü transformatör ile yapılmaktadır. Modern tristörlü veya transistorlu akım üreteçleri, kademesiz kaynak akım şiddeti ayarının yanı sıra, dikiş başlangıcı, darbeli (impuls) akım ve bitiş krateri doldurulma programlan da içerirler. Doğru akım kaynak cihazları, çoğunlukla (trifaze) üç fazlı alternatif akımla beslenmektedir. Bu sayede şebeke, düşük akım değerleri altında düzenli yüklenmektedir [33].

Yüzeyinde, yüksek sıcaklıkta eriyen bir oksit tabakası bulunan malzemelerin kaynağı için, alternatif akım gerekmektedir ("alüminyumun kaynağındaki özellikler" kısmına bakınız). Bu akım üreteçleri, genellikle doğru/alternatif akım üreteçleri şeklinde imal edilirler. Eski cihazlarda, kademesiz akım ayarı için açık göbekli veya transdüktörlü transformatörler kullanılmıştır. Bu transformatörler, doğru akım makinalanndaki üç primer ve üç sekonder sargıya karşılık sadece bir primer ve bir sekonder sargıya sahiptirler. Bu sebeple şebeke, düzensiz ve yüksek bir şekilde yüklenmektedir.

Transistorlu modern cihazlar primer saykıllıdır. Burada, doğru/alternatif akım cihazlannda trifaze bağlantı mümkündür. Diğer bir avantaj, daha küçük transformatör ve daha küçük indüktans (drossel) bobini sayesinde, ağırlıktan tasarruf edilmesidir.

3.12.6. Argon Kaynak Torcu

Kaynak torcu, tungsten elektrodu tutar ve kaynak bölgesinin gaz korumasını temin eder. Genellikle, yüksek kaliteli kaynak işlemleri için su soğutmalı torçlar kullanılmaktadır. Çünkü, soğutmasız torçlar hem büyük hem de ağırdırlar. Şekil 3.23, su soğutmalı bir kaynak üflecinin kesitini göstermektedir.



Şekil 3.23. Su soğutmalı GTAW-kaynak torcu [33].

3.12.7. Argon Kaynağı Elektrod Malzemeleri

Doğru akımla GTAW kaynağında, toryum oksit, zirkonyum oksit, lantan oksit, seryum oksit ve bu oksitlerin karışımlarını içeren tungsten elektrodlar kullanılır. % 1 - 5 arası oksit ilavesi, arkın tutuşmasını iyileştirmekte ve elektrodun akım yüklenebilirliğini artırmaktadır. Alternatif akımla GTAW kaynağında, çoğunlukla %100 tungsten elektrotlar kullanılır.

Tablo 3.3. Tungsten elektrodlar; DIN 32528'e göre bileşimleri, kodları, tanıma renkleri ve uygulama bilgileri [33].

	Oksit katkısı ortalama % Ağırlık	**DİN 32528'e göre kodu**	**ISO 6848 EN 26848'e göre kodu**	**Renk kodu**	**Notlar**
katkısız		W	WP	yeşil	Alternatif akımda ark kararlılığı iyi ve düşük redresör etkisi; elektrod ucu düzgün yan küre şeklinde; doğru akımda yüksek gerilim darbeleri olmadan tutuşturmak problemli Toryum oksit oranı yükseldikçe, elektron çıkışında açığa çıkan iş enerjisi azalmaktadır. Bu sayede, tutuşma özellikleri, dayanma süresi ve akım yüklenebilirliği artmaktadır. Yüksek alternatif akını değerlerinde, pürüzlü veya elektrod ekseninden kaçmış uç kısım, ark kararlılığını azaltır. Toryum oranı düşük olan elektrodlarda bu sakınca pek yoktur.
toryum	% 0.4ThO_2		WT4	mavi	
oksit	% 1 $Th0_2$	WT10	WT10	sarı	
	% 2 $Th0_2$	WT20	WT20	kırmızı	
	% 3 $Th0_2$	WT30	WT30	eflatun	
	% 4 $Th0_2$	WT40	WT40	turuncu	
zirkonyum	% 0.3 ZrO_z		WZ3	kahverengi	Kaynak banyosu elektrod tarafından daha az
oksit	% 0.4 $Zr0_2$	WZ4		kahverengi	kirletilir. (Reaktör parçalarının kaynağı).
	% 0.8 $Zr0_2$	WZ8	WZ8	beyaz	
lantan	% 1 La_2Oj	WL10	WL10	siyah	WT-elektrodlanna kıyasla daha uzun dayanma
oksit					süreleri (plazma yöntemleri).
seryum	% 2 $Cc0_2$		WC20	gri	
oksit					

Uzun yıllar boyunca kullanılan toryum oksitli elektrotlar, toryumun hafif radyoaktif olması nedeniyle değiştirilmelidir. Elektrodun kendisinden dolayı zarara

uğranıldığı bugüne kadar duyulmamıştır. Ancak, hava emme tertibatı olmayan bir taşlama makinasıyla elektrodun taşlanması sırasında, toryum parçacıkları, teneffüs yoluyla akciğere yerleşebilmektedir. Elektrodlar genellikle 1 - 3.2 mm'lik çaplara sahiptirler ve düşük akımlar için konik şekilde taşlanırlar. Akım şiddeti arttıkça, koni açısı artırılır veya kesik koni şekli kullanılır. Alternatif akımda ise, çoğunlukla kesik koni biçimi kulanılır. Elektrodun yüksek düzeyde termik yüklemelere maruz kalması halinde, elektrod ucunda küçük bir erimiş küre oluşur [33].

3.12.8. Koruyucu Gazlar

TIG kaynağında, argon veya helyum veya bunların karışımları gibi asal gazlar kullanılır. Avrupa'da helyum çok pahalı olduğundan, genel olarak % 100 argon kullanılmaktadır. Sadece çok kalın alüminyum veya bakır parçalar, argon-helyum karışımı veya % 100 helyum altında kaynaklandığında yüksek kaynak hızlan ve uygun nüfuziyet avantajları elde edilebilmektedir [33].

Tablo 3.4. Çeşitli uygulama alanları için koruyucu gazlar

Uygulama/ Koruyucu gaz	**ıpı çelikleri**	**mlı paslanmaz çelikler**	**Mal/e inyum, alüminyum-alaşımları**	**meler akır, bakır-alaşımları**	**l, nikel - alaşımlar ı**	**aza duyarlı malzemeler**
Argon	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**
Argon/hidrojen karışımları		**X**			**X**	
Helyum			**X**	**X**		**X**
Helyum/Argon karışımı 25/75			**X**	**X**		**X**
Helyum/Argon karışımı 50/50			**X**	**X**		**X**
Kök koruma	**Formasyon gazı argon**	**masyon gazı Ar/H_2-kanşımlan argon**	**argon**		**rgon**	**ırgon helyum**
Akım türü/ kutuplama		**= (-)**	**~ = (-)**	**= (-)**	**= (-)**	**= (")**

Koruyucu gazlar, EN 439'da standartlaştınlmıştır. Tablo 3.4 ve 3.5'de koruyucu gazların özellikleri ve uygulama alanları verilmektedir.

Tablo 3.5. GTAW kaynağında koruyucu gazların etkisi [33].

Koruyucu gaz	Tutuşma	Ark kararlılığı	Dikiş genişliği	Nüfuziyet	Kaynak hızı
Argon	XXX	XXX	XXX	XX	XX
Argon/hidrojen karışımları	XXX	XXX	XX	XX	XXX
Helyum	X	X	X	XXX	XXX
Helyum/Argon karışımı 25/75	XX	XX	XXX	XX	XXX
Helyum/Argon karışımı 50/50	X	X	XX	XXX	XXX

3.12.9. Kaynak Dolgu Malzemeleri

GTAW kaynağı, çoğunlukla dolgu malzemesi ile uygulanır. Sadece, çok iyi kaynak ağzı bağlantı geçişine sahip ince parçalarda, dolgu malzemesi kullanılmayabilir.

Elle kaynakta kaynakçı, 1 m uzunlukta ve 1 - 3.2 mm çaplarındaki kaynak çubuklarını serbest eliyle kaynak yerine ilave eder. Mekanize kaynakta ise 0.8 -1.6 mm çap aralığında sonsuz (sürekli) teller kullanılır. Dolgu malzemeleri, DIN 1732 (alüminyum), DIN 8554/1, DIN 8559/1 ve ISO 636 (çelikler)'da standartlaştırılmıştır.

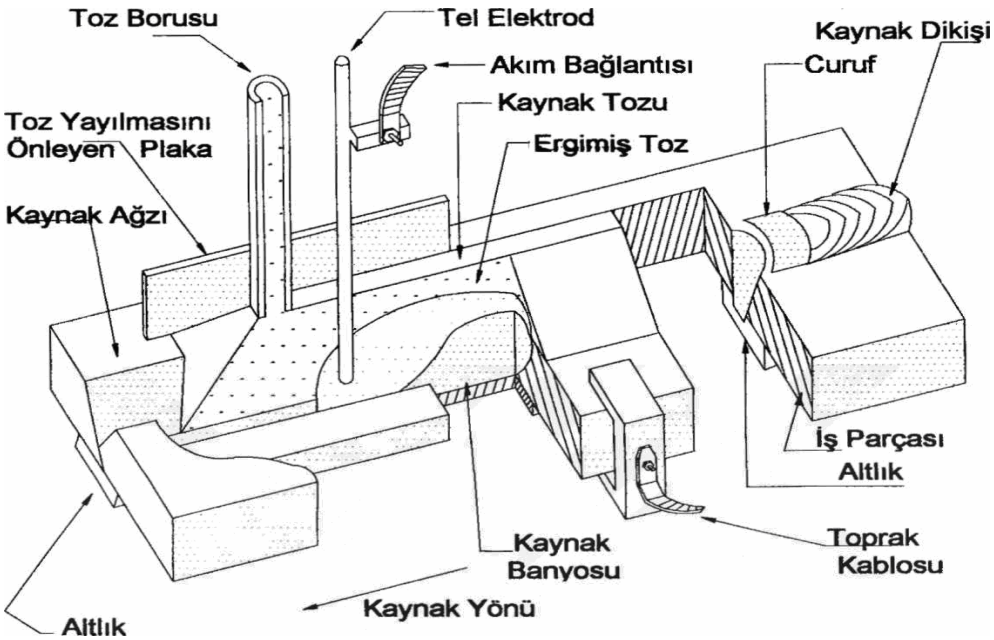
3.13. Tozaltı Kaynak Yöntemi

İlk defa 1933 yılında ABD'nde kullanılmaya başlayan Tozaltı kaynak yöntemi, 1937'den sonra Avrupa'da da uygulama alanına girmiştir. Yöntemin Türkiye'ye girişi ise 1960'lı yıllara rastlar.

Tozaltı ark kaynak yönteminde, bir kangaldan çekilen kaynak teli,, bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir memeden geçerek kaynak bölgesine iletilir; gerekli akımı

memeden alan tel ile iş parçası arasında oluşturulan ark, ayrı bir kanaldan gelen silikat ve toprak alkali metalleri içeren bir toz tarafından atmosferin olumsuz etkilerinden korunur. Kaynak teli ve iş parçası arasında oluşan arkın sıcaklığında tel ve esas metalin bir kısmı ergiyerek istenilen birleştirmeyi sağlarlar. Arkın sürekli olarak toz altında yanması bu yönteme Tozaltı ark kaynağı adının verilmesine neden olmuştur. Ark sıcaklığında bir miktar toz ergiyerek cüruf haline geçer kaynak banyosunu ve dikişi örter ve bu oluşan cüruf çok sıcak olan kaynak dikişini ve banyoyu atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, içerdiği deoksidasyon ve alaşım elementleri sayesinde kaynak, banyosunun deoksidasyonunu ve kaynak metalinin alaşımlanmasını sağlar [34].

Tozaltı kaynağı otomatik olmanın yanında, akım şiddeti yüksektir. Bir paso ile 85 mm, iki paso ile 180 mm ve çok paso ile 300 mm kalınlığa kadar parçaların kaynağını yapmak mümkün olmaktadır. Kaynak yapılabilecek en ince sac ise 1.2 mm'dir. Tozaltı kaynağında normal ark kaynağına nazaran elektrod teli daha yüksek bir akım şiddeti ile yüklenebilir. Bu sebepten, derin nufuziyetli ve geniş banyolu dikişler elde edilir [3, 23].



Şekil 3.24. Tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilen V kaynak ağızlı parçanın kesit görünüşü [34].

3.13.1. Tozaltı Ark Kaynak Yönteminin Avantajları

Yüksek ergime gücü, derin nufuziyet, enerji ekonomisi, elektrod ekonomisi, düzgün görünüşlü kaynak dikişi ve yüksek ark kararlılığı gibi tozaltı ark kaynak yönteminin üstünlükleri vardır.

3.13.1.1. Yüksek ergime gücü ve kaynak hızı

Tozaltı kaynak yönteminde uygulanan akım şiddeti normal olarak 200 ile 2400 amper arasında değişir, çok telli tekniklerde bu değer 5000 ampere kadar yükselmektedir [2]. Bu olay, yönteme çok yüksek bir ergime gücü kazandırmakta ve ayrıca kaynak hızı da 6 ile 300 m/saat arasında değiştirilebilmektedir. Bu bakımdan tozaltı kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslanamayacak derecede yüksek bir ergime gücü ve kaynak hızına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı, işlem herhangi bir kalınlık ve boyuttaki silindirik yüzey yada düz plakaları kaynatmak için yüksek kaynak hızında kullanılır .

3.13.1. 2. Derin nufuziyet

Kaynak akım şiddetinin, dolayısı ile de akım yoğunluğunun yüksek olması nedeni ile bu yöntemde çok derin bir kaynak nufuziyeti elde edilmekte ve paso sayısının azalmasına neden olmaktadır. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynak ağzı açmadan tek paso ile 18mm, kaynak ağzı açarak da iki paso ile 150 mm kalınlığında ki parçalan rahatlıkla kaynatmak mümkündür [34].

3.13.1.3. Elektrod ekonomisi

Tozaltı kaynak yönteminde sıçrama kaybının olmayışı ve tel şeklinde elektrod kullanılması, koçan kaybını önlemektedir [6]. Tozaltı kaynağında yüksek akım yoğunluğu nedeni ile ergiyen metalin 2/3' ünü esas metal ve 1/3'ünü ilave metal oluşturur. Bu sebepten ilave metal sarfiyatı oldukça azdır [3, 34].

3.13.1.4. Emniyetli ve düzgün görünüşlü kaynak dikişi

Kaynak dikişinin düzgün ve etkin bir biçimde cürufla örtünmesi sakin bir katılaşma sağladığından, kaynak banyosundan gaz çıkışı kolaylaşmakta, birim boya uygulanan akım şiddetinin yüksekliği de soğuma hızını yavaşlattığından geçiş bölgesinde sertleşme ihtimali de zayıflamaktadır.

Ergimiş viskoz cüruf dikiş formunun düzgün ve tırtılsız olmasını sağlamakta ve aynı zamanda dikişin kenarlarında yanma oluklarının oluşmasına imkan vermemektedir. Kaynak metalinde birleşme hatasına, soğuk kalmış bölgelere, cüruf kalıntılarına ve gözeneklere rastlanılmadığından daha emniyetli kaynak dikişleri elde edilmektedir .

3.13.1.5. Kaynak dikişinin kalitesine kaynakçının bir faktör olarak etkilemesi

Tozaltı kaynak yönteminde elektronik ve elektro mekanik ayar ve kontrol sisteminin varlığı kaynakçı faktörünü ortadan kaldırmaktadır. Bu yöntemde kaynakçı kaynak dikiş kalitesine etkiyen bir faktör olmadığından, bu yöntemde kaliteli işçiye gerek yoktur ve ayrıca kaynakçı bedenen çok daha az yorulmaktadır ve dolayısı ile bu konu maliyeti de etkilemektedir [34].

3.13.1.6. Yüksek ark kararlılığı

Ark bölgesinde buharlaşan cürufun oluşturduğu atmosfer, arkın sürekliliğinin devamını sağlamakta ve çok yüksek hızlarda dahi yöntemin uygulanabilmesine imkan sağlamaktadır.

3.13.2. Tozaltı Ark Kaynak Yönteminin Dezavantajları

Pahalı makina ve donanıma gerek gösterir, dolayısı ile ilk yatırım giderleri yüksektir. İnce sacların kaynağı için uygun bir yöntem değildir. Kısa boylu ve karışık şekilde dikişler için yarı otomatik tozaltı kaynak makinaları geliştirilmiş ise de, bunlar tozaltı kaynak yönteminin tüm avantajlarını bünyelerinde toplayamamaktadırlar. Karışık şekilli kaynak dikişine sahip çok sayıda yapılması gereken parçalar için özel geliştirilmiş tertibatlar kullanılabilmektedir. Tozaltı kaynak yöntemi ile yatay pozisyonda iyi sonuçlar alınabilmektedir. Dik ve korniş pozisyonları için özel tertibatlar geliştirilmiştir. Tavan pozisyonunda bu yöntem ile kaynak yapmak hiç bir şekilde mümkün olmamaktadır [34].

3.13.3. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri

Tozalatı kaynağında kaynak teli olarak, elektrik ark ocaklarında üretilen yüksek kaliteli çelik teller kullanılır. Normal tellerden farkı kaynak yerinin metalurjik emniyeti bakımından, Manganez miktarının yüksek olmasıdır. Kaynak uygulamalarında genellikle 1.2-12 mm çaplarında kalibre edilmiş kaynak telleri kullanılır. Bu tellerin yüzeylerinin tamamen düz ve pürüzsüz olması, yağ, pislik ve pastan arınmış olması gerekir. Kaynak tellerinin tamamen çıplak kullanılmaları sonucunda memede kontak zorlukları ve memenin çabuk aşınması durumu ortaya çıkar. Bundan dolayı kaynak telleri genellikle bakır veya bronz kaplı olarak üretilirler. Tellerin üzerindeki batar tabakası memeden daha iyi bir akım geçişini sağlayarak daha kararlı bir ark elde edilmesine imkanı verdiği gibi. paslanmaya karşı da telleri korumaktadır. Memeden kaynak teline akımın iyi bir şekilde geçmemesi kaynak dikişinin hatalı olmasına neden olur [1,11].

Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak telleri bilhassa bileşimlerindeki manganez miktarlanna göre sınıflandırılırlar. Tablo 3.6."de DIN 8557'ye göre tozaltı kaynağında kullanılan tellerin kimyasal bileşimleri verilmiştir. Bir kaynak telinin seçiminde yalnız esas malzemenin bileşimi değil, kaynak tozunun metalurjik durumu da dikkate alınır. Mesela yüksek Manganezli erimiş bir toz veya bazik karakterli sinterlenmiş bir toz ile DİN 8557 den Sİ ila S3 arasındaki düşük Manganezli teller kullanılmalıdır. Böylece kaynak banyosundaki kimyasal reaksiyonlarla mekanik özellikleri yüksek dikişler elde edilir.

Tozaltı kaynağında kaynak metalinin alaşımlandırılması için genel olarak aşağıdaki üç usul kullanılır:

- Alaşımlı tel ile kaynak yapmak
- Alaşımsız bir tel ile alaşımlı bir kaynak tozu kombinezonu seçmek
- Kompoze bir elektrod kullanmak. Bu elektrodlar alaşım elemanı ihtiva eden bir örtü ile alaşımsız bir telden oluşur.

Tablo 3.6. DIN 8557'ye göre tozaltı kaynağında kullanılan tellerin kimyasal bileşimleri.

İşareti	C	Mn	Si	Mo
OE-S1	0.06-0.12	0.4-0.6	0.1 Max	-
OE-S1 Si	0.06-0.12	0.3-0.6	0.1-0.4	-
OE-S2	0.08-0.14	0.8-1.2	0.05-0.15	-
OE-S2 Si	0.08-0.4	0.8-1.2	0.15-0.4	-
OE-S3	0.08-0.15	1.3-1.7	0.05-0.25	-
OE-S4	0.08-0.16	1.8-2.2	0.05-0.25	-
OE-S5	0.08-0.16	2.3-2.7	0.05-0.25	-
OE-S6	0.08-0.17	2.8-3.2	0.2-0.3	-
OE-S1 Mo	0.08-0.12	03-0.6	0.15-0.4	0.45-0.6
OE-S2 Mo	0.03-0.12	0.8-1.2	0.05-0.15	0.45-0.6
OE-S3 Mü	0.0B-0.I4	1.1-1.5	0.05-0.15	0.45-0.6
OE-S4 Mû	0.8-0.16	1.7-2.1	0,05-015	0.45-0,6
OE-S6 Mo	0.8-0. 17	2.8-3,2	15-0,3	0,45-0,6

3.13.4. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları

Tozaltı kaynağında ergimeyen kaynak tozları emilerek yeniden kaynak işleminde kullanılır. Emme sonucunda tozların tane büyüklüğü dağılımında, mutlak bir değişim ortaya çıkmasından korunmak için, tüketilen tozun yaklaşık yarısı kadar yeni kurutulmuş toz ilavesi önerilir. Tekrar kullanılmaya alınan tozun cüruf artıklarından ve yabancı elemanlardan tamamen arındırılmış olması gerekir [17].

Tozaltı kaynağında kullanılan, tane biçimine sahip tozlar örtülü bir elektrodla yapılan kaynakta örtünün sağladığı aynı işi görür. Kaynak işlemine fiziksel ve metalurjik bakımlardan tesir eder. Fiziksel olarak; meydana gelen cüruf kaynak banyosunu havaya karşı korur, dikişe uygun bir form verir ve kaynak banyosunun yavaş soğumasını sağlayarak, zararlı gazların kaynak banyosunu terk etmesi için zaman kazandırır. Metalurjik olarak da, kaynak banyosuna ilave ettiği yardımcı katkı elemanları ile yanma kayıplarını önler veya dengeler [23].

Kaynak tozlarının kimyasal bileşimi ve atmosfer şartlarına bağlı olarak kimyasal reaksiyonlar sonucu özelliklerinde değişiklikler meydana gelmekte ve uzun süreli depolamalarda bu değişiklikler artmaktadır. Kaynak tozları depolama şartlarına bağlı olarak, atmosferden az çok nem alır. Nem, gözenek oluşumu ve aynı zamanda hidrojen difüzyonu ile soğuk çatlak oluşmasına sebep olur. Bunu önlemek için, kaynak tozu kullanılmadan önce 250°C ± 50 °C de 2 saat süre ile kurutulmalıdır. Eğer kurutulacak toz aglomere kaynak tozu ise, 350 °C ± 50 °C de 3 saat kurutulması gerekir[35]. Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tozlarını üretim metotları ve özellikleri yönlerinden aşağıdaki gruplarda sınıflandırmak mümkündür.

A- Kaynağın gayesine göre:

a- Hızlı kaynak tozları,

b- Derin nufuziyet kaynak tozları,

c- İnce sac kaynağı tozları,

d- Aralık doldurma kabiliyetli tozlar,

e- Dolgu ve kaplama işlemleri için kaynak tozları.

B- Üretim yöntemlerine göre:

a- Ergimiş kaynak tozları,

b- Sinterlenmiş kaynak tozları,

c- Aglomere kaynak tozları.

C- Kimyasal karakterine göre:

a- Asit karakterli tozlar,

b- Nötr karakterli tozlar,

c- Bazik karakterli tozlar.

D- Mangan miktarına göre:

a- Yüksek manganlı tozlar (%30-45 MnO)

b- Orta sevide mangan içeren tozlar (% 14-20 MnO)

c- Düşük manganlı tozlar (<%14)

3.13.5.Tozaltı Ark Kaynağı Uygulamaları

Tozaltı kaynağı günümüzde, hızla gelişen endüstrinin ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde gelişmiş ve otomatikleşmiştir. El ile hareket eden donanımlardan tam otomatik, çift ve çok telli donanımlar ile bantlı otomatlara kadar çeşitli tiplerde cihazlar mevcuttur. Tam otomatik makineler ya özel raylar üzerinde veya paletlerle tekerlek üzerinde hareket eder. Birinci tip makineler daha ziyade seri imalatta, ikinci tip makineler ise özel imalatta ve bilhassa büyük sacların yatay pozisyonunda yapılan kaynak işlemlerinde kullanılır. Yalnız çevresel dikişlerin kaynağında parça döner ve kaynak kafası sabit kalır. Mesela sıvılaştırılmış gazların (LPG) konulduğu tüplerin çevresel dikişleri gibi [11, 23].

Kaynak esnasında erime gücünü artırmak için çeşitli tiplerde ve birden fazla kaynak telinin kullanıldığı tozaltı kaynak donanımları geliştirilmiştir [11].

- Tandem tozaltı kaynak yöntemi
- Paralel tozaltı kaynak yöntemi
- Seri tozaltı kaynak yöntemi
- Korniş tozaltı kaynak yöntemi
- Band elektrodla tozaltı kaynak yöntemi.

Bölüm 4. Deneysel Çalışma

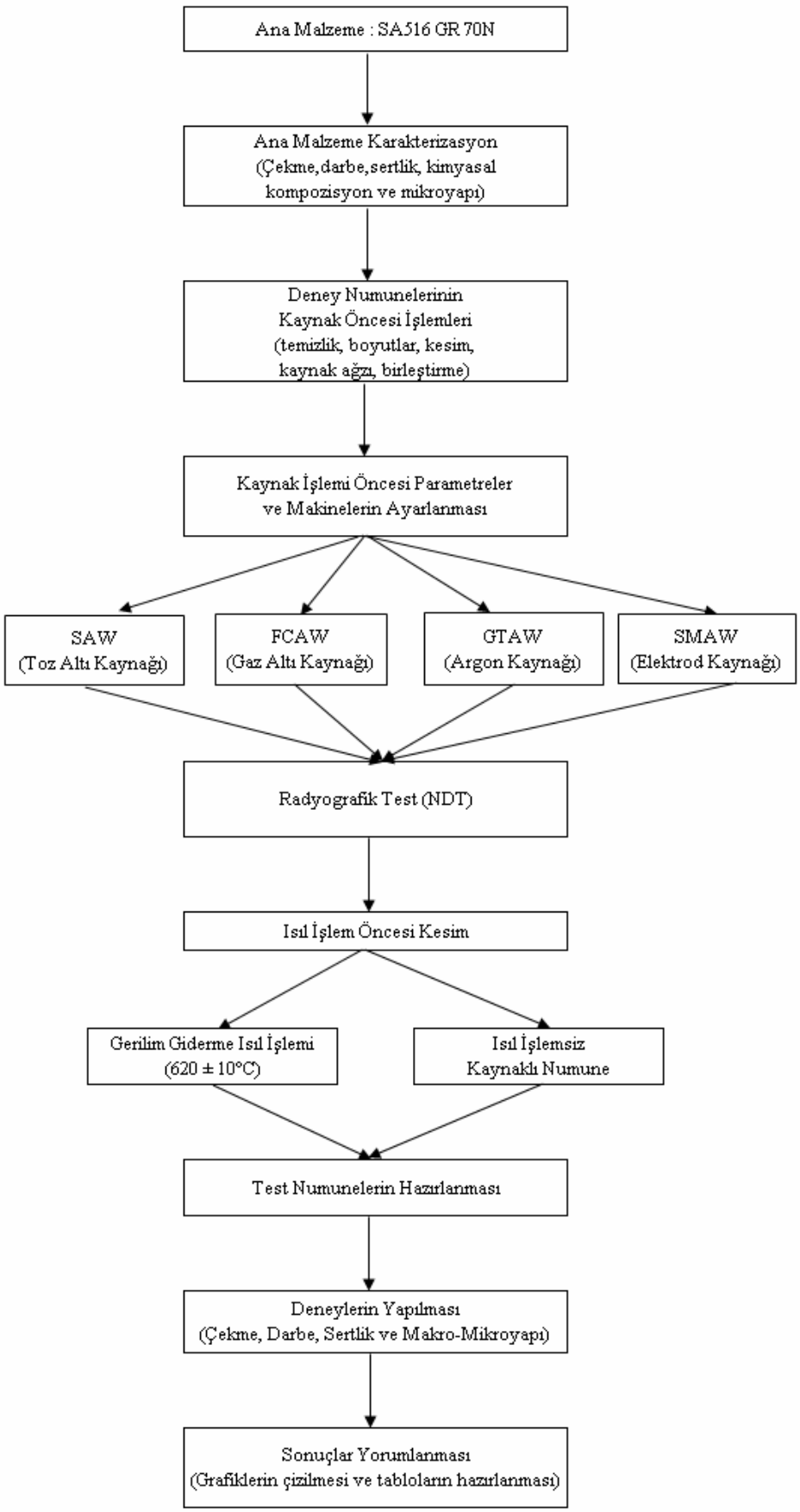
4.1. Genel

Bu çalışmada deney malzemesi olarak ÇİMTAŞ'de imalatı yapılan ve basınçlı kapların ana malzemesi olan SA516Gr70N (ASME Bölüm IX) çeliği kullanılmıştır. Farklı kaynak parametreleri (akım, gerilim ve kaynak ilerleme hızı) ile aynı malzeme dört farklı ark kaynak prosesi (SAW, FCAW, GTAW ve SMAW kaynak yöntemleri) ile birleştirilmiştir. Kaynaklı plakanın kaynak bölgesinden çekme deney numuneleri, charpy-V deney numuneleri (ana malzeme, kaynak metali ve ITAB), sertlik tarama ve metalografik inceleme deney parçası çıkarılmıştır. Kaynaklı malzemelerin mukavemet değerlerini saptamak amacıyla standartlara uygun olarak hazırlanan numunelere çekme, çentik darbe deneyleri uygulanmış ve kaynaklı numunelerin mikroyapı ve vickers sertlik değerleri incelenmiştir.

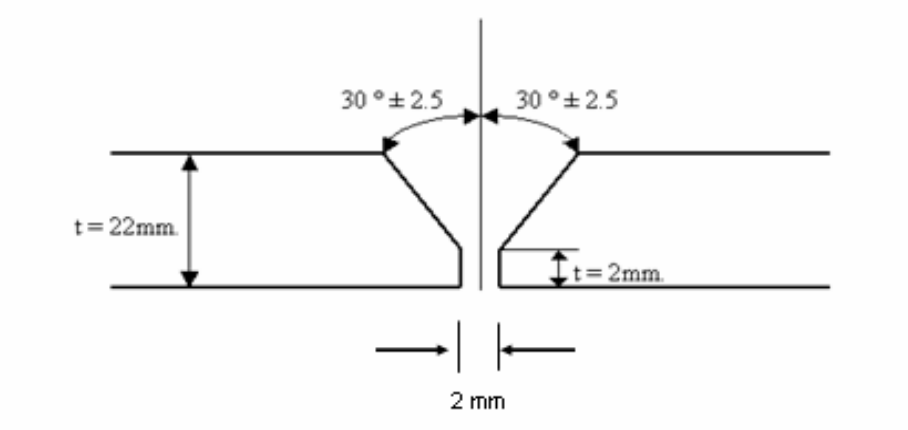
Dört farklı kaynak yönteminde sabit tutulan dört farklı ısı girdisi ile ısıl işlem yapılan ve yapılmayan kaynaklı numunelerin mekanik özelliklere etkileri, makro ve mikroyapı numuneleri incelenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada yapılan işlemler ile ilgili akış şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.

4.2. Deney Malzemesi ve Boyutları

Deneysel çalışmalarda kullanılan ve ASME bölüm IX'a göre üretilen (SA516 Gr 70N basınçlı kap çeliği) plakalardan 22mmX150mmX1000mm boyutlarında parçalar kesilmiştir. Test numuneleri hadde yönüne paralel olacak şekilde alınmıştır. Kesim ve kaynak işlemi öncesinde ilk olarak tüm malzemeler kumlama işlemine tabii tutulmuştur. Kumlama işlemi ile ana malzeme üzerinde ve yüzeyinde bulunan ve kaynak kalitesini olumsuz etkileyecek tüm kir, yağ, pas, vs. arındırılarak temizlenmiştir. Kesilen parçalar birleştirilerek farklı kaynak ısı girdileri (kaynak parametreleri) ile kaynak edilmiştir. Kaynak edilecek test parçası malzemelerine Şekil 4.2 'de şematik olarak gösterildiği gibi "V" kaynak ağızları alevli kesim ile açılarak taşlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.1 SA516Gr70N çeliğinin kaynak ve test işlemleri akış şeması.



Şekil 4.2 Kaynak ağzı boyutlarının şematik olarak gösterilişi.

4.3. Ana Malzemenin Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan SA516Gr70N çeliğinin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu ÇİMTAŞ laboratuarlarında yapılmıştır. Ana malzemenin; kimyasal kompozisyonu, Spectromax cihazında argon yakma tekniği ile üç deney sonucunun ortalaması alınarak yapılmıştır. Çekme deney sonuçları Alşa marka 40 ton kapasiteli makinede iki adet deneyin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Çentik darbe enerjisi değerleri Amsler RKP 300 markalı cihazda üç adet deneyin ortalaması alınarak yapılmıştır. Ayrıca, makro ve mikroyapı resimleri ise Zwick 3212 markalı makinede çekilmiştir. Ana malzemenin karakterizasyonu ile ilgili deney sonuçları bölüm 5.1'de verilmiştir.

4.4. Kaynak Sarf Malzemeleri

Yapılan kaynak işlemleri sırasında belirlenen ısı girdilerine uymak koşuluyla kaynak işlemleri toz altı kaynağı otomatik makineler ile gaz altı ve elektrod kaynakları elle yapılmıştır. Kaynak makinelerinden belirlenen parametreler ayarlanarak kaynak işlemleri Şekil 4.2'de tanımlanan kaynak ağzı çoklu pasolar ile kaynak metali ile doldurulmuştur. Kaynak yöntemlerinde, ısı girdisini etkileyen faktörlerin değerleri ±%2 hata ile kontrol edildi. Kaynak işlemleri sırasında kullanılan dolgu metal malzemelerinin özellikleri üretici firma tarafından sağlanan üretim bilgilerine göre Tablo 4.1 ve 4.2'de özetlenmiştir. SAW kaynak işlemi sırasında OP 121 TT (EN 760, AWS/ASME Bölüm II C) markalı kaynak tozu

kullanılmıştır. Kaynak tozunun mekanik özellikler, fluks analizi ve tane boyutu ile ilgili bilgiler Tablo 4.3'de verilmiştir. Ayrıca, gaz altı kaynaklarında kaynağı yapılan plakalarda EN 439 standartlarına uygun olarak FCAW proseslerin de Karmix gazı (%82 Ar + %18 CO_2) karışımı, GTAW kaynak prosesinde ise %99,99 saflıkta argon gazı kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Kaynak elektrod çapları ve kimyasal özellikleri

Kaynak Yönetimi	Elektrod Çapı (mm)	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Ti
SMAW	3,25	0,09	1,68	0,88	0,012	0,016	0,05	0,03	0,12	<0,01	<0,01	0,01	0,01
GTAW	2,4	0,07	1,65	0,26	0,004	0,015			0,075				
FCAW	1,2	0,076	1,5	0,59	0,013	0,013							
SAW	4	0,06	1,48	0,41	0,007	0,01	0,056	0,082	0,18		0,007	0,013	Nb. 0,004

Tablo 4.2. Kaynak elektrodlarının standartları ve mekanik özellikleri

Kaynak Yöntemi	Elektrod Tipi Standart	Çekme Mukavemeti (N/mm²)	Akma Mukavemeti (N/mm²)	Uzama (%)	Darbe Enerjisi (Joule)
SMAW	Oerlikon Tenacito, E 7018-1 H4 (AWS A5.1)	595	525	26	47 (-46°C)
GTAW	Tgrod 12.64, ER 70S-6 (AWS A5.16)	520-560	>460	>25	110 (-40°C)
FCAW	Megafil 713R, E71-T1 (AWS/ASME Section II)	680	621	22	61 (-46°C)
SAW	Oerlikon Fluxocard 31 (AWS A5.17)	598	519	28	77 (-46°C)

Tablo 4.3. Toz altı kaynağında kullanılan kaynak tozunun özellikleri

Test Sıcaklığı (°C)	Akma Mukavemeti (N/mm²)		Çekme Mukavemeti (N/mm²)		Uzama %	Test Sıcaklığı (°C)	Darbe Enerjisi Joule (Charpy-V)		
20	450		545		26,7	-60	190	180	192
Kaynak Fluks Analizi									
MnO	TiO2	CaO	CaF2	Fe2O3	SiO2	Al2O3	MgO	P2O5	
0,83	1,08	5,97	25,05	1,02	13,15	18,01	31,84	0,028	
Tane Analizi-Boyutu (%)-(mm)									
<0,315	0,315-0,5		0,5-1,0		1,0-1,6		>1,6		
0,4	4		49		38,6		8		

4.5. Kaynak Makinaları

Yapılan kaynak işlemleri sırasında kullanılan ve ESAB firmasının kaynak makineleri ile ilgili bilgiler Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo. 4.4. Kaynak makineleri genel özellikleri ve çalışma aralıkları

KAYNAK MAKİNELERİ				
Proses/Makine Adı	Gazaltı Kaynağı LAW 410	Argon Kaynağı LTG 400	Elektrod Kaynağı LHF 400	Tozaltı Kaynağı LAF 1000
Gerilim	230/400-415/500 V, 3~50Hz 230/440-460 V, 3~60Hz	230/400-415/500 V 3~50Hz	400-415/500 V, 3~50Hz 440-460/550 V, 3~60Hz	400-415/500 V, 3~50Hz 440-440/550 V, 3~60Hz
Yük Kapasitesi çalışma verimi %100	280 A/28 V	250 A	250 A	800 A/44 V
çalışma verimi %60	350 A/32 V	315 A	315 A	1000 A/44 V
Ayar aralığı (DC)	60 A/17 (12) V - 400 A/34V		8 A/20 V - 400 A/36V	40 A/22 V - 1000 A/45V
Açık devre voltajı	53-58 V	65-75 V	80-87 V	
Açık devre gücü	640/840 W	490 W	340 W	
Verimlilik	0,74	0,82	0,74	0,84
Güç Faktörü	0,86		0,9	0,95
Birleşme Sınıfı	IP 23	IP 21	IP 23	IP 23
Ağırlık (Kg)	200/214	205	195	330
Ebatlar (mm)	800X640X835	1250X745X780	1310X765X705	646X552X1090

4.6. Kaynak Parametreleri

Bu çalışmada dört farklı kaynak prosesi uygulanmıştır. Tüm proseslerde akım, gerilim ve ilerleme hızı değişken olup ısı girdisi için dört farklı değer seçilerek birleştirilen plakaların kaynak işlemleri yapılmıştır. Yapılan kaynak işlemlerinde uygulanan ısı girdisini etkileyen parametrelerin değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Malzeme kalınlığı, kaynak ağzının şekli, elektrod çapı, kullanılan koruyucu gazlar, ve tozaltı kaynak tozları yapılan her bir kaynak işlemi için aynıdır.

Tablo 4.5. Kaynak parametreleri ve uygulanan ısı girdisi değerleri.

ISI GİRDİSİ DENEY ŞARTLARI				
Kaynak Prosesi	**Akım (Amper)**	**Gerilim (Volt)**	**Hız (cm/dk)**	**Isı Girdisi (kj/cm)**
Elektrod Kaynağı (SMAW)	83,5	20	10	10,02
	120	22	12	13,20
	145	24	13	16,06
	167	26	13	20,04
Toz Altı Kaynağı (SAW)	410	24	45	13,12
	485	26	47	16,09
	565	29	49	20,06
	700	32	53	25,35
Gaz Altı Kaynağı (FCAW)	210	23	22	13,17
	257	26	25	16,03
	300	29	26	20,07
	365	30	26	25,26
Argon Kaynağı (GTAW)	167	10	10	10,02
	200	11	10	13,20
	245	12	11	16,03
	286	14	12	20,02

4.7. Kaynak İşlemi

Yapılan çalışmada dört farklı kaynak metodu uygulanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Elle yapılan kaynaklarda her bir proses için belirlenen ısı girdilerine göre aynı kaynakçıya yaptırılmıştır Ayrıca bu kaynak işlemleri öncesinde Tablo 4.5'te verilen kaynak parametrelerine uymak koşuluyla kaynakçılara eğitim verilmiştir.

4.7.1. Elektrod Kaynağı (SMAW)

Elektrod ark proseslerin de LHF 400 kaynak makinesi kullanılarak Tablo 4.1 ve 4.2'de verilen kimyasal, mekanik özellikler ile 3,25 mm çapındaki E 7018-1 H4 tipindeki örtülü elektrod kullanılarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak işlemleri öncesinde malzemeye herhangi bir tav (ön ısıtma) işlemi uygulanmadan çoklu

pasolar ile Tablo 4.5'te verilen ısı girdisi şartlarına uymak koşuluyla gerçekleşmiştir. İlk pasoda yapılan herhangi bir kaynak hatasını engellemek amacıyla, üstten yapılan kaynak işleminden sonra plakanın diğer tarafı taşlama işlemi ile temizlenerek tüm kaynak işlemleri tamamlanmıştır.

4.7.2. Toz altı Kaynağı (SAW)

Tozaltı ark kaynak prosesleri otomasyon sistemi ile LAF 1000 kaynak makinesi kullanılarak Tablo 4.1 ve 4.2'de verilen kimyasal, mekanik özellikler ile Ø 4 mm çapındaki Fluxocard 31 tipindeki tel elektrod kullanılarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak işlemleri öncesinde bir tav işlemi yapılmadan çoklu pasolar ile Tablo 4.5'te verilen ısı girdisi şartlarına uymak koşuluyla gerçekleşmiştir. Tozaltı kaynaklarında Tablo 4.3'de tanımlanan OP 121 TT kaynak tozu kullanılarak kaynak banyosunun dışarıdan gelecek zararlı etkenlerden korunmuştur. Bu proseste akımın yüksek olması sebebiyle kök pasoda düşük ısı girdisi ile argon kaynağı yapılmıştır. Üstten kaynak işlemi tamamlandıktan sonra plakanın diğer tarafından ilk pasoda yapılan kök argon kaynağı taşlama işlemi ile temizlendikten sonra tozaltı kaynak işlemleri tamamlanmıştır.

4.7.3. Gaz altı Kaynağı (FCAW, GTAW)

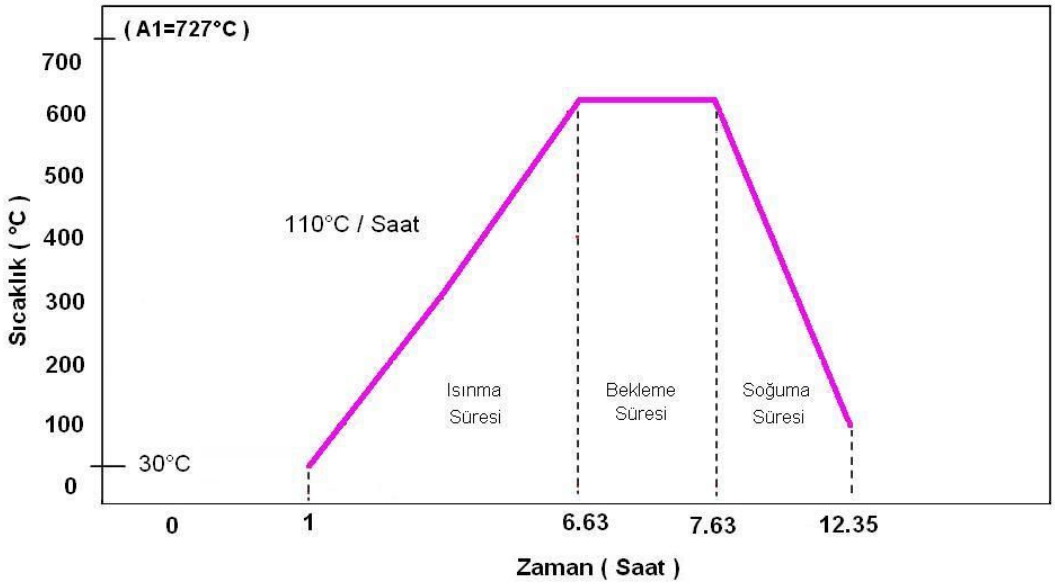
FCAW kaynak proseslerinde koruyucu gaz olarak karmix gazı (%82 Ar + %18 CO_2) ve LAW410 kaynak makinesi kullanılarak Tablo 4.1 ve 4.2'de verilen kimyasal, mekanik özellikler ile 1,2 mm çapındaki ticari ismi Megafil 713 R E 71-T1 tipindeki özlü elektrod kullanılarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak işlemleri öncesinde malzemeye herhangi bir tav işlemi uygulanmadan çoklu pasolar ile Tablo 4.5'de verilen ısı girdisi şartlarına uymak koşuluyla gerçekleşmiştir. İlk pasoda yapılan olası kaynak hatasını engellemek amacıyla, üstten yapılan kaynak işleminden sonra plakanın diğer tarafı taşlama işlemi yapılarak kaynak işlemleri tamamlanmıştır.

GTAW kaynak proseslerinde ise koruyucu gaz olarak proses gereği argon gazı kullanılmıştır. LTG 400 kaynak makinesi kullanılarak Tablo 4.1 ve 4.2'de verilen kimyasal, mekanik özellikler ile 2,4 mm çapındaki ER 70S-6 (Tigrod 12.64) elektrod kullanılmıştır.. Diğer proselerde olduğu gibi malzeme herhangi bir tav işlemi

uygulanmadan ilk paso taşlama işlemi kaldırılarak Tablo 4.5'de verilen ısı girdisi şartları sağlanarak kaynak işlemleri tamamlanmıştır.

4.8. Kaynak Edilmiş Numunelerin Isıl İşlemi

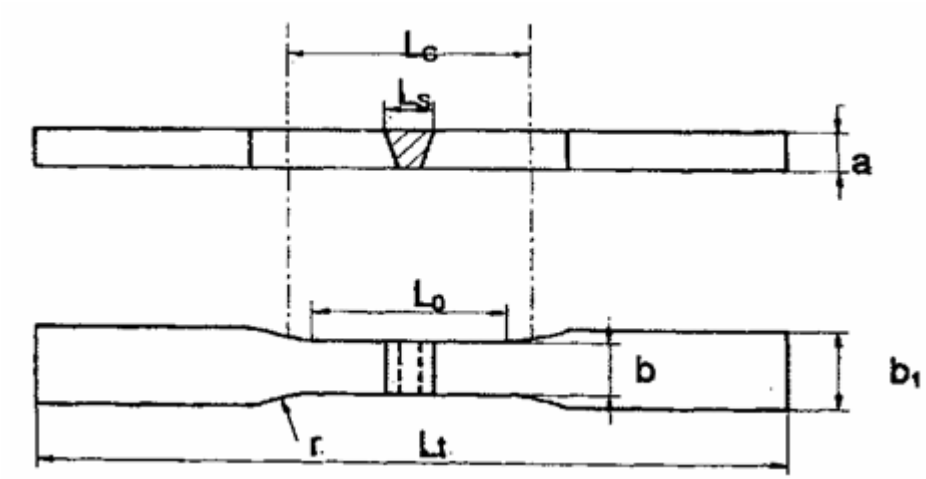
Kaynaklı malzemelere yapılan gerilim giderme ısıl işlemi "Electro Heat TF-7036" makinesinde lokal olarak yapılmıştır. Isıl işlem rejimleri kontrol edilebilir otomatik makine 70 kvA gücüde 6 kanallı 12 termokupel bağlantı kanallı kademeli olarak 1100 ^{0}C'ye kadar ısıtma işlemi yapabilme özelliğine sahiptir. Bilgisayar program ünitesine sahip makine ısıtma hızı, bekleme süresi ve soğutma süresi programlama özelliğine sahiptir. Recorder ünitesi Chino marka olup 12 ayrı noktadan sıcaklık değeri okunmaktadır. Şekil 4.3'de kaynaklı deney numunelerine yapılan ısıl işlemin temsiliği grafiği görülmektedir. Isıtma ve soğutma sırasında tüm sıcaklık farklılıkları ölçüldü ve kaydedilen değerler arasında ± %3 sapma ile ısıl işlem tamamlandı.



Şekil 4.3. Kaynaklı deney numunelerine yapılan ısıl işlemin temsili grafiği

4.9. Çekme Deneyi ve Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada enine çekme deneylerinde kullanılan deney numunelerinin boyutları Şekil 4.4'de ve Tablo 4.6' de açıklanmıştır.



Şekil 4.4. Plakalar için enine çekme deney numuneleri (TS 287 EN 895).

Tablo 4.6. Enine çekme deneylerinde kullanılan gösterimler ve sembolleri (TS 287 EN 895).

Sembol	Kısa Gösterilişler	Boyutlar (mm)	Birim
a	Deney numunesi kalınlığı	Özel deney makinasına uygun şekilde	mm
b	Kalibre edilmiş paralel uzunluğun genişliği	b+12	mm
B1	Baş kısmı genişliği	a < 2 için 12 a > 2 için 25	mm
Lc	Paralel uzunluk	>Ls + 60	mm
Lo	ilk (orjinal) ölçü uzunluğu		mm
Ls	Makina işleminden sonra kaynağın en büyük genişliği		mm
Lt	Deney numunesinin toplam uzunluğu		mm
r	Baş kısmı kavis yarıçapı	>25	mm

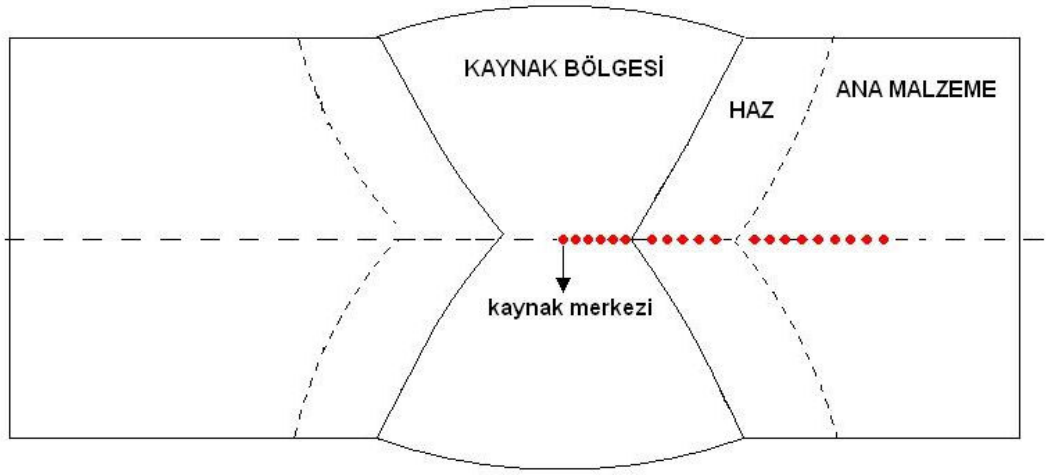
Deney numunesinin kalınlığı (a), paralel uzunluk boyunca sabit olmalıdır. Numunenin kalınlığı ve eni mm cinsinden ölçülür, yük ise Newton cinsinden kayıt edilir. Numune çekme dayanımının 1/4' üne kadar uygun bir hızla çekilmelidir. Eğer kırılma dar bölge dışında oluşursa deney tekrarlanır. Kesit alanı, numune kalınlığı ile genişliğinin çarpımı ile bulunur. Maksimum yük, kesit alanına bölünerek çekme dayanımı kg/mm^2 olarak bulunur.

4.10. Sertlik Deneyi

Vickers sertlik deney'ine göre (TS 207) tepe açısı 136° olan piramit şekilli bir elmas uç kullanılır. Deney yükü 120 kg ağırlığına kadar değişmektedir. Belirli bir yükte malzeme yüzeyine bastırılan batıcı uç bir dörtgen oluşturur ve dörtgenin iki köşegeninin ortalaması alınır. Vickers sertlik değeri, Kg olarak ifade edilen deney yükünün (F), mm^2 olarak ifade edilen izin alanına bölümüdür. Vickers en duyarlı sertlik ölçme yöntemidir, özellikle araştırma amacı ile mikro sertlikleri ölçmeye elverişlidir [38, 40, 42].

Ortalama iz köşegeni (d) = $di + d_2 / 2$

$HV = 1.8544\ F / d^2$

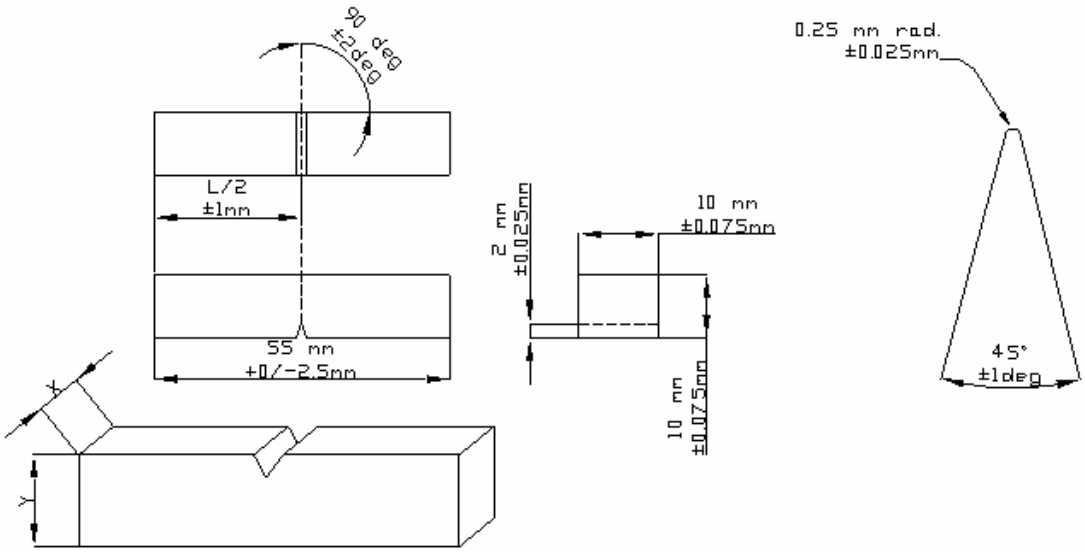


Şekil 4.5. Kaynaklı deney malzemelerinin sertlik deneyleri ölçüm prensibi.

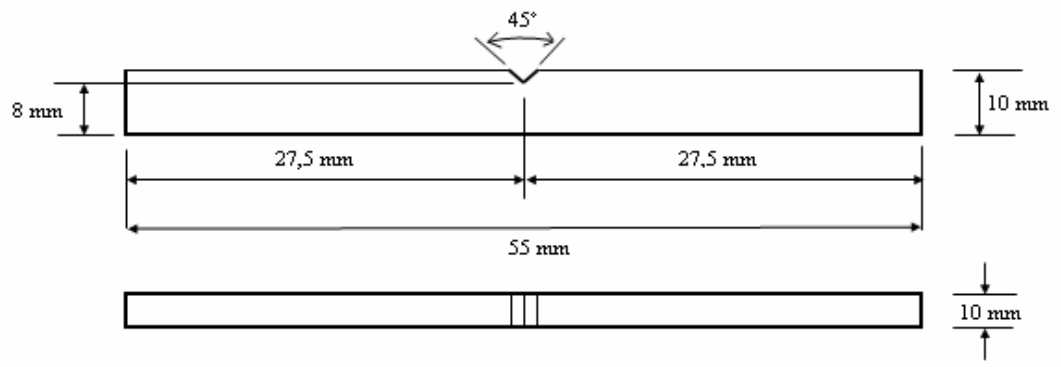
Sertlik numuneleri %97,5 etil alkol ve %2,5 HNO_3 çözeltisinde dağlama işlemi yapıldıktan sonra suyla yıkandı. Etil alkol püstürtüldü ve kurutuldu. Yapılan sertlik ölçüm deneyleri Wolpert 2100 (Instron) cihazında 500 gr. yük uygulanarak alınmıştır. 10 sn. boyunca deney yükü 0'dan 500'gr. kadar artan yükle uygulanmıştır. 500 gr. yükte 3 sn. beklendikten sonra yük sıfıra indirilmiştir. Kaynaklı deney numunelerinin ölçümleri alınan sertlik değerlerinin kesit profili Şekil 4.5'te verilmiştir.

4.11. Darbe Direnci Deneyi

Çentik deneyleri sıfırın altında -40°C'de gerçekleştirildiği için daha iyi sonuçlar alabilmek için şu yöntemler izlendi. Derinliği yaklaşık olarak 150 mm olan bir kabın içine bir sıvı (alkol, aseton,vs.) doldurdu. Kabın tabanından en az 25 mm yukarıda bir ızgara bırakıldı. Sıvının içine daldırılan numune, sıvının üst seviyesinden en az 25 mm altta bulunduruldu. Bütün numuneler banyoda belirtilen sıcaklıkta en az 15 dakika tutuldu ve deneylerden önce deney parçaları ile parçayı tutan çeneler deney sıcaklığına getirildi. Bu işlemden sonra deney parçası hemen deney cihazının üzerine oturtuldu ve kırıldı. Şekil 4.6 ve 4.7'de çentik deney numunelerinin boyutları ve toleransları verilmiştir.



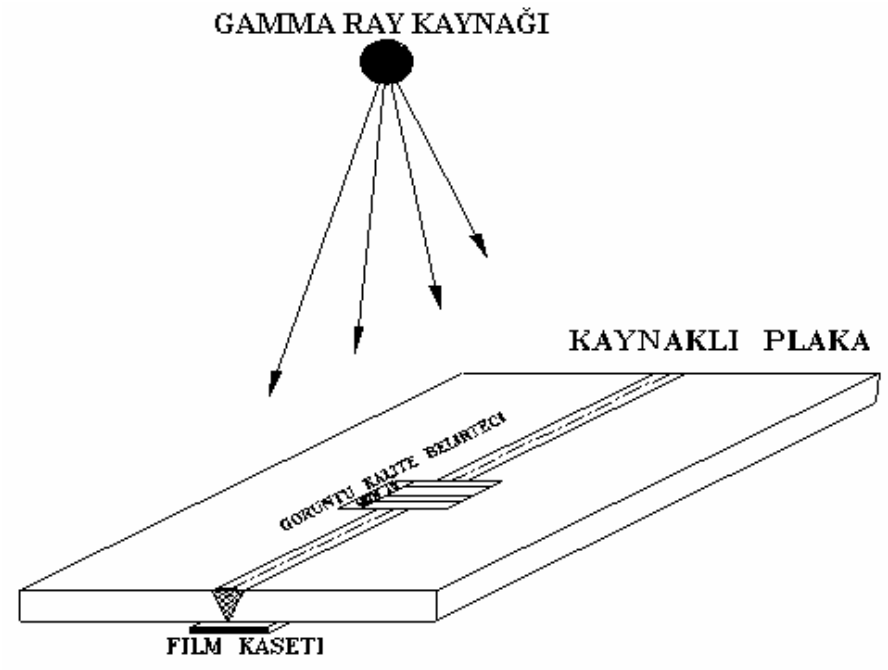
Şekil 4. 6. Çentik deney numunesinin toleransları [36].



Şekil 4. 7. Çentik deney numunelerinin boyutları [36].

4.12. Radyografik Test

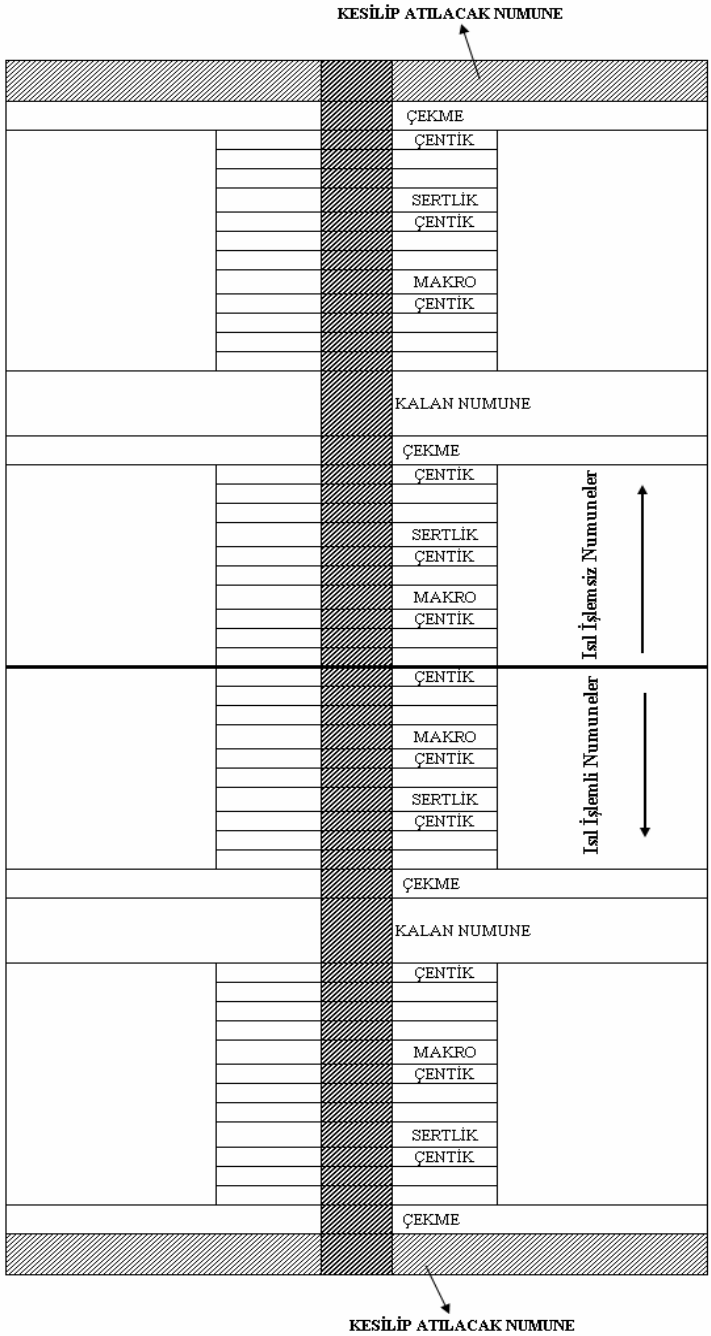
Yapılan işlemleri sonucunda kaynaklı deney numunelerinin figür 1'de görülen düzenek ile Radyografik testleri yapılmıştır. Bu testin amacı kaynak esnasında oluşabilecek; gözenek, cüfuf, yapışmama, yetersiz nüfuziyet gibi herhangi bir hatanın belirlenmesidir. Radyasyon kaynağı olarak İridyum 192 izotopu kullanılmıştır. Test düzeneği American Society of Mechanical Engineers, ASME Bölüm V kısım 2'ye göre yapılmıştır. Sözkonusu standarda göre test' te, Şekil 4.8'de görülen film kasetinde Kodak T200 (Agfa D5) film kalitesi ile yine aynı figürdeki görüntü kalite belirteci olarak ASTM 1B-11 kullanılmıştır [37].



Şekil 4.8. Kaynaklı malzemelerin RT işleminin şematik olarak gösterilmesi [37].

4.13. Deney Numunelerinin İsimlendirilmesi ve Hazırlanması

Yapılan kaynak işlemleri sonucunda ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz deney numunelerin kaynak edilmiş plakadan ASME IX Bölüm II'ye göre Şekil 4.9'dan görüleceği üzere iki adet çekme, dokuz adet çentik, bir adet sertlik, makro ve mikroyapı numuneleri çıkartılmıştır. Tablo 4.7'de yapılan dört farklı kaynak yöntemi, ısıl işlem ve ısı girdisine bağlı olarak deney numunelerinin isimlendirilmesi verilmiştir.



Şekil 4.9. Deney numunelerinin çıkartılmasının şematik olarak gösterilişi.

Tablo 4.7. Deney numunelerinin isimlendirilmesi.

DENEY NUMUNELERİNİN İSİMLENDİRİLMESİ			
Kaynak Prosesi	**Isı Girdisi (kj/cm)**	**Isıl İşlemli**	**Isıl İşlemsiz**
Elektrod Kaynağı (SMAW)	10	WE1HT	WE1
	13	WE2HT	WE2
	16	WE3HT	WE3
	20	WE4HT	WE4
Toz Altı Kaynağı (SAW)	13	WT1HT	WT1
	16	WT2HT	WT2
	20	WT3HT	WT3
	25	WT4HT	WT4
Gaz Altı Kaynağı (FCAW)	13	WG1HT	WG1
	16	WG2HT	WG2
	20	WG3HT	WG3
	25	WG4HT	WG4
Argon Kaynağı (GTAW)	10	WA1HT	WA1
	13	WA2HT	WA2
	16	WA3HT	WA3
	20	WA4HT	WA4

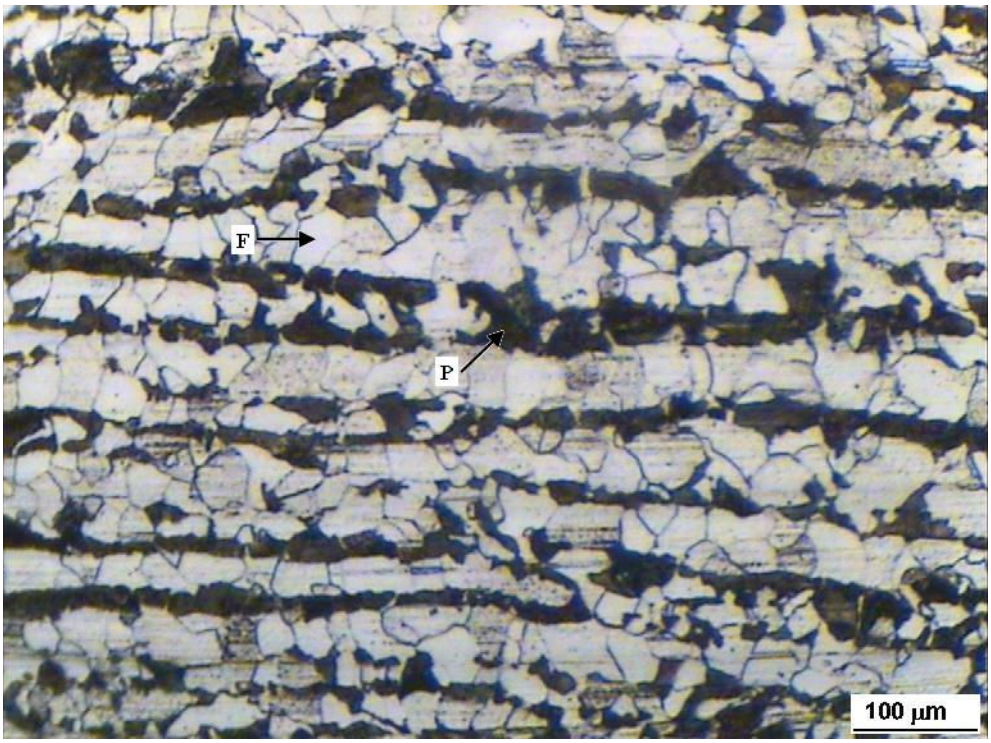
Bölüm 5. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlanması

5.1. Ana Malzemenin Mekanik Karakterizasyonu

Kaynak malzemesi olarak kullanılan SA516Gr70N çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 5.1'de verilmiştir. Mekanik özellikleri ile ilgili yapılan çekme, darbe ve sertlik deneylerinin sonuçları standart sapmaları ile birlikte Tablo 5.2'de verilmiştir. Ana malzemenin mikroyapısı Şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Ana malzemenin kimyasal kompozisyon değerleri.

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	As	sol. Al	Fe
0,2	1,26	0,23	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,006	0,043	Kalan



Şekil 5.1. Ana malzeme optik mikroskop görüntüsü (F=Ferrit; P= Perlit).

Tablo 5.2. Ana malzemenin çekme, darbe ve sertlik deneyi sonuçları.

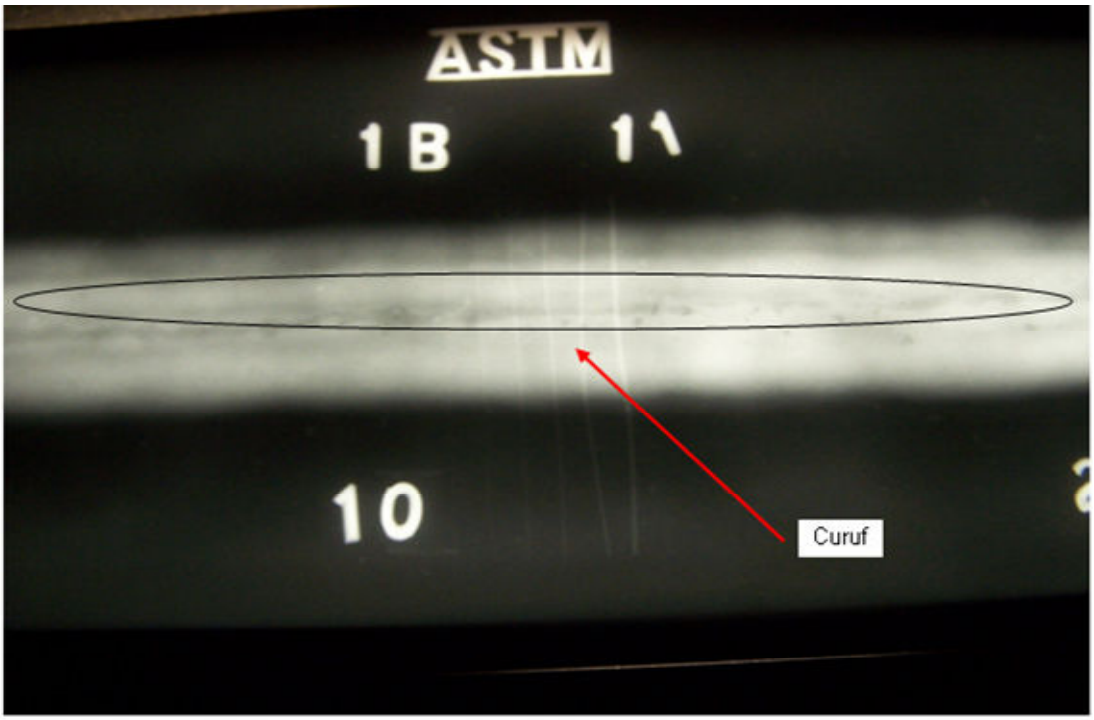
Çekme Muk. (N/mm²)	515 ± 2
Uzama (%)	33 ± 3
Darbe Testi (-40°C, Joule)	105 ± 35
Sertlik (Vickers Hv 0,5)	155 ± 8

Deney malzemesi olarak kullanılan SA516Gr 70N çeliği sıcak haddeleme ile üretilmiş olup düşük karbonlu çeliktir. İnce tane yapılı ve yüksek mukavemetlidir. Mn oranı fazladır ve bu oran mukavemet özelliğinin kazandırması yanında kaynak kabiliyeti iyileştirir. Mikroyapı beyaz bölge ferrit ve siyah bölge perlit fazlarından oluşmaktadır. Mekanik özellikler ve kimyasal kompozisyon ASME bölüm 9 kısım 2'ye göre çekme ve darbe deney sonuçları standartların içinde çıkmıştır.

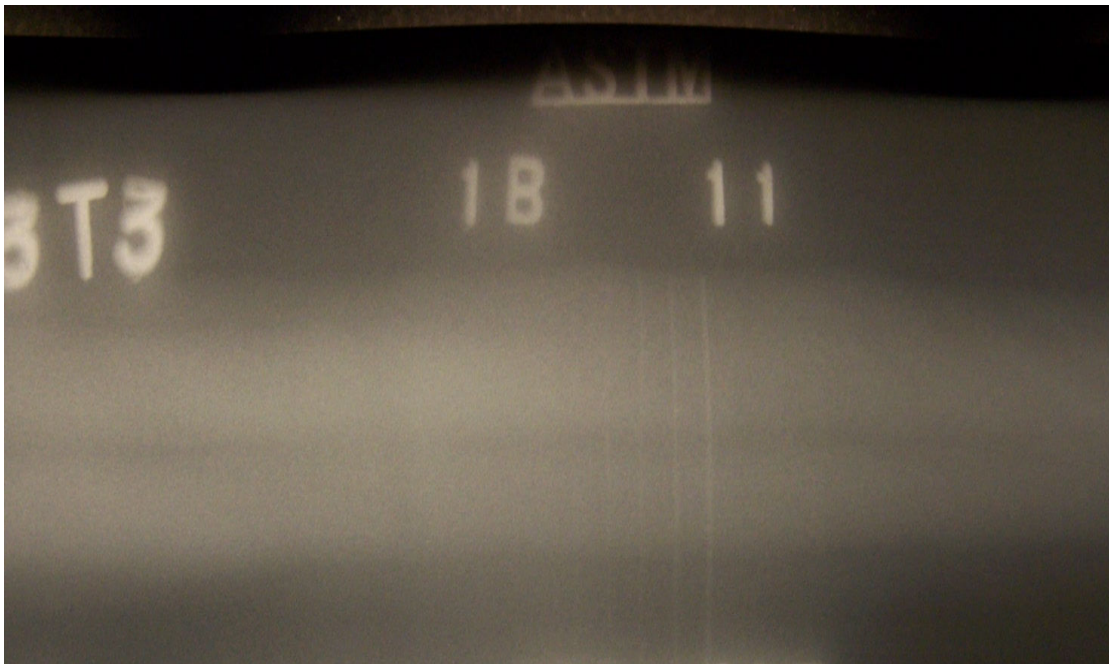
5.2. Radyografik Test

Yapılan kaynak işlemleri sonucunda, tüm deney malzemelerine radyografik test yapılmıştır. ÇİMTAŞ kalite kontrol departmanı tarafından verilen raporlarının özeti Tablo 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.2'de WA1 numunesi 10 kj/cm ısı girdisinde kaynak işleminde yapılan sıralı cüruf hatasının radyografik Gama-ray film gözükmektedir. SAW yöntemiyle kaynağı yapılan WT3 numunesi 20 kj/cm ısı girdisi radyografik film Şekil 5.3'te verilmiştir. Tablo 5.3 ve Şekil 5.3'den görüleceği üzere SAW kaynak prosesleriyle kaynak edilen deney numunelerinin gama-ray filmlerinde hata gözükmemiştir. Aynı zamanda SMAW proseslerinde olduğu gibi SAW kaynak yönteminde de kaynak hataları yapılmamıştır. Tablo 5.3'de FCAW yönteminde WG4 numunesi 25 kj/cm ısı girdisinde yapılan kaynak işlemlerinde yüksek akım ve gerilime karşılık kaynak ilerleme hızının düşük olması ile kaynak banyosu büyük olmuştur. Bunun neticesinde sıralı cüruf hatası meydana gelmiştir. Ayrıca, Şekil 5.11'de makro kesitten görüleceği üzere yüksek ısı girdisinin etkisi ile ergiyen dolgu metalinin büyük olması ile kaynak banyosu boyutunun büyülüğü ile makro kesitte

sıralı cüruf açıkça gözükmektedir. Bunun sonucu olarak 15-40 cm ile 80-90 cm'lik mesafelerde olmak üzere toplam deney numunesi boyunca 35cm. sıralı cüruf hatasından kaçınılamamıştır.



Şekil 5.2. WA1 numunesi radyografik test gama-ray film sonucu.

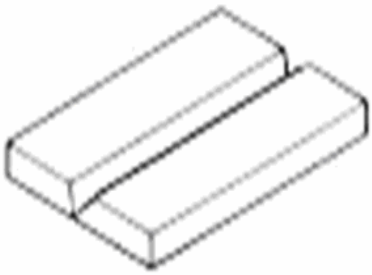


Şekil 5.3. WT3 numunesi radyografik test gama-ray film sonucu.

Tablo 5.3. Kaynak işlemi sonucunda deney numunelerin radyografik test sonucu.

RADYOGRAFİK TEST RAPORU

RAPOR NUMARASI : 755	MALZEME : SA516GR70N
PROSEDÜR : QC-RT-A01 ASME SEC IX QW. 191.2	KAYNAK PROSESİ : SAW, SMAW, FCAW, GTAW
SKEÇ	



Aa : Gözenek
Ab : Kurt Deliği
Ba : Curuf
Bb : Sıralı Curuf
C : Yapışma Hatası
D : Yetersiz Nüfuziyet
Ea : Boyuna Çatlak
Eb : Enine Çatlak
F : Zayıf Birleşme
Fd : Film Hatası
K : Kökte Çukurluk
Ob : Hatasız
R : Tamir
A :Kabul

SIRA NO	FİLM NO	MAL. KALINLIĞI	TEST MESAFESİ		HATA				GERÇEK YOĞUNLUK	SONUÇ
					YER		UZUNLUK	DEĞERLENDİRME		
1	WT1	22	0	120	0	0	0	Ob	2,97	A
2	WT2	22	0	120	0	0	0	Ob	3,05	A
3	WT3	22	0	120	0	0	0	Ob	3,5	A
4	WT4	22	0	120	0	0	0	Ob	2,6	A
5	WG1	22	0	120	0	0	0	Ob	2,54	A
6	WG2	22	0	120	0	0	0	Ob	2,53	A
7	WG3	22	0	120	0	0	0	Ob	2,57	A
8	WG4	22	0	40	15	40	25	Bb	2,56	R/A
9	WG4	22	35	75	0	0	0	Ob	2,58	A
10	WG4	22	70	120	80	90	10	Bb	2,6	R/A
11	WE1	22	0	120	0	0	0	Ob	2,91	A
12	WE2	22	0	120	0	0	0	Ob	2,94	A
13	WE3	22	0	120	0	0	0	Ob	2,91	A
14	WE4	22	0	120	0	0	0	Ob	2,7	A
15	WA1	22	0	40	0	40	40	Bb	2,58	R
16	WA1	22	40	70	45	55	10	Bb	2,59	R/A
17	WA1	22	70	108	70	100	30	Bb	2,63	R
18	WA2	22	0	120	0	0	0	Ob	2,63	A
19	WA3	22	0	75	0	0	0	Ob	2,54	A
20	WA3	22	75	95	75	80	5	Bb	2,48	R
21	WA4	22	0	100	0	0	0	Ob	2,61	A

GTAW yönteminde radyografik testlerin sonucuna göre WA1 deney numunesinde 10 kj/cm ısı girdisi ile yapılan çalışmada düşük akım ve gerilim nedeniyle numunenin 0-108 cm boyunca toplamda 80 cm boyunca cüruf hatasına

rastlanmıştır. Bunun nedeni olarak akımın düşük olması düşünülmektedir. WA3 deney numunesi 16 kj/cm ısı girdisinde 75-80 cm aralığında 5 cm curuf bölgesi gözlemlenmiştir. Bu bölgede kaynak işleminin tungsten torç ile tel elektrodu koruyucu gaz argonun etkisi dışına bırakarak dolgu metalini erittiği anlaşılmaktadır.

5.3. Makroyapı Resimleri

Isı girdisinin ITAB'a ve kaynak dikişi genişliğine etkisini saptamak amacıyla her bir proses için yapılan kaynak işlemleri sonucunda ITAB'ın, kaynak dikişinin genişliği dağlanmış numuneler üzerinden dijital kumpas ile 3 adet ölçüm alınmış ve bunların ortalamaları alınarak Tablo 5.4 ve 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Isı girdisine bağlı olarak kaynak dikiş genişliğinin değişimi (mm).

Numune Adı	Isı Girdisi (kj/cm)				
	10	13	16	20	25
WT		28,97	30,42	31,08	32,66
WA	27,77	26,49	29,30	28,25	
WG		38,15	36,89	37,05	40,01
WE	28,11	26,72	30,14	31,69	

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda artan ısı girdisinin tüm kaynak proseslerin de dikiş genişliğini etki ettiği Tablo5.4 görülmektedir. 13kj/cm, 16 kj/cm ve 20 kj/cm ısı girdilerinde en düşük dikiş genişliği GTAW yöntemlerinde ve en büyük dikiş genişliği ise FCAW proseslerinde elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak dikiş genişliği etki eden birinci faktör gerilim GTAW proseslerinde düşük ve buna karşılık FCAW proseslerinde ise büyük olmasıdır. Ayrıca, SAW proseslerinde ise yine aynı şekilde yüksek gerilim değerlerinde çalışıldığı için dikiş genişliği FCAW prosesinde olduğu gibi yüksek çıkmaktadır. GTAW proseslerinde dolgu malzemesi daha çok kaynakçı kontrolünde olduğu ve dolgu metali elle verildiği için dikiş genişliği yeteri kadar olmakta ve iyi ayarlanmaktadır. Bu proseste Şekil 5.16, 5.17'den görüleceği üzere elle verilen dolgu metali salınımlı paso olduğundan proses gereği çizgisel paso yoktur. Diğer proseslerde ise çizgisel paso vardır (Şekil 5.8, 5.12). FCAW yönteminde kaynak ilerleme hızının yüksek olması kaynak banyosunun kontrolünü sağlanamamasına ve dikiş genişliğinin fazla çıkmasına sebep olmuştur. Kaynak banyosu SAW yönteminde tozun altında kaldığı için dikişin

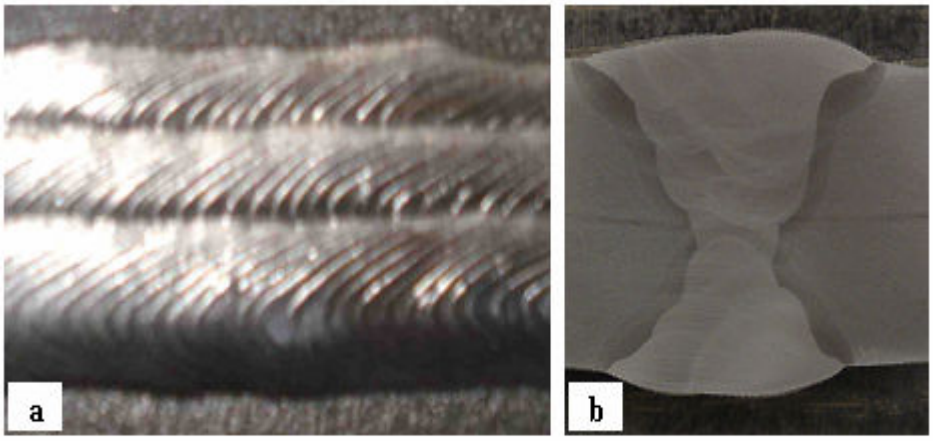
genişliğini ayarlamak zordur. SMAW kaynak yönteminde ise dikiş genişliği bir miktar kaynakçının el hareketine azda olsa bağlıdır. En düşük ısı girdilerinde SAW, FCAW ve GTAW kaynak yöntemlerinde kaynak ağzının doldurulması için daha yüksek ısı girdilerine göre kapak pasoda bir adet fazla atılmıştır. Bu nedenle düşük ısı girdilerinde bu yöntemlerde dikiş genişliği biraz fazla çıkmaktadır.

Tablo 5.5. Isı girdisine bağlı olarak ITAB'ın genişliği (mm).

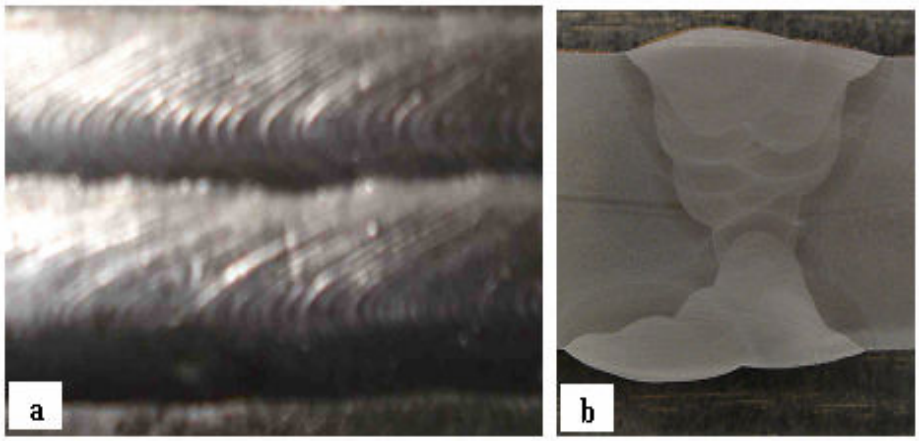
Numune Adı	Isı Girdisi (kj/cm)				
	10	13	16	20	25
WT		2,15	2,48	3,04	3,41
WA	1,75	2,03	2,35	2,71	
WG		2,41	2,73	3,19	3,70
WE	1,57	2,21	2,40	3,03	

Isı girdisinin ITAB'ın genişliğine etkisini saptamak amacıyla her bir proses için yapılan kaynak işlemleri ve ölçümler sonucunda tüm kaynak proseslerinde artan ısı girdisine bağlı olarak ITAB genişlikleri artmaktadır. Tablo 5.5'den görüleceği üzere tüm ısı girdilerinde prosesler kıyaslandığında ITAB genişlikleri en düşük GTAW prosesinde en büyük ise FCAW proseslerinde gerçekleşmiştir. Bunun nedeni olarak GTAW kaynak yöntemlerinde doldu metalini eritmesi gereken akım miktarından arda kalan akımın az olduğu ve ana malzemeye etkisini az olduğu düşünülmektedir. Fakat, FCAW proseslerinde dolgu metali çapına göre akım ve volt yüksektir. Yeterli enerji dolgu metalini erittikten sonra geriye kalan akım ve volt miktarı ısı olarak ana malzemeye etki etmekte bunun sonucu olarak ITAB'ın genişliğini artırmaktadır. Aynı zamanda kaynak ilerleme hızının yüksek olması diğer bir etken olarak görülmektedir. SAW ve SMAW proseslerinde yapılan kaynaklar sonucunda ITAB genişlikleri gaz altı kaynak prosesleri değerleri arasında çıkmaktadır.

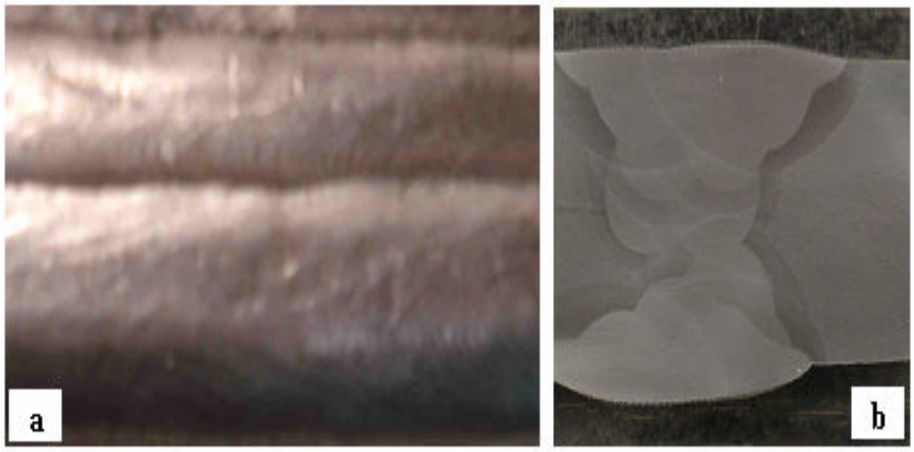
Yapılan kaynak işlemleri sonucunda Şekil 5.4 ile 5.19 arasında optik mikroskopta alınan makro görüntüleri ile üstten dikiş fotoğrafları gözükmektedir. Ayrıca, Şekil 5.4-5.19 verilen fotoğrafların özeti ve açıklaması Tablo 5.6'da verilmiştir.



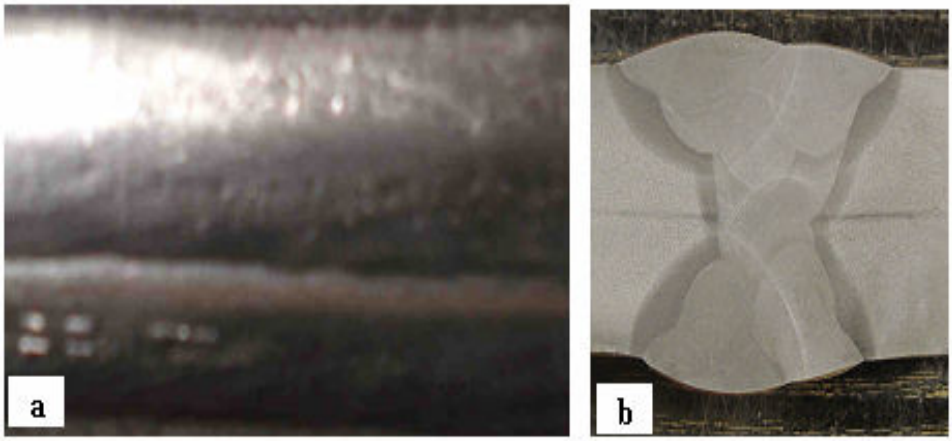
Şekil 5.4. WT1 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı.



Şekil 5.5. WT2 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

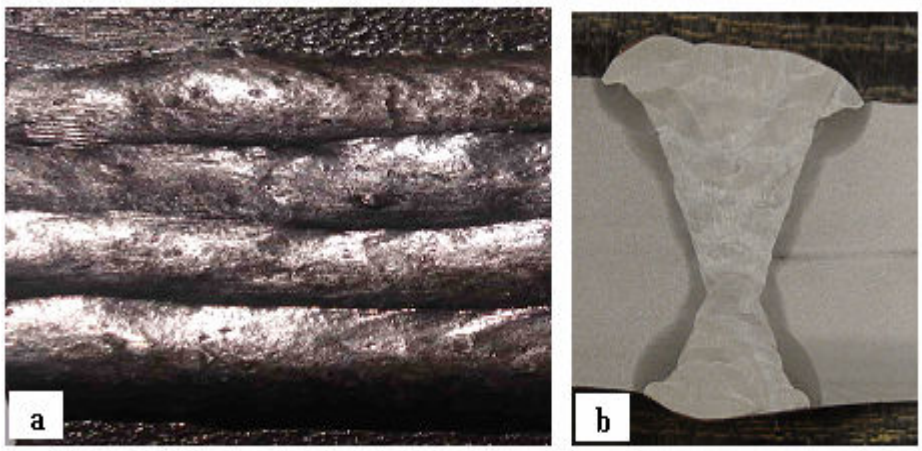


Şekil 5.6. WT3 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

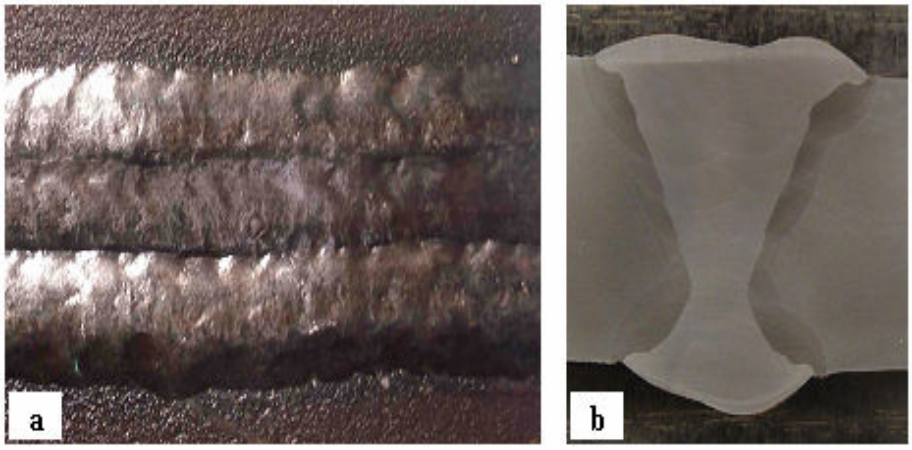


Şekil 5.7. WT4 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

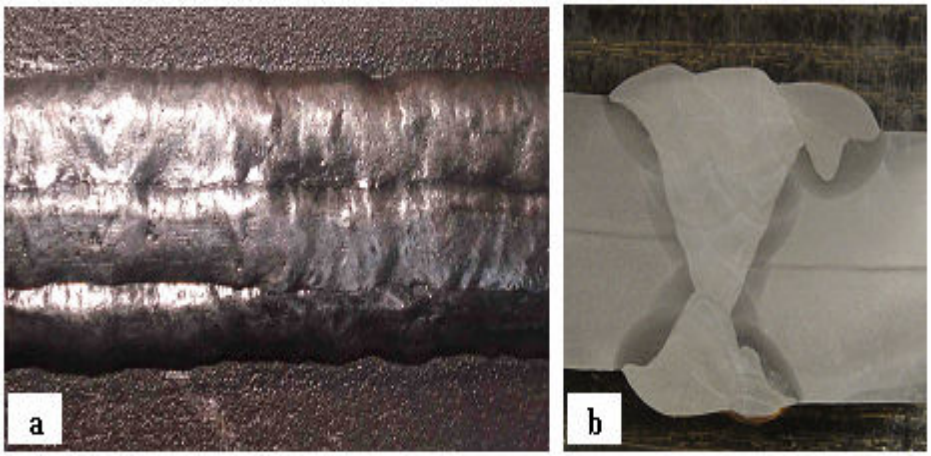
SAW kaynak prosesleri ile kaynağı yapılan deney numunelerinin Şekil 5.4-5.7'den makro ve dikiş fotoğraflarından görüleceği üzere tam nüfuziyet sağlanmıştır. WT1 numunesi 13 kj/cm ısı girdisinde dikiş yapısı incelendiğinde akıma göre kaynak ilerleme hızının küçük olduğu düşünülmektedir. Kaynak ilerleme hızının düşük olması ve Şekil 5.4'te hızlı soğuma neticesinde kaynak dolgu metali ergimesine bağlı olarak soğuma izleri açıkça gözükmektedir. WT2 numunesi 16 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.5'te makro kesitten görüleceği üzere alt tarafta olası bir hatayı engellemek için bir paso fazla atılmıştır. WT2 numunesi dikiş yapısında ise ısı girdisinin artması ve katılaşma hızının yavaşlaması ile soğuma izlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. WT3 numunesi 20 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.6'da görüleceği üzere kaynak parametreleri uygundur, soğuma izleri yoktur. Fakat, makroyapı kesitinde alt tarafta bir paso fazladan atılmıştır ve kaynak bölgesi ortasında dolgu metali elektrod ucunu malzemeye fazla bindirme yaparak ITAB'ın bu bölgede ana malzemeye doğru genişlemesi açıkça görülmektedir. WT4 numunesi 25 kj/cm ısı girdisi ile yapılan kaynak işlemi sonucunda Şekil 5.7'de makroyapı ve dikiş genişliği fotoğrafları gözükmektedir ve bu görüntülerden anlaşılacağı üzere kaynak parametreleri uygundur. Kaynak ısı girdisine bağlı olarak makro kesitlerden görüleceği üzere kaynak banyosunun büyüklüğü artmaktadır.



Şekil 5.8. WG1 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı



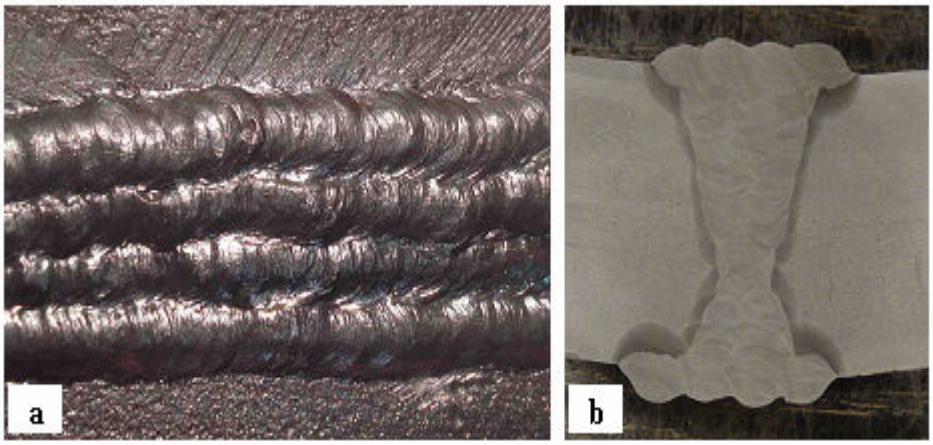
Şekil 5.9. WG2 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı



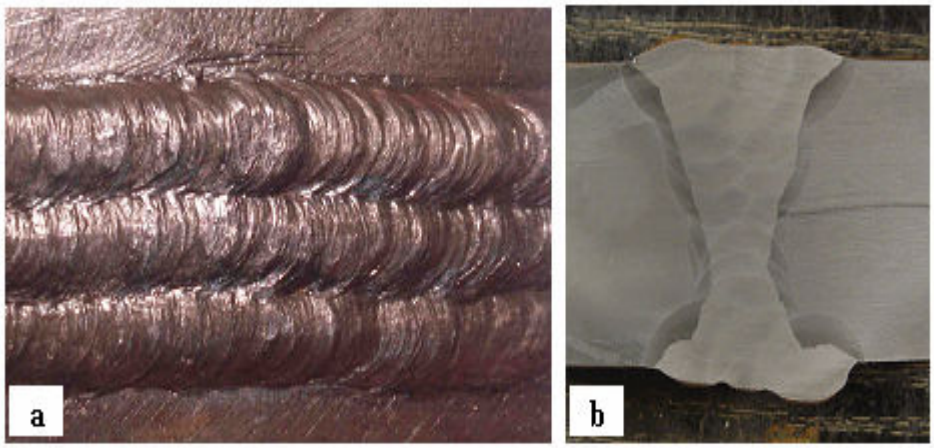
Şekil 5.10. WG3 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

Şekil 5.11. WG4 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

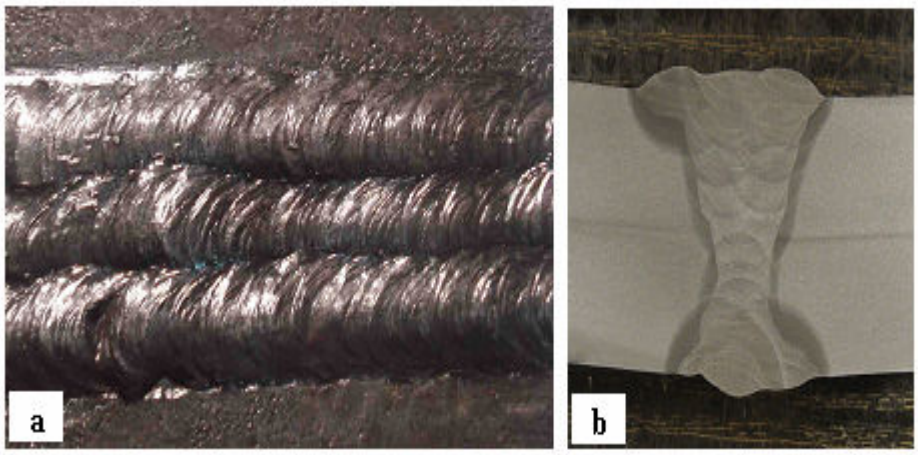
FCAW kaynak prosesleri sırasında kaynağı yapılan deney numunelerde yeterli nüfuziyet sağlanmıştır. WG1 numunesi 13 kj/cm ısı girdisinde akıma göre hızın büyük olması pasolar arasında geçişleri çok belli ettiği Şekil 5.8'de görülmektedir. Makro kesitte üst kapakta bir paso fazla atılarak yüksekliğin fazla oluğu görülmektedir. WG2 numunesi 16 kj/cm kaynak işlemlerinde parametrelerin uygun olduğu Şekil 5.9'da dikiş yapısında görülmekte ve nüfuziyet sağlanmıştır. Makro kesitte üst sağ tarafta bir paso fazla atıldığı görülmektedir. WG3 numunesi 20 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.10'da dikiş fotoğrafından görüldüğü gibi kaynak parametreleri uygundur. Fakat makro kesitte üst sağ tarafta bir fazla kapak paso atılmıştır. Kaynakçı dolgu metali elektrodun ucu ana malzeme arasındaki mesafeyi kısa tuttuğu için ITAB etkilenmiştir, ana malzemeye ısı fazladan girmiştir. WG4 numunesi 25 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.11'de görüleceği üzere akıma göre hızın düşük olması neticesinde dolgu metali ergimesi kontrol edememiş ve bunun sonucu olarak kaılaşma banyonun dışına gerçekleştiği açıkça gözükmektedir. Soğuma sırasında dolgu metali katılaşması ile dikişte büyük izler oluşturmuştur. Isı girdisinin yüksek olması kaynak banyosunu büyük olmasına sebep olmuştur ve kaynak hatası cüruf makro kesitte dolgu metali içinde ITAB'ın hemen yanında gözlemlenmektedir.



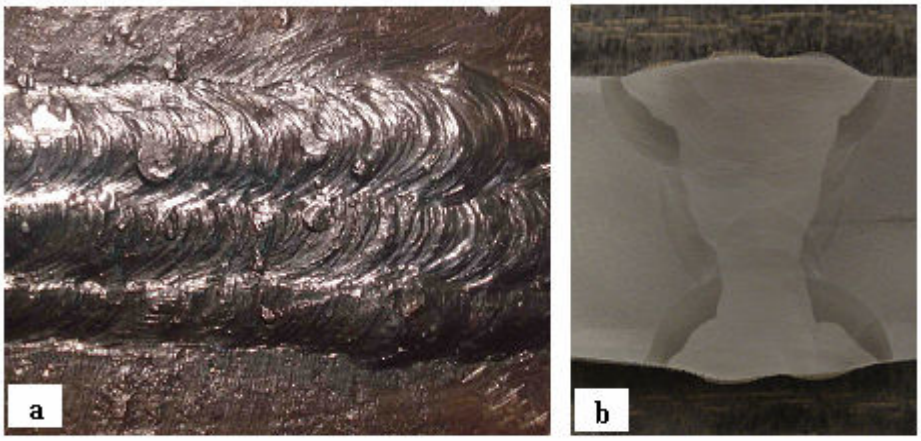
Şekil 5.12. WE1 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı



Şekil 5.13. WE2 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

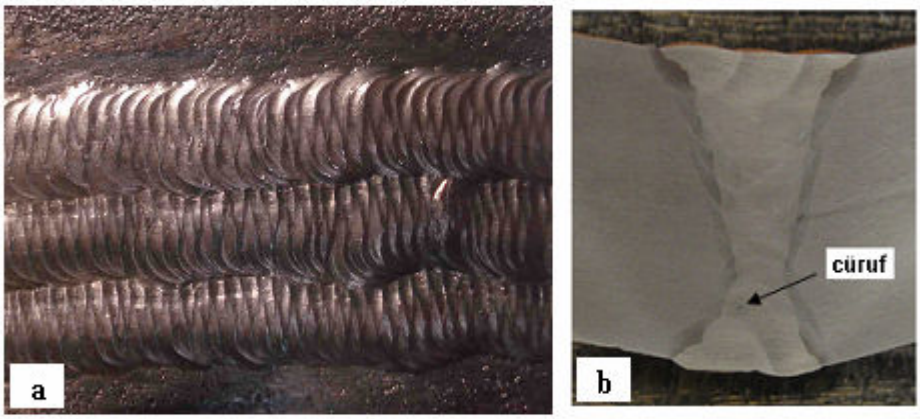


Şekil 5.14. WE3 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

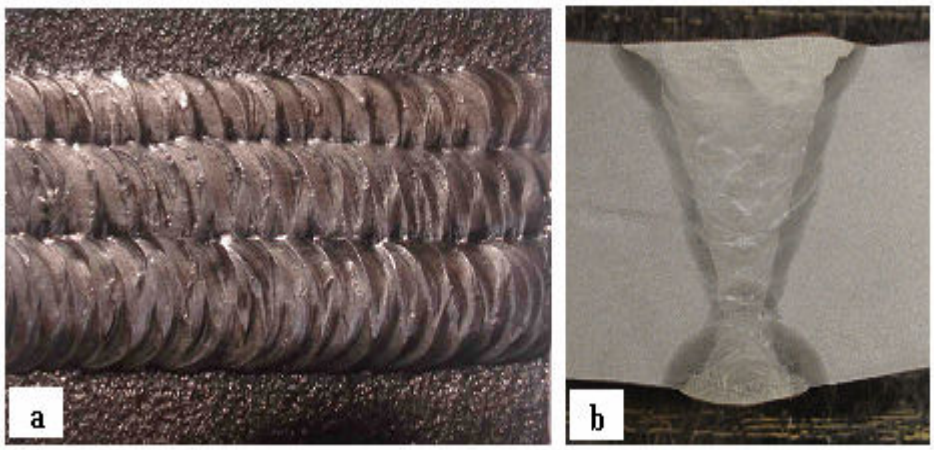


Şekil 5.15. WE4 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

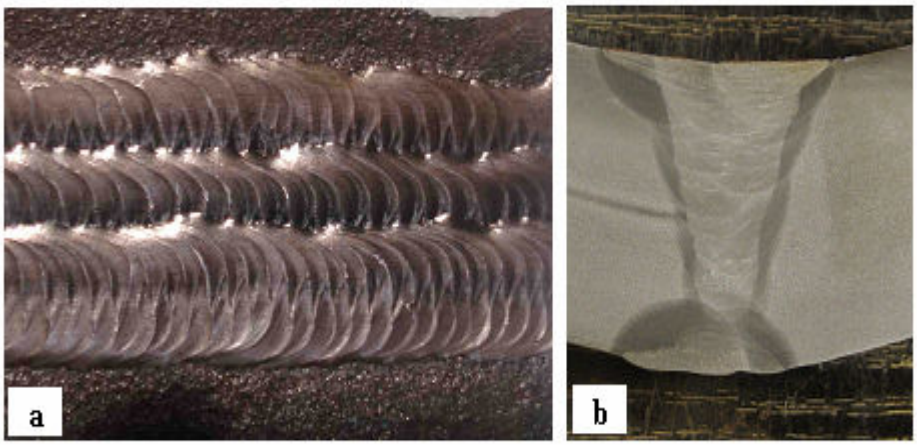
SMAW kaynak prosesleri ile yapılan deney numunelerinde tam nüfuziyet sağlanmıştır. WE1 numunesi 10 kj/cm ısı girdisi ile yapılan deney numunelerinde Şekil 5.12'den görüleceği üzere kaynak ilerleme hızının akım ve gerileme göre büyük olması sebebiyle dikişte pasolar arası geçiş belirgin olmaktadır. Kaynak parametreleri uygun değildir. Makroyapı fotoğrafından görüleceği üzere sol alt tarafta bir paso fazladan atılmıştır. WE2 numunesi 13 kj/cm ısı girdisi ile yapılan kaynak işlemleri sonucunda Şekil 5.13'ten görüldüğü gibi kaynak parametreleri uygundur. Makroyapı fotoğrafında alt sağ tarafta bir paso fazladan atılmıştır. WE3 numunesi 16 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.14'te görüldüğü gibi kaynak parametreleri ve makroyapı uygundur. WE4 numunesi 20 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.15'te dikişin yan tarafında yanma çentiği var. Akımın yüksek kaynak ilerleme hızının düşük olması ile kaynak düzensiz, sıçrantı çok ve düşük soğuma hızı nedeni ile dolgu metali soğuma izlerinde dağınıklık söz konusudur. Kaynak parametreleri uygun değildir.



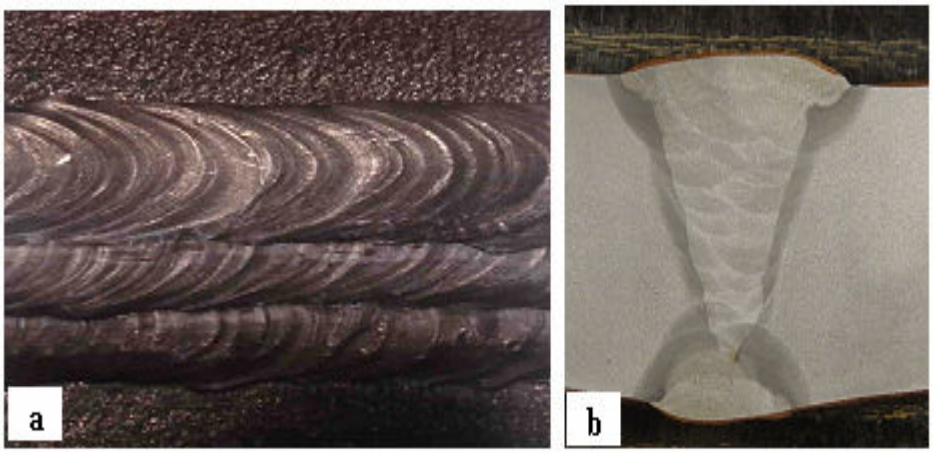
Şekil 5.16. WA1 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı



Şekil 5.17. WA2 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı



Şekil 5.18. WA3 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı



Şekil 5.19. WA4 numunesi üstten (a) dikiş yapısı ve (b) makroyapı fotoğrafı

Tablo 5.6. Kaynaklı numuneleri dikiş ve makroyapı görüntülerinin açıklanması

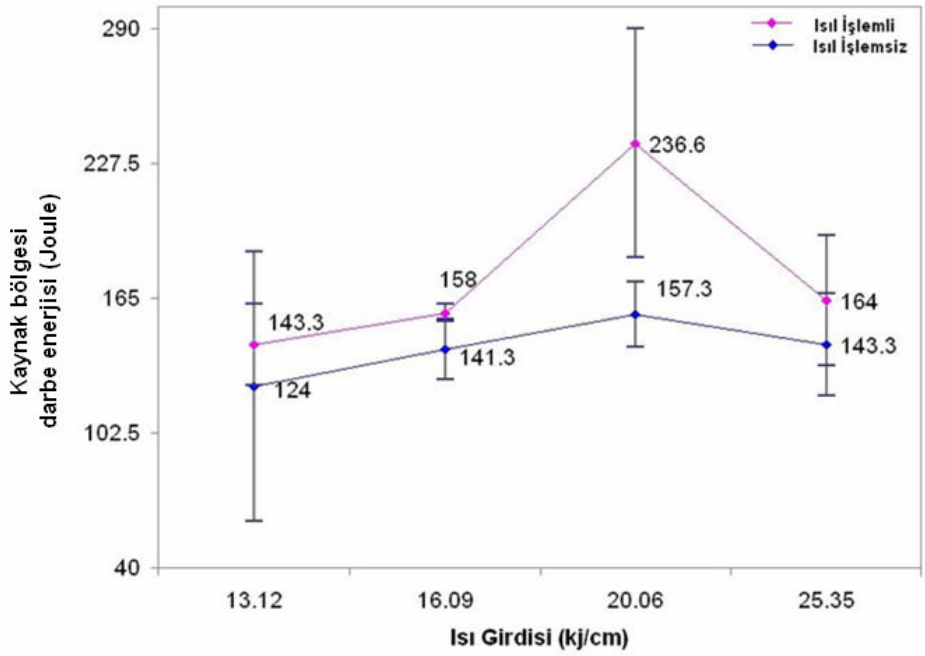
Numune Adı	**Isı Girdisi (kj/cm)**	**Dikiş Yapısı**	**Makroyapı**
WT1	13	Ampere göre hız çok düşük	Uygun, nüfuziyet sağlanmış
WT2	16	Ampere göre hız düşük	Tam nüfuziyet sağlanmış, alt tarafta gereksiz 1 paso kaynak sırasında olası bir hatayı gidermek için atılmış.
WT3	20	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış, alt tarafta gereksiz 1 paso kaynak yapılmış ve kaynak banyosu büyük
WT4	25	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış
WG1	13	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış, üst tarafta kapak yüksekliği fazla
WG2	16	Uygun parametreler	Nüfuziyet sağlanmış, üst tarafta kapakta hatayı örtmek için 1 paso fazla kaynak yapılmış
WG3	20	Uygun parametreler	Nüfuziyet sağlanmış, üst tarafta kapakta hatayı örtmek için 1 paso fazla kaynak yapılmış
WG4	25	Parametreler uygun değil, kaynak banyosu kontrol edilememiş	Nüfuziyet sağlanmış, düzensiz makroyapı, kaynak banyosu büyük ve ITAB bölgesinde cüruf var.
WE1	10	Parametreler düşük, pasolar arası geçişler çok belli	Tam nüfuziyet sağlanmış, alt tarafta gereksiz 1 paso kaynak yapılmış
WE2	13	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış
WE3	16	Dikişin yan tarafında yanma çentiği var, amper yüksek	Tam nüfuziyet sağlanmış
WE4	20	Amper yüksek, sıçrantı çok kaynak düzensiz	Tam nüfuziyet sağlanmış
WA1	10	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış
WA2	13	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış
WA3	16	Uygun parametreler	Tam nüfuziyet sağlanmış
WA4	20	Soğuma izleri uzamış, kaynak hızı yüksek	Nüfuziyet yeterli ama çok iyi değil, yan cidarda yapışmama var.

GTAW kaynak prosesleri WA1 numunesi 10 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.16'dan görüleceği üzere hızlı katılaşma sonucunda soğuma izleri açıkça görülmektedir. Tablo 5.3'te radyografik test raporlarında belirtilen cüruf hatası makro kesitte açıkça gözükmektedir. Şekil 5.17'de WA2 numunesi 13 kj/cm ısı girdisine göre yapılan

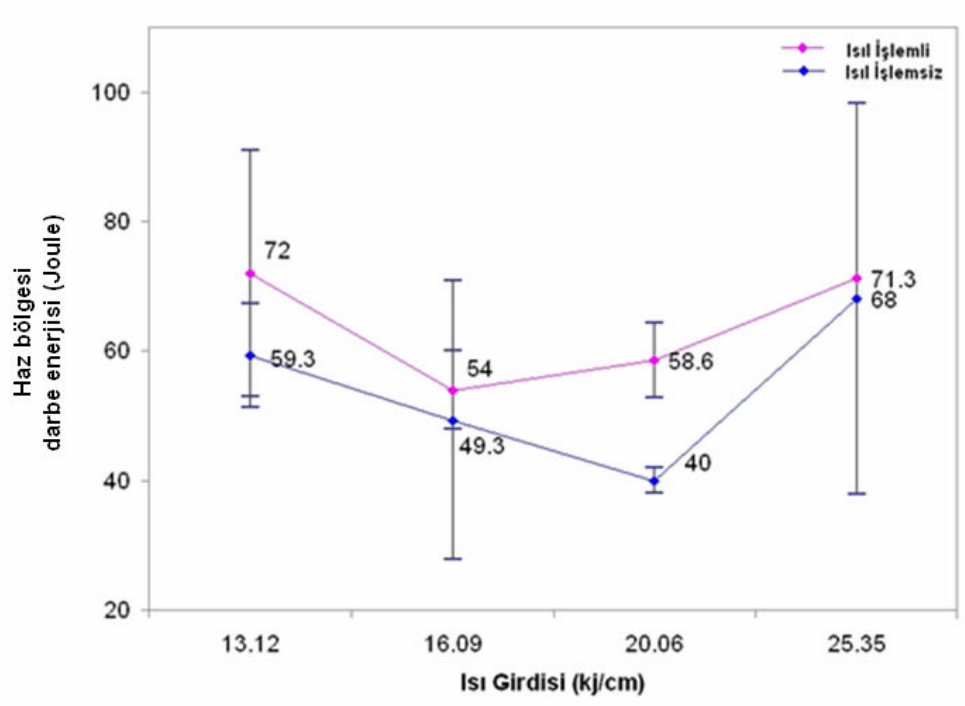
kaynak deney numunelerinde soğuma izleri azalmıştır ve makro kesitte az miktarda distorsiyon görülmektedir. WA3 numunesi 16 kj/cm'lik ısı girdilerinde yapılan kaynak işlemlerinde Şekil 5.18'den görüleceği üzere tam nüfuziyet sağlanmıştır. WA4 numunesi 20 kj/cm ısı girdisinde akımın yüksek olması sebebiyle dolgu metali katılaşma sırasında soğuma izleri uzamıştır. Şekil 5.19'da makro kesit fotoğrafından görüleceği üzere sağ üst tarafta bir paso fazladan atılmıştır. Ayrıca, alt tarafta sağ yan cidarda birleşme kaynak hatası gözükmektedir. Bunun nedeni olarak bu bölgede dolgu metali tel elektrod kaynak banyosunda yeterli mesafede tutulması olarak düşünülebilir.

5.4. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları

Dört farklı kaynak yöntemiyle kaynağı yapılan malzemelerin kaynak bölgesi, ana malzeme (değişime uğramamış bölge) ve ITAB bölgesinden alınan numunelerin çentik deneyleri -40°C'de yapılmıştır. Şekil 5.20-5.32'de kaynağı yapılarak ısıl işleme tabi tutulmuş ve ısıl işlem yapılmadan elde edilen numunelerin ısı girdisine bağlı olarak çentik darbe enerji değişimi verilmiştir.

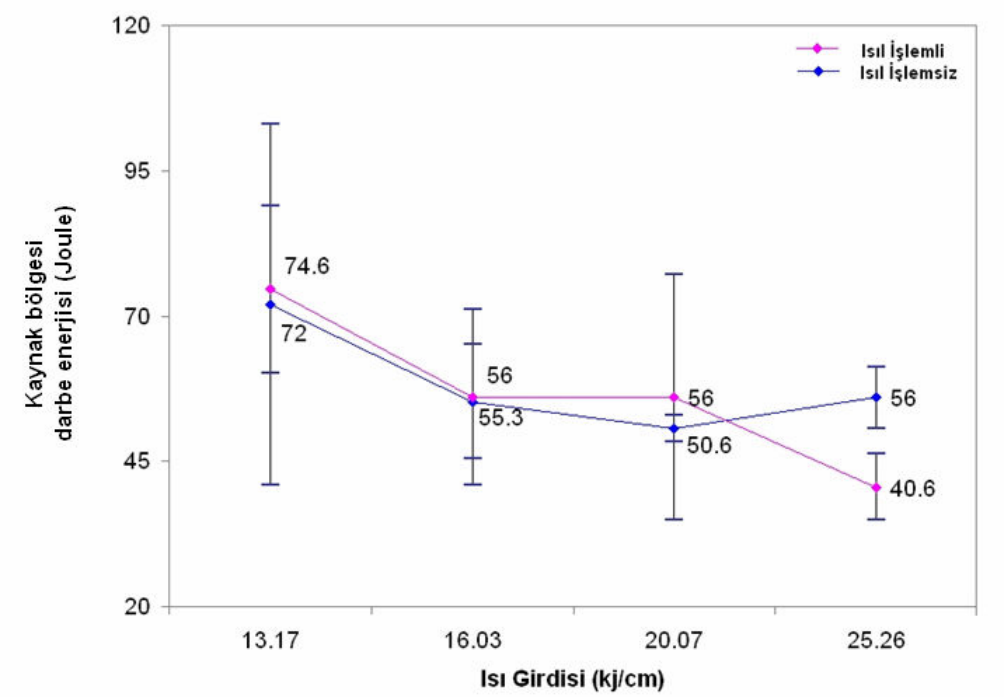


Şekil 5.20. SAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.

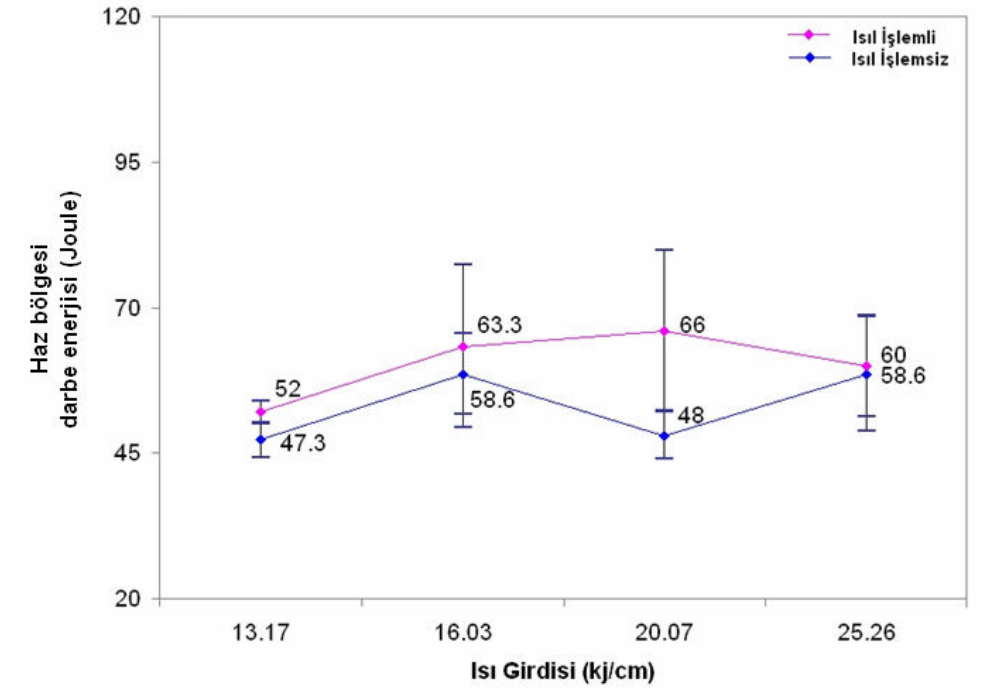


Şekil 5.21. SAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.

Şekil 5.20'de SAW kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklar sonucunda kaynak bölgesinde 13, 16, 20 ve 25 kj/cm ısı girdilerinde en düşük tokluk değeri 124 joule ile en düşük ısı girdisinde bulunmuştur. Bunun sebebi olarak en düşük ısı girdisinde hızlı soğuma ile oluşan fazların sonucu düşünülmektedir. Isıl işlemli ve ısıl işlemsiz numuneler arasında belirgin bir farklılık görülmekte olup, ısıl işlem sonucunda kaynak sırasında oluşan artık gerilimlerin giderilmesi ile tokluk artmaktadır. Tablo 5.2'de verilen ana malzeme tokluk değerlerine göre kaynak işleminden sonraki tokluk değerlerinin artışının sebebi kaynak dolgu metalinin ana malzemeden daha üstün mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Aynı zamanda soğuma hızının buna etkisi olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.20'de görüleceği üzere ısı girdisi arttıkça tokluk değeri artmaktadır. 20 kj/cm değerinden sonra tokluk değeri bir miktar azalmaktadır. Şekil 5.21'de ısı girdisinin artması ile ITAB'ın tokluk değerleri 20 kj/cm değerine kadar azalma göstermiştir. Bunun nedeni olarak artan ısı girdisi ile bir miktar enerjinin ITAB'ı etkilemesi ve genişliğini artırması ile deney numunelerinin ITAB'ın alt bölgesi olan kaba taneli bölgeden alındığı düşünülmekte olup aynı zamanda ferrit ve perlit gibi fazların irileşmesi düşünülmektedir. 25kj/cm ısı girdisinde ise deneyler sonucunda standart sapma fazla olmasına karşılık bir miktar artış vardır.



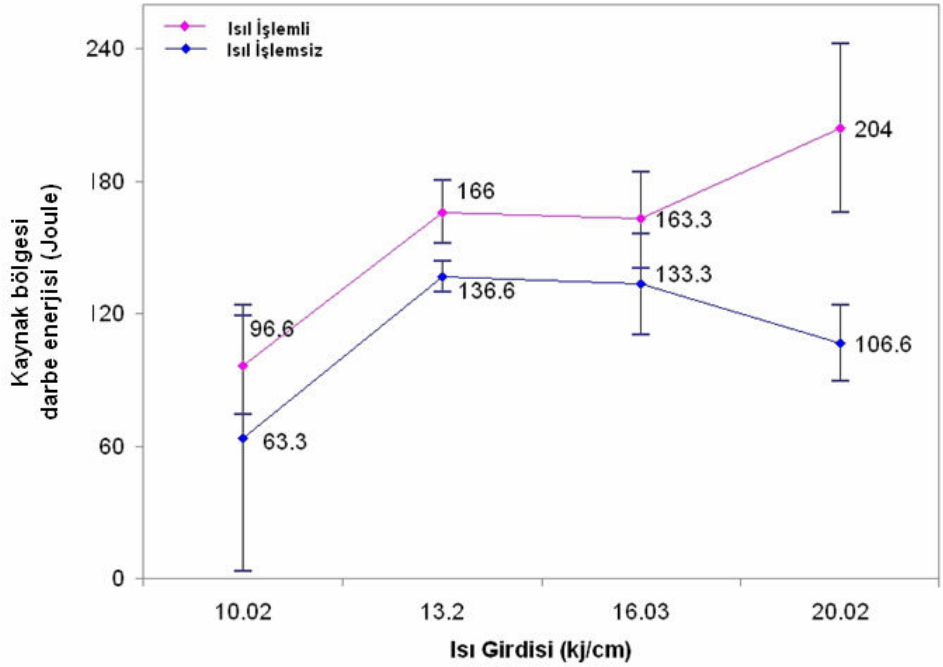
Şekil 5.22. FCAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.



Şekil 5.23 FCAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.

FCAW kaynak yöntemlerinde ise Şekil 5.22'de göre kaynak bölgesinin tokluk değerleri ısı girdisi arttıkça azalma görülmektedir. Bunun nedeni olarak dolgu metali elektrod çapının küçük olması ve gerekli yeterli enerjiden daha yüksek ısı

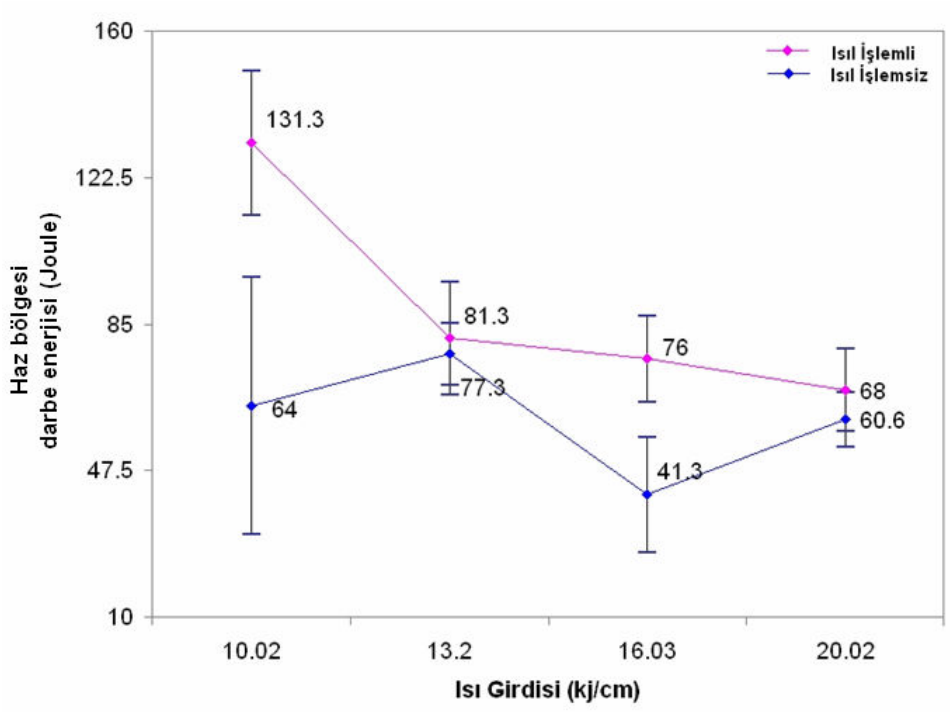
girdilerinde çalışılması sebebiyle mikroyapıda gevrek fazların teşkil olması öngörülmektedir. Diğer bir etkende koruyucu gazın kaynak banyosunu dış etkenlerden korunması tam olarak sağlayamaması düşünülmektedir. FCAW yöntemi ITAB bölgesi tokluk değerlerinin Şekil 5.23'ten görüleceği üzere genel olarak bir değişiklik görülmemiştir. Bunun nedeni olarak yüksek enerji girişi nedeniyle mikroyapıda mevcut olan martenzit ve widmanstaten ferrit (Şekil 5.44,5.46 ve 5.48) gibi fazların var olduğu düşünülmektedir.



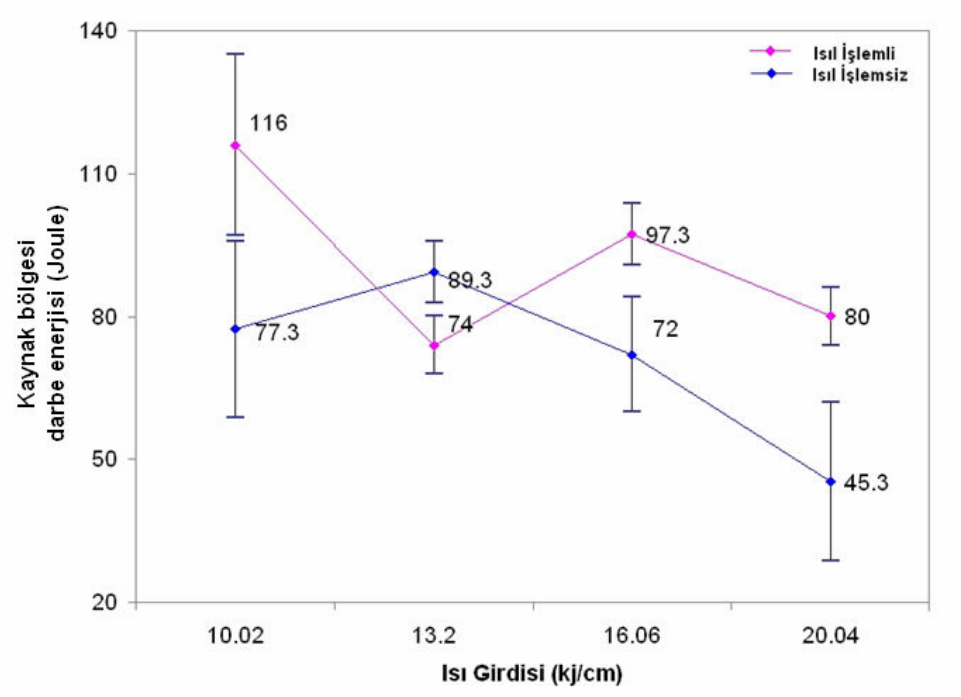
Şekil 5.24. GTAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.

GTAW yöntemlerinde kaynak işlemleri sonucunda yapılan ısıl işlemi ile kaynak ve ITAB bölgesinde bulunan sert fazların gerilimlerin giderildiği ve ısıl işlemli numunelerin tokluğunda belirgin bir artış olduğu Şekil 5.24, 5.25'den görülmektedir. Isı girdisi arttıkça kaynak bölgesi tokluk değeri artmaktadır (Şekil5.24). Bunun nedeni olarak artan ısı girdisi ile soğuma hızının yavaşlaması düşünülmektedir. Aynı zamanda yapılan kaynakların çoklu pasolar ile yapılması ve üst üste bir çok paso ile kaynak ağzının doldurulması ile üst pasolarda kaynak işlemi sırasında alt pasolarda yapılan kaynaklı bölgelere ısının az iletimi sonucu bu bölgelerdeki fazlarda yumuşama (tavlama işlemi) meydana gelmektedir. 10 kj/cm ısı girdisinde Tablo 5.3 ve Şekil 5.2'den görüleceği üzere akımın çok düşük olması sonucu kaynak

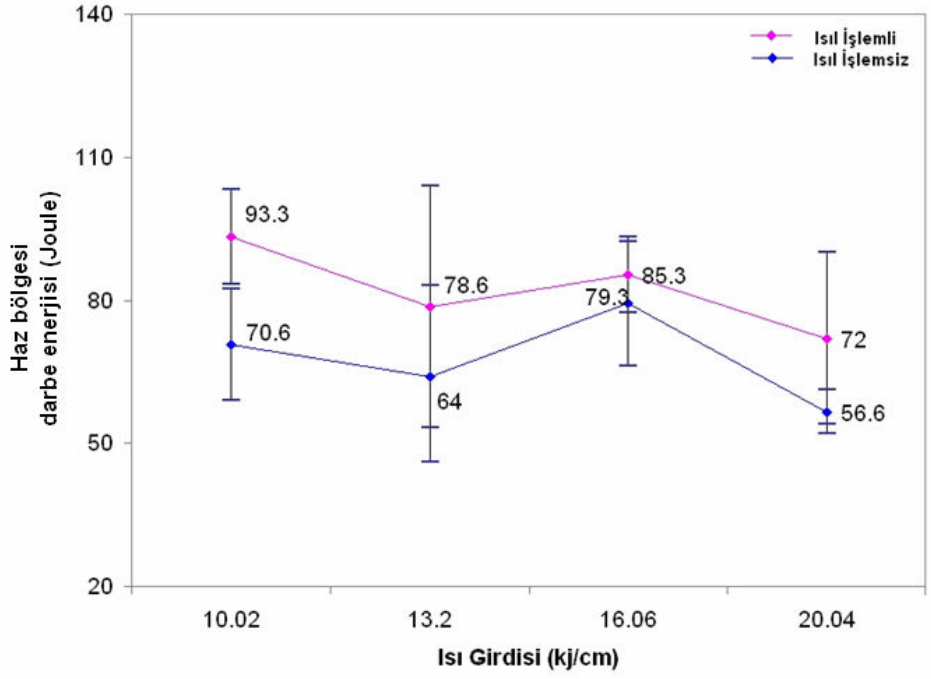
bölgesinde radyografik testlerde cüruf görülmektedir. Bu ısı girdisinde yapılan kaynak işlemi için parametreler uygun değildir. Ayrıca tokluk deney sonucu 27 joule değerinin altında çıkmıştır ve bu değer ASME bölüm IX kısım II standartına uygun çıkmamıştır. Şekil 5.25'te GTAW yöntemi ITAB bölgesinin artan ısı girdisi ile tokluk değeri grafiği verilmiştir. Isı girdisini artması ile tokluk değerinin düştüğü açıkça görülmektedir. Bunun nedeni olarak artan ısı girdisi ile Tablo 5.5'ten görüleceği üzere ITAB'ın genişliğinin artması ve kaba taneli bölgenin genişliğinin artması düşünülmekte olup bu bölgede tanelerin irileşmesi sonucu tokluğun azalması ile açıklanmaktadır.



Şekil 5.25. GTAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.



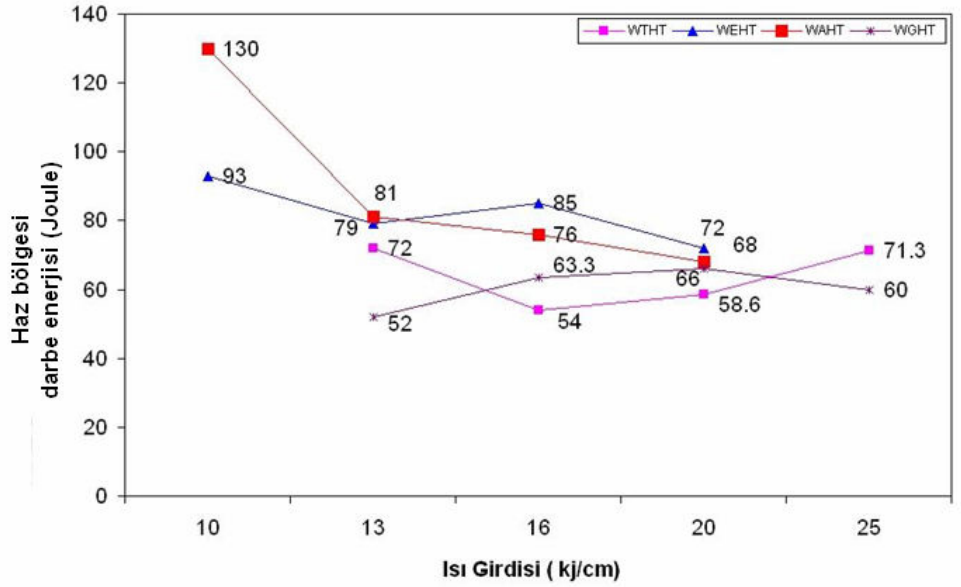
Şekil 5.26. SMAW yöntemi kaynak bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.



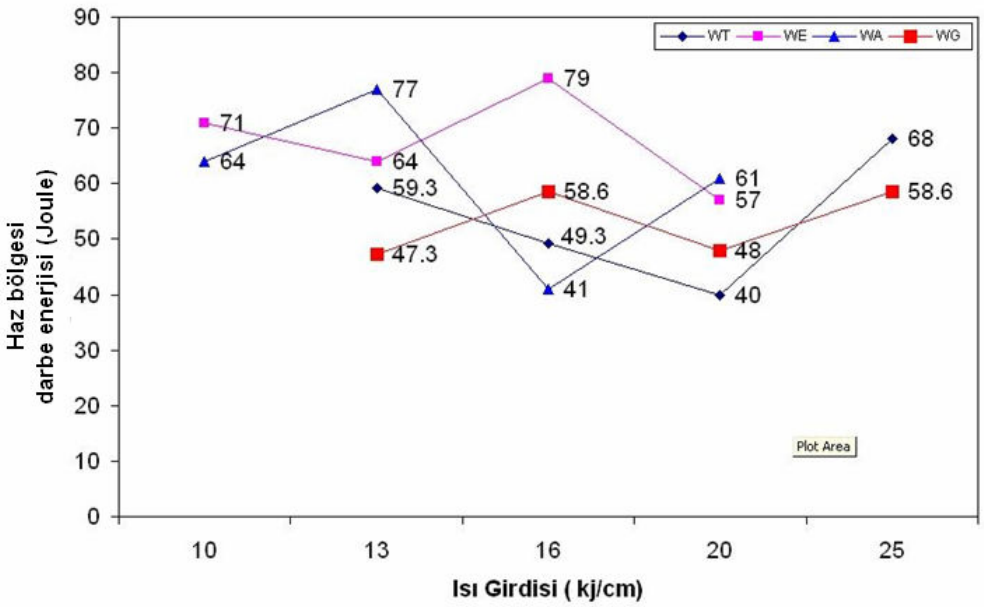
Şekil 5.27. SMAW yöntemi ITAB bölgesi çentik darbe deneyi sonuçları.

SMAW yöntemleri ile yapılan kaynak işlemleri sonucunda ısı girdisine bağlı olarak kaynak bölgesi ve ITAB bölgesi tokluk değerleri Şekil 5.26 ve 5.27'de verilmiştir. Şekil 5.26'dan görüleceği üzere kaynak bölgesinde ısı girdisi arttıkça

tokluk değerlerinde bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak Şekil 5.49, 5.51, 5.53 ve 5.55'ten görüleceği üzere mikroyapıya hakim olan widmanstaten ferrit fazı olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.27'de SMAW prosesi için ITAB bölgesi tokluk değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemektedir.

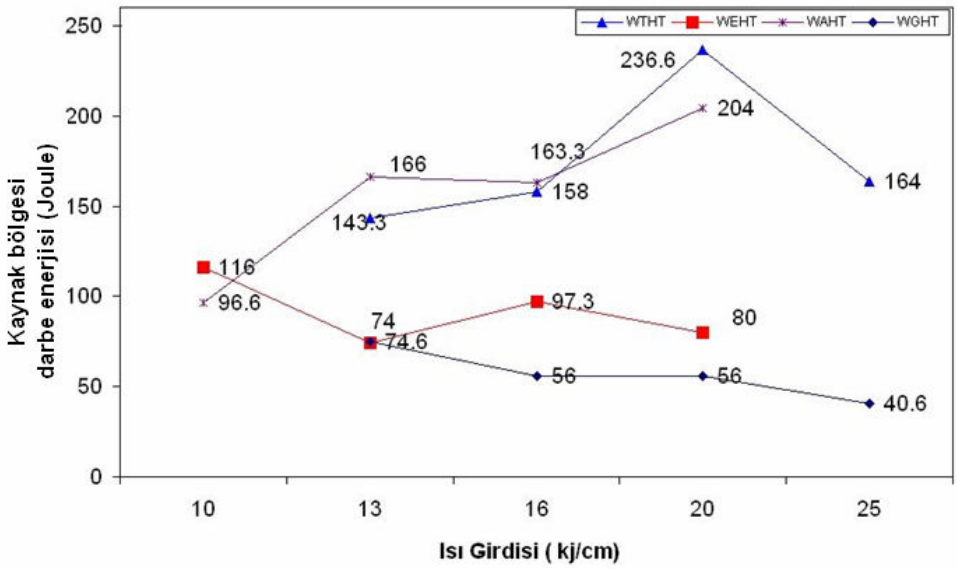


Şekil 5.28. Isıl işlemli numunelerde ITAB bölgesi darbe enerjisinin değişimi



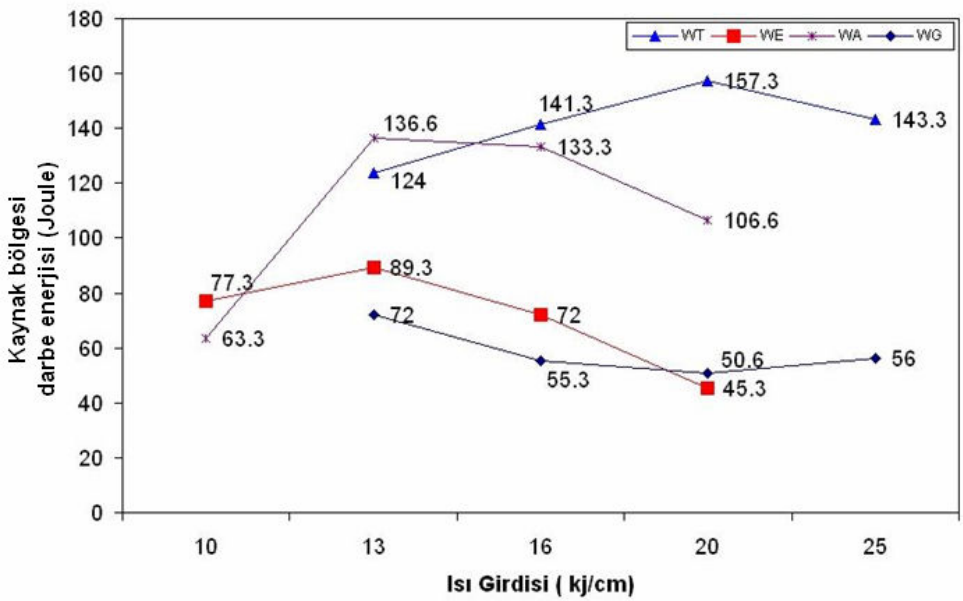
Şekil 5.29. Isıl işlemsiz numunelerde ITAB bölgesinin darbe enerjisinin değişimi.

Şekil 5.28 ve 5.29'da yapılan kaynak işlemleri sonucunda ITAB bölgesinin dört proseste ısıl işleme tabi tutulmuş ve ısıl işlem yapılmadan elde edilen deney numunelerinin ısı girdisine bağlı olarak tokluk değerleri verilmiştir. GTAW, SMAW ve SAW yöntemlerinde yapılan ısıl işlem ile tokluk değeri artmıştır. FCAW yönteminde ise bu etki çok azdır. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen hızlı soğuma sonucunda oluşan fazların (martenzit, widmanstaten ferrit) tokluk değerlerinin düşürdüğü ve ısıl işlem ile kaynak sırasında oluşan gerilimlerin giderilerek tokluk değerlerinin bir miktar arttığı görülmektedir.

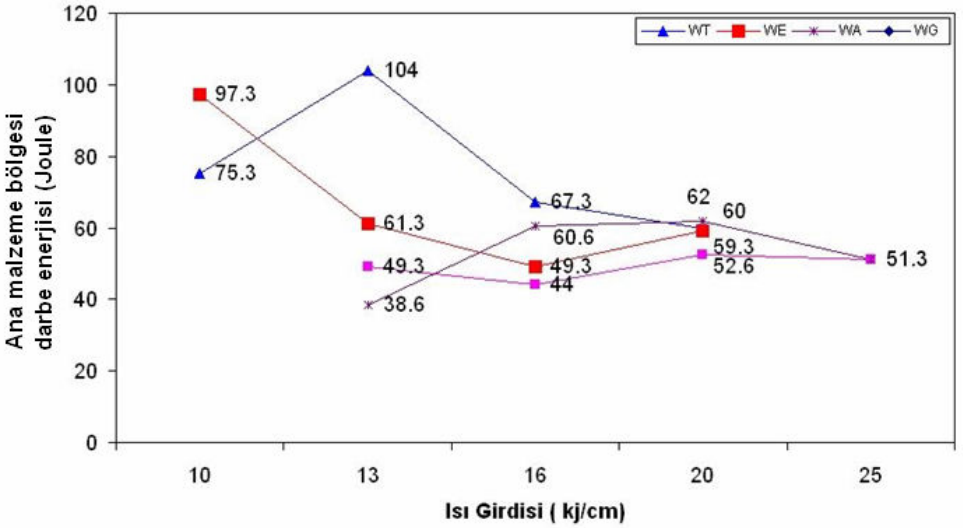


Şekil 5.30. Isıl işlemli numunelerde kaynak bölgesi darbe enerjisinin değişimi

Şekil 5.30 ve 5.31'de kaynak bölgesinin dört yöntem için ısı girdisine bağlı olarak tokluk değerleri verilmiştir. Yapılan gerilim giderme ısıl işlemi ile tokluk değerleri tüm prosesler için bu bölgede arttığı gözlemlenmektedir. Kaynak bölgesi tokluk değerleri Şekil 5.30 ve 5.31'de görüldüğü gibi ısıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış deney numunelerinin FCAW ve SMAW proseslerinde tokluk değerleri ısı girdisine bağlı olarak azalma göstermektedir. Buna karşılık GTAW ve SAW proseslerinde artış görülmüştür.



Şekil 5.31. Isıl işlemsiz numunelerde kaynak bölgesi ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi.



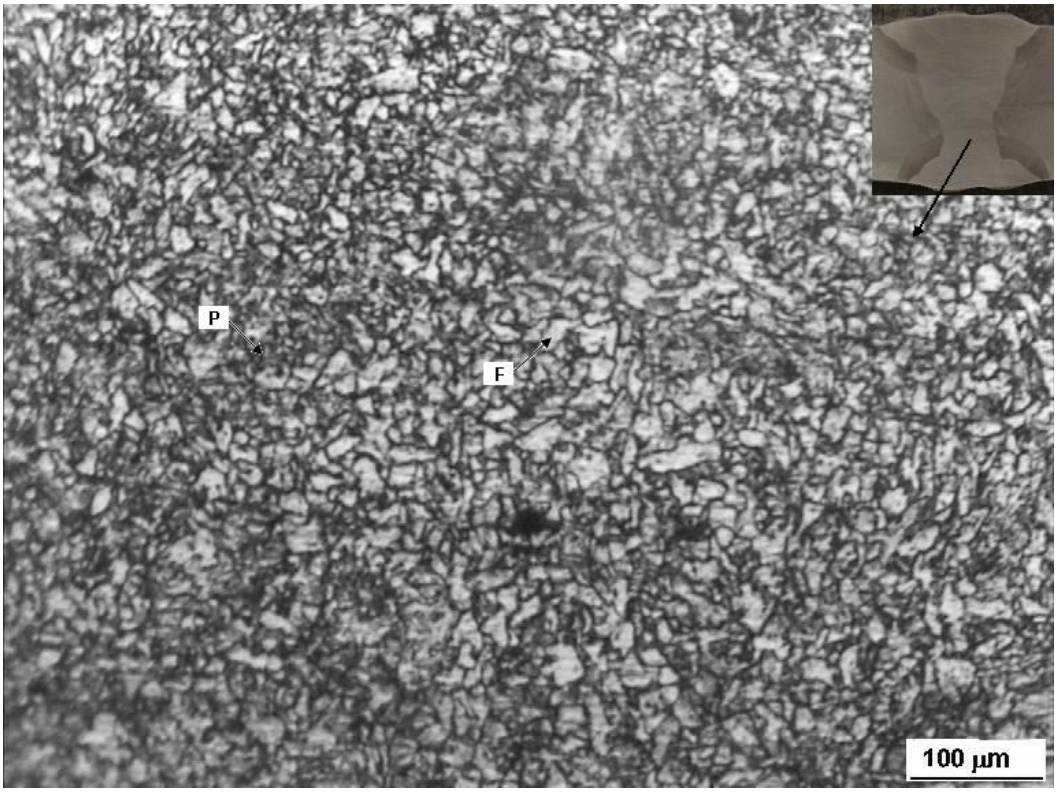
Şekil 5.32. Isıl işlemsiz numunelerde ana malzemenin ısı girdisi ile darbe enerjisinin değişimi.

Kaynak edilmiş tüm deney malzemeleri için ITAB bölgesinin dışında kalan değişime uğramamış bölgeden alınan tokluk deney numunelerin ısı girdisi ve proseslere bağlı olarak sonuçları Şekil 5.32'de verilmiştir. Bu bölgede tokluk değerleri ana malzemeye göre daha düşük çıkmıştır. Değişime uğramamış bölge demir karbon (Şekil 2.1) denge diyagramında A1 sıcaklığını geçmediği (Şekil 3.9) ve

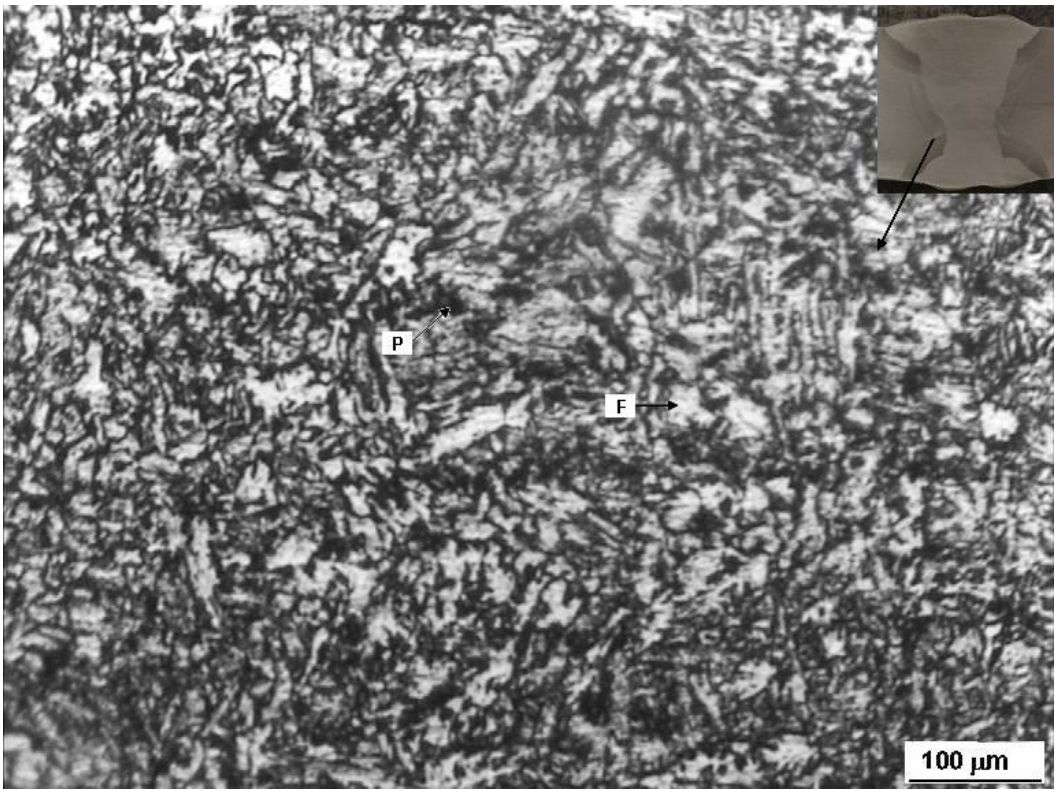
herhangi bir dönüşüm mekanizması meydana gelmediği için tokluk değerinin düşüşü temper gevrekliği ve/veya yaşlanma olarak düşünülmektedir.

5.5. Mikroyapı Resimleri

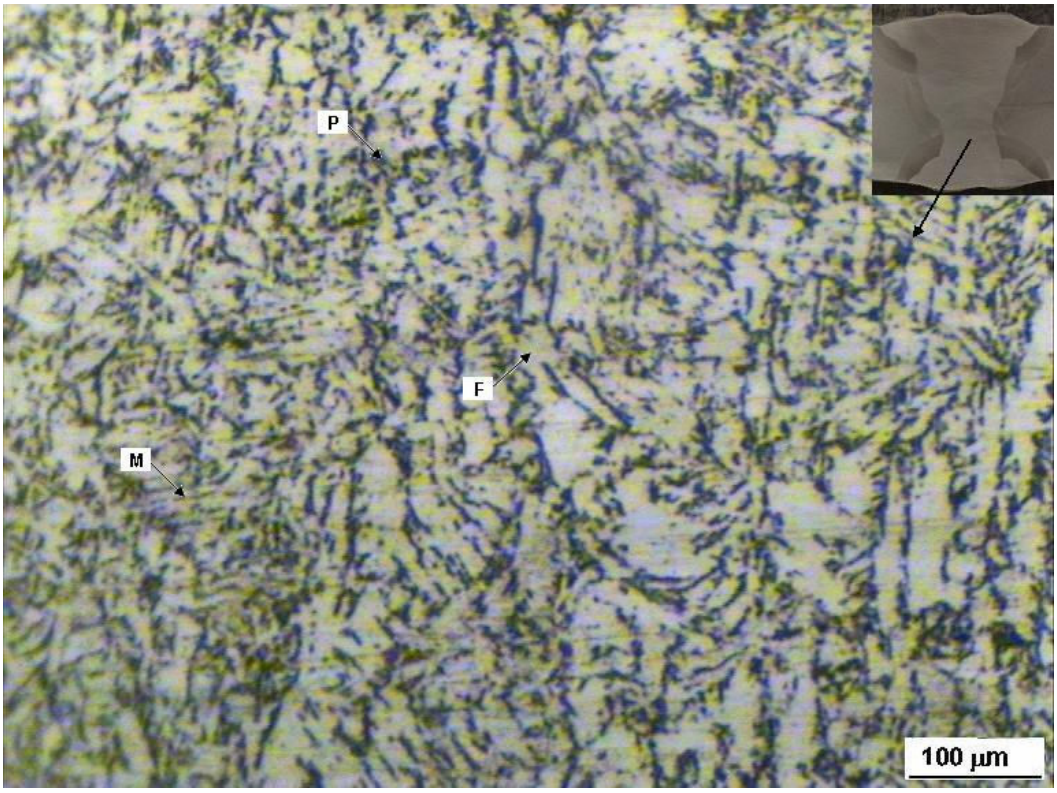
Yapılan çalışmada kaynak işlemleri sonucunda tüm numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.33 ile 5.64 arasında verilmiştir.



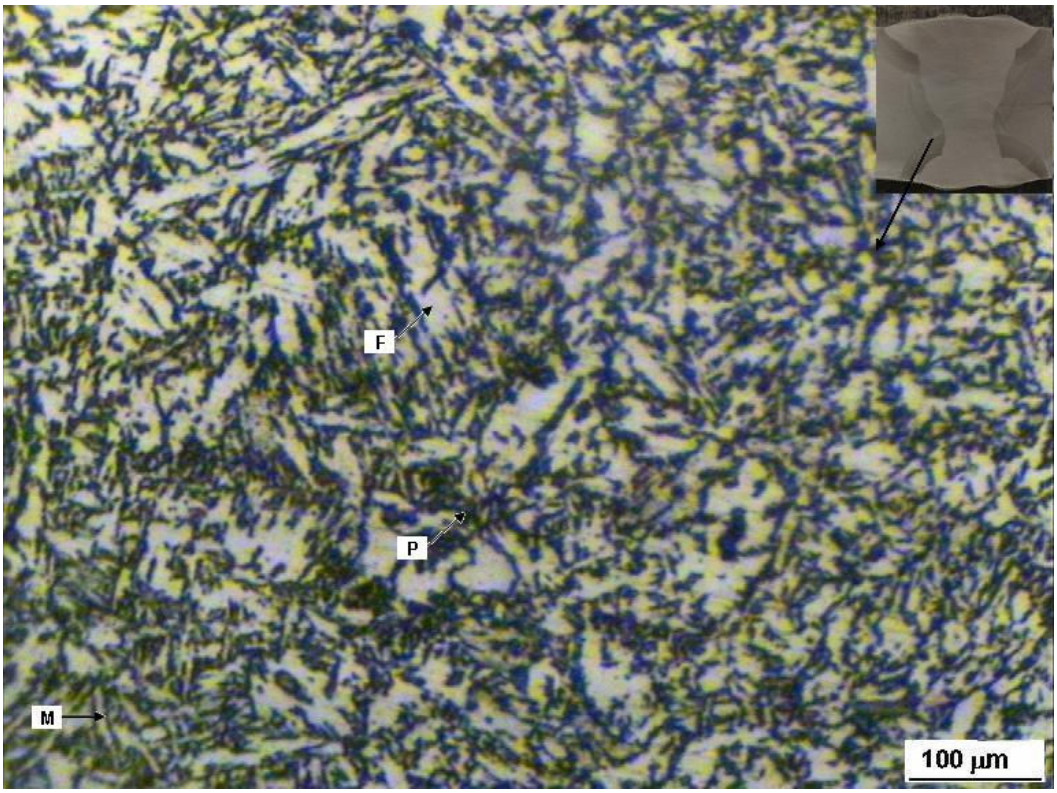
Şekil 5.33. WA1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrite; P= Perlit).



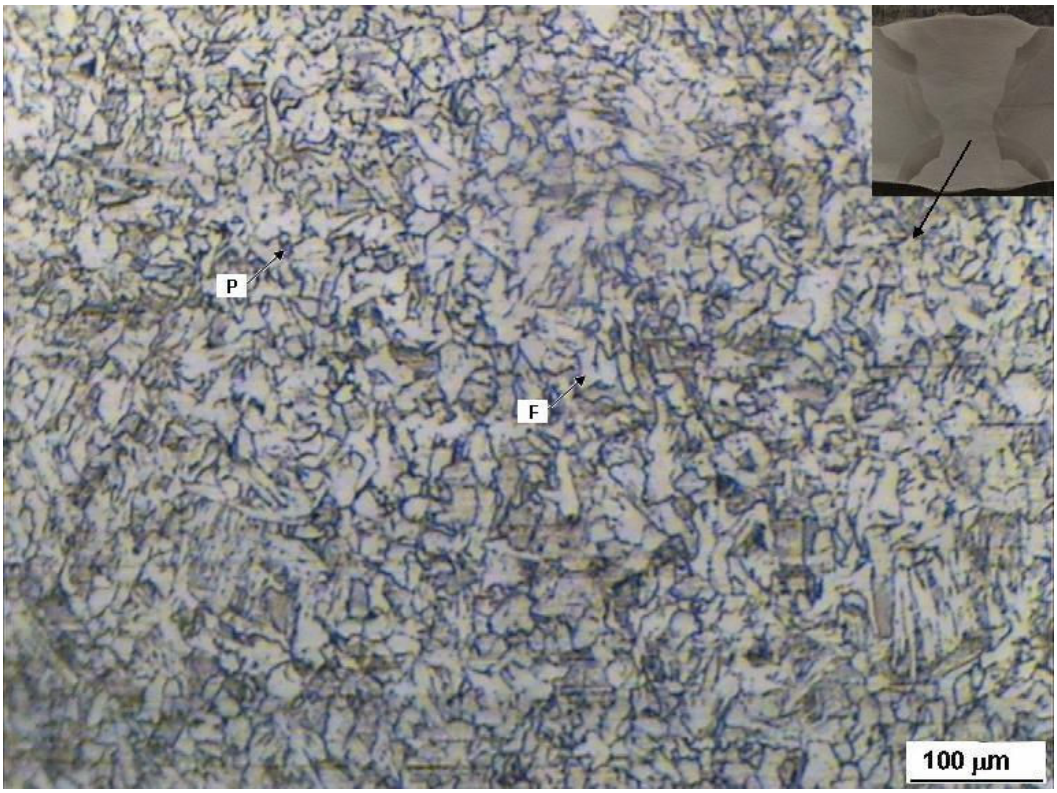
Şekil 5.34. WA1 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



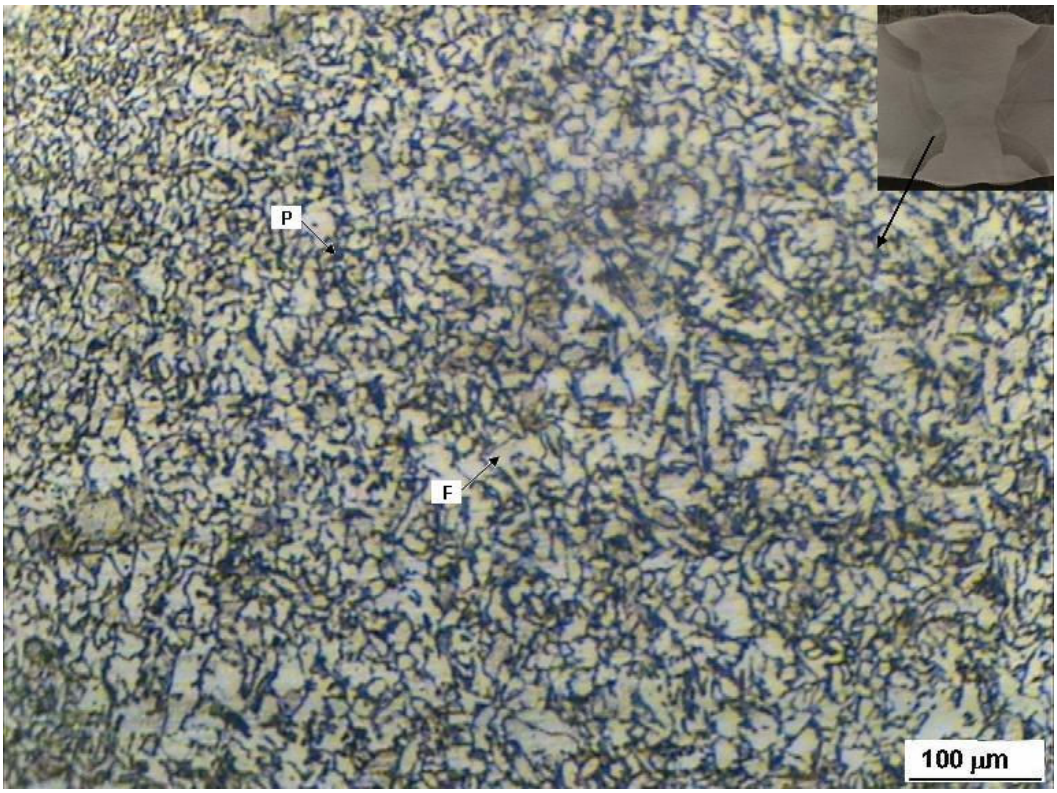
Şekil 5.35. WA2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P=Perlit; M=Martenzit).



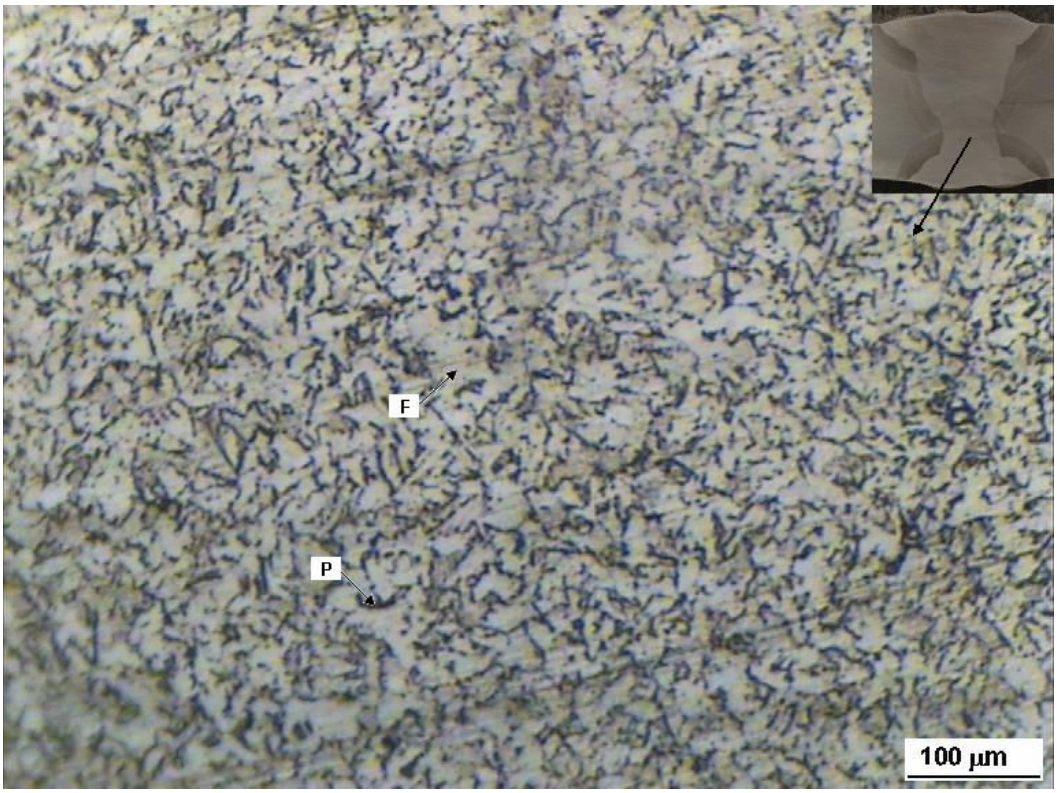
Şekil 5.36. WA2 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit; M=Martenzit).



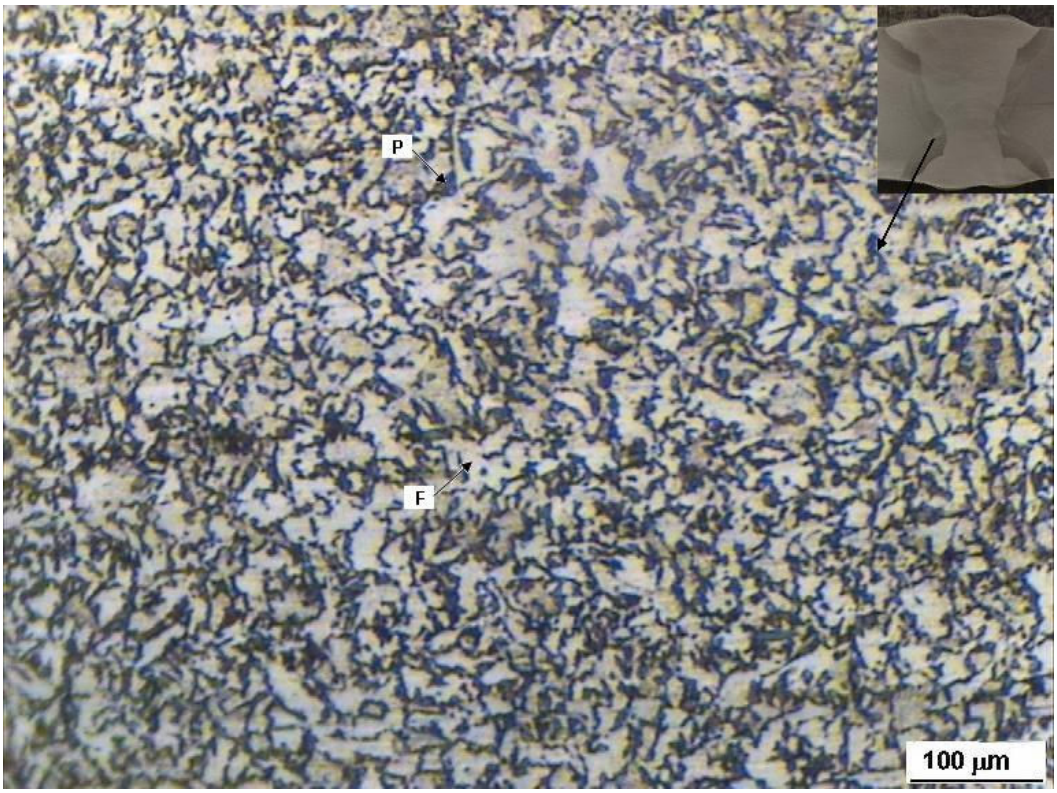
Şekil 5.37. WA3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



Şekil 5.38. WA3 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).

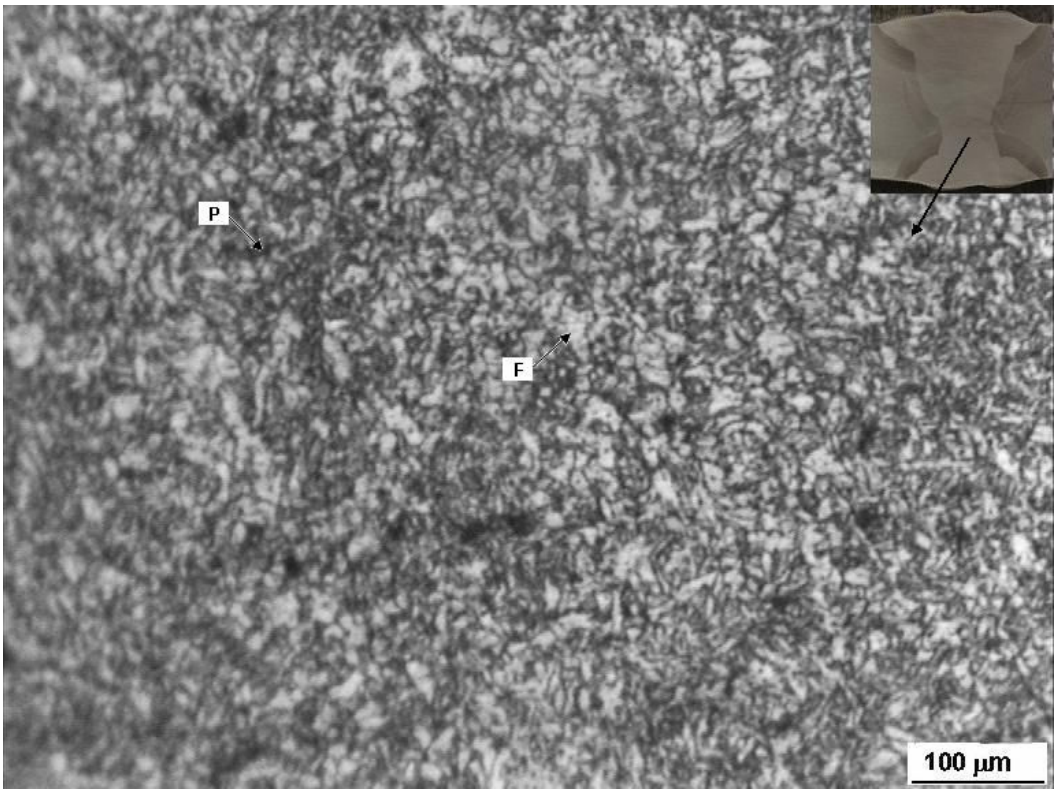


Şekil 5.39. WA4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).

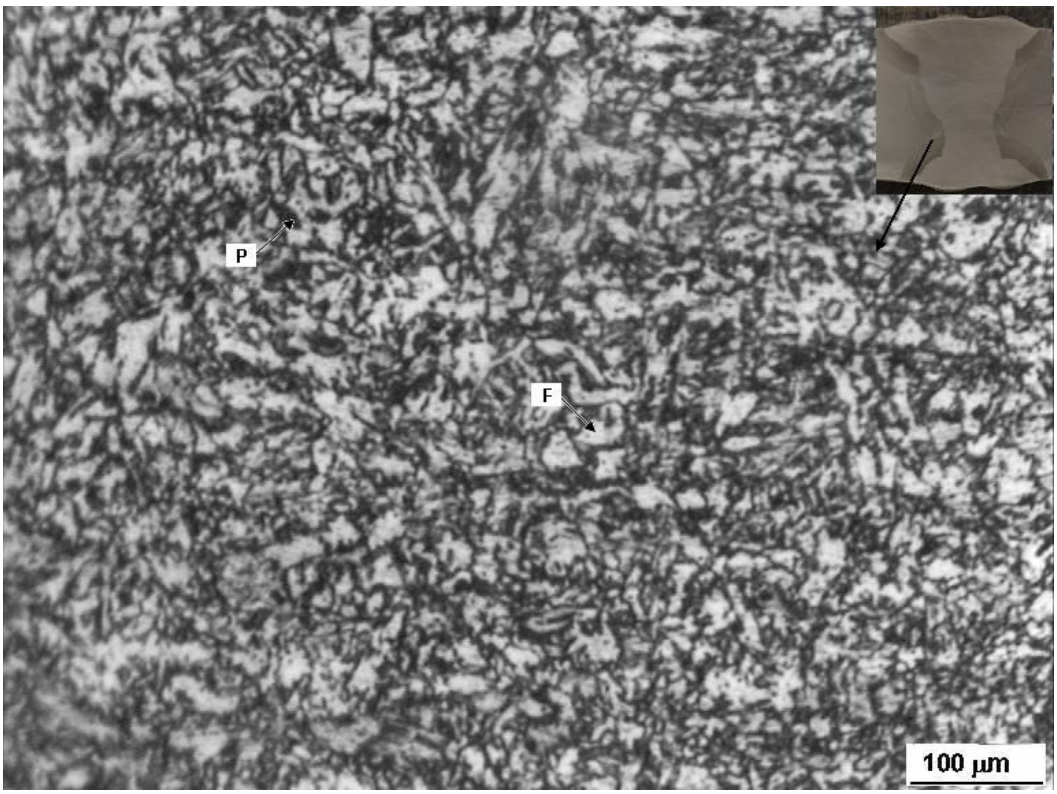


Şekil 5.40. WA4 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).

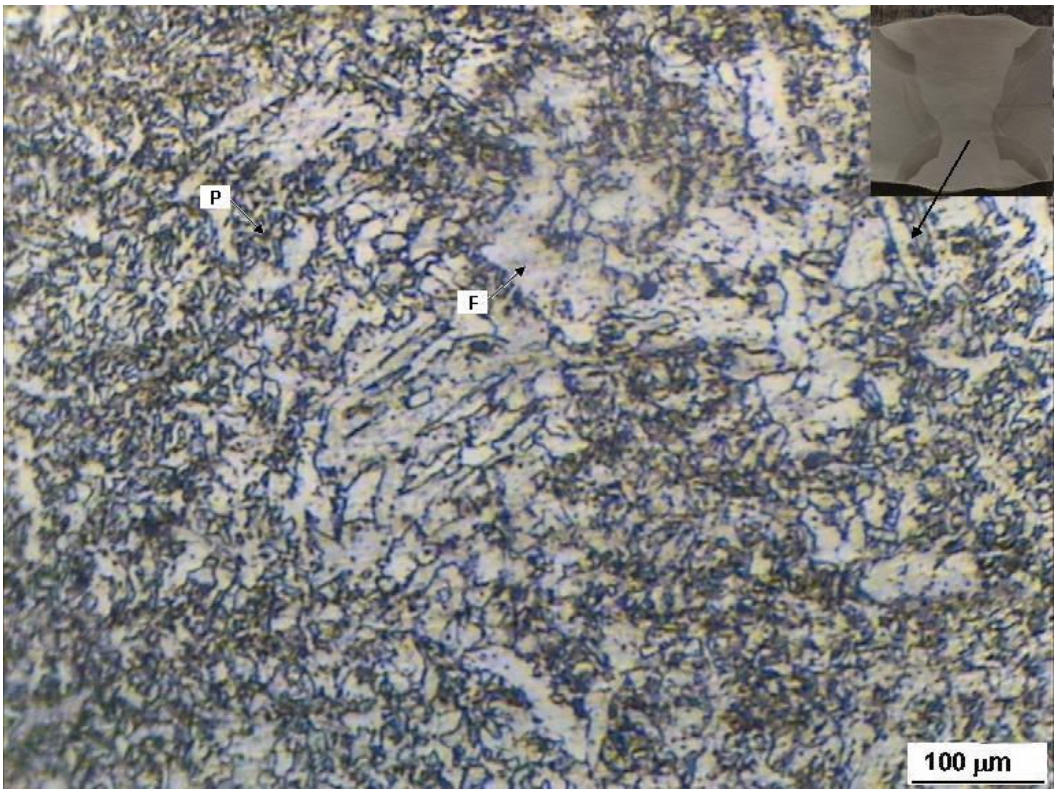
Tablo 4.3'te verilen kaynak parametreleri ve GTAW yöntemleri ile kaynağı yapılan kaynak, ITAB bölgesine ait deney numunelerinin mikroyapıları Şekil 5.33-5.40 arasında verilmiştir. Şekil 5.33, 5.35, 5.37 ve 5.39'dan görüleceği üzere GTAW yöntemi ile kaynak edilmiş numunelerinin kaynak bölgesi mikroyapısı ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır. Isı girdisinin artmasıyla kaba ferrit taneleri yüksek enerji girişinin etkisiyle incelmekte olup widmanstaten ferrit taneleri azalmaktadır. Şekil 5.34, 5.36, 5.38 ve 5.40'da ITAB bölgesi mikroyapılarından görüleceği üzere ferrit ve perlitik yapıdan oluşmaktadır. 13 kj/cm ısı girdisinde meydana gelen martenzit fazı ısı girdisinin artması ve soğumanın yavaşlaması ortadan kalkmıştır. Şekil 5.38'de fotoğrafın sol üst tarafındaki taneler daha ince yapılı olup bu bölge ITAB'ın alt bölgesi ince tane yapılı bölgedir. Fotoğrafın sağ alt tarafta gözüken tane yapısı ise ITAB'ın bir diğer alt bölgesi olan kaba taneli bölgedir.



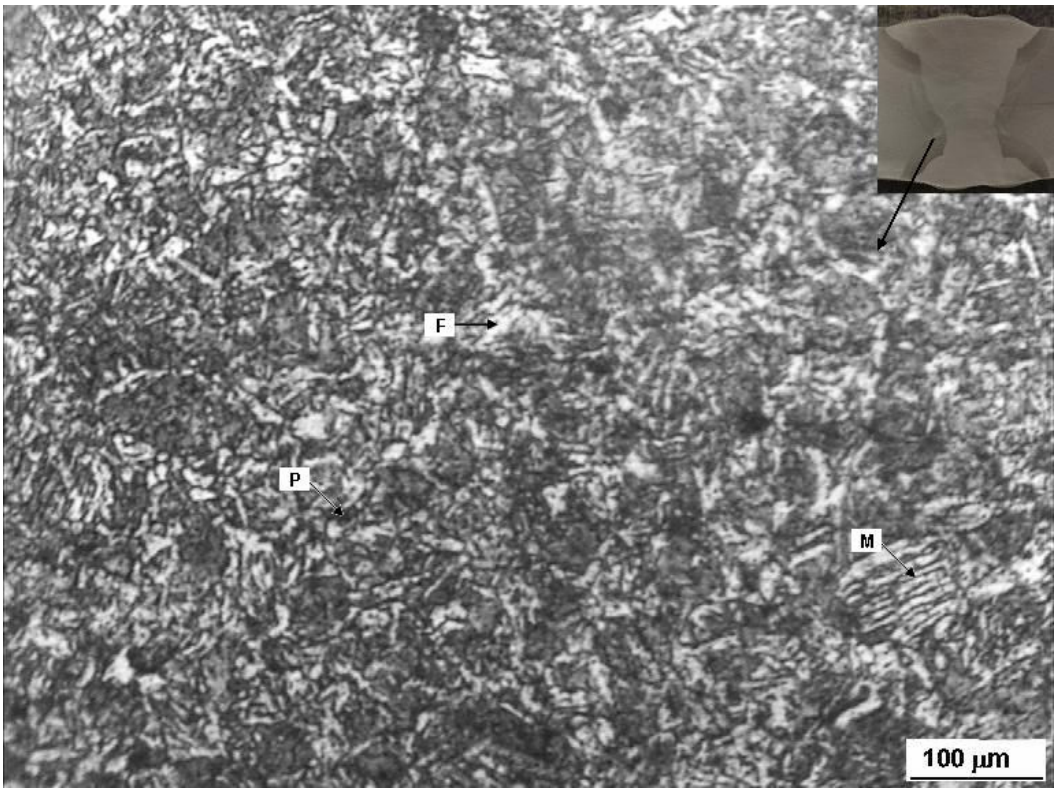
Şekil 5.41. WG1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



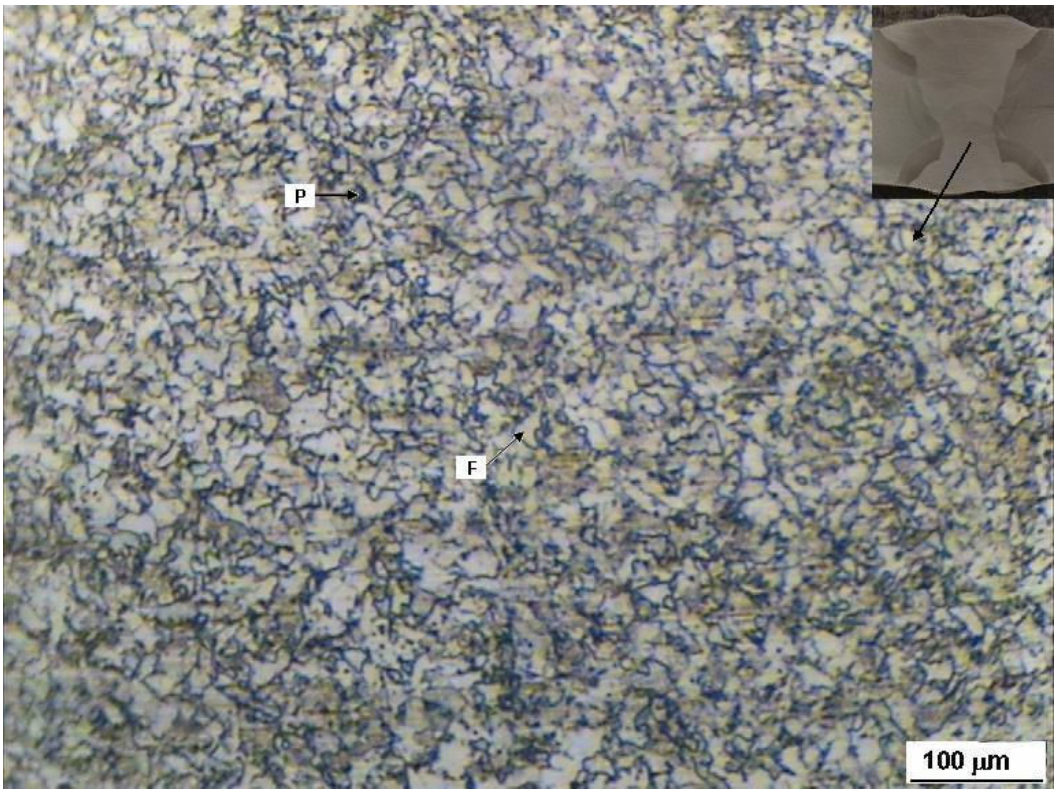
Şekil 5.42. WG1 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



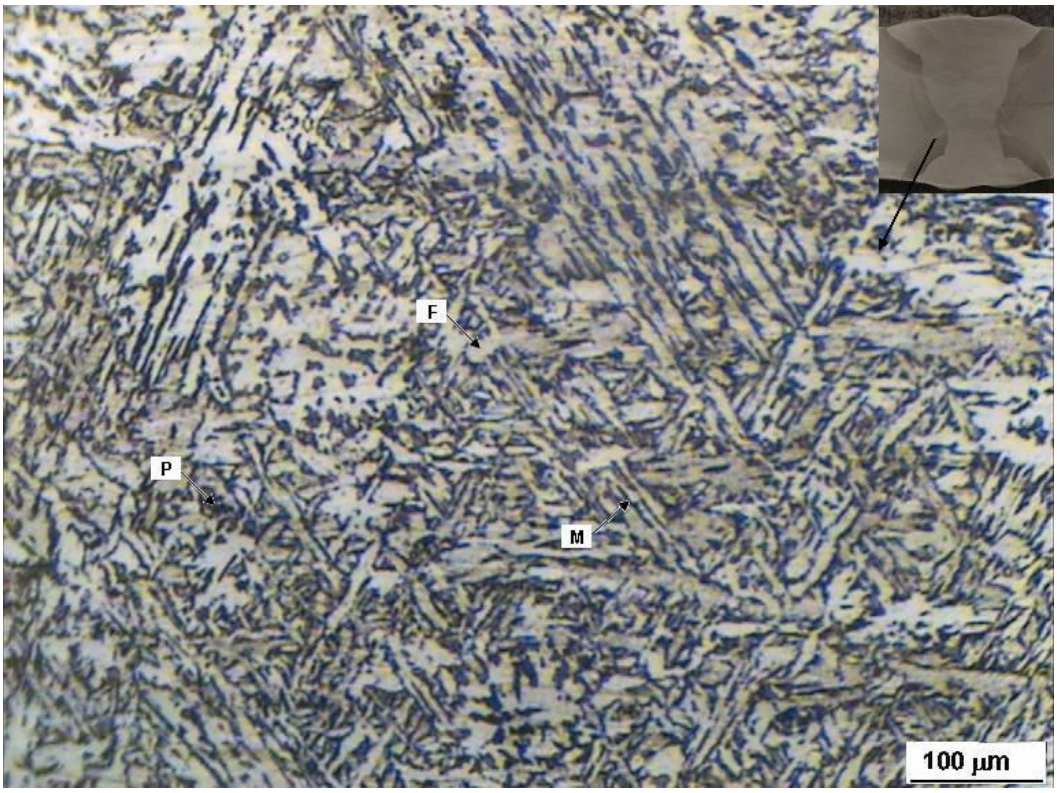
Şekil 5.43. WG2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



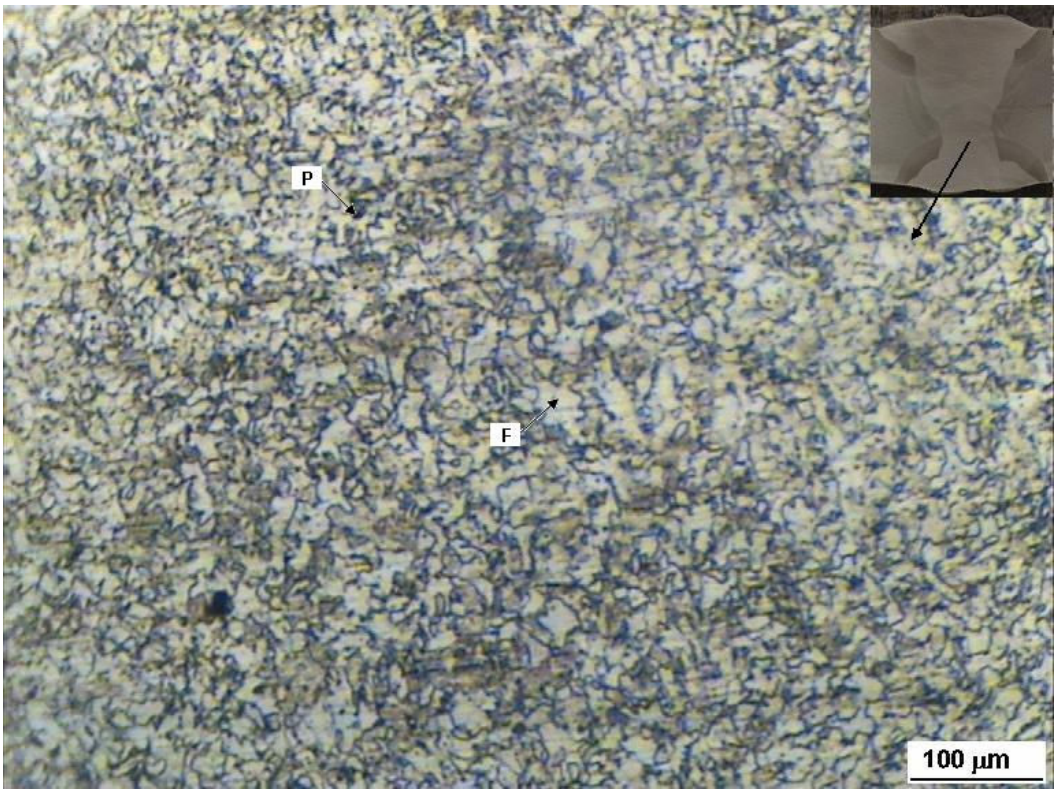
Şekil 5.44. WG2 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit;M=Martenzit).



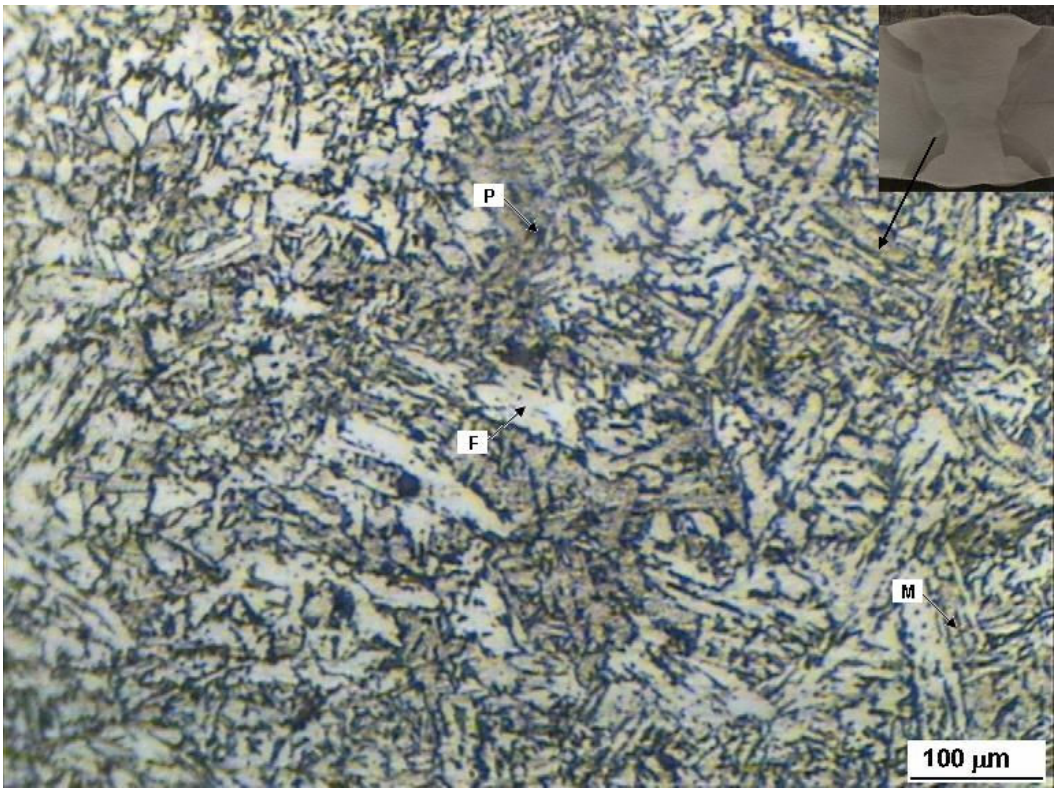
Şekil 5.45. WG3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



Şekil 5.46. WG3 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit; M=Martenzit).

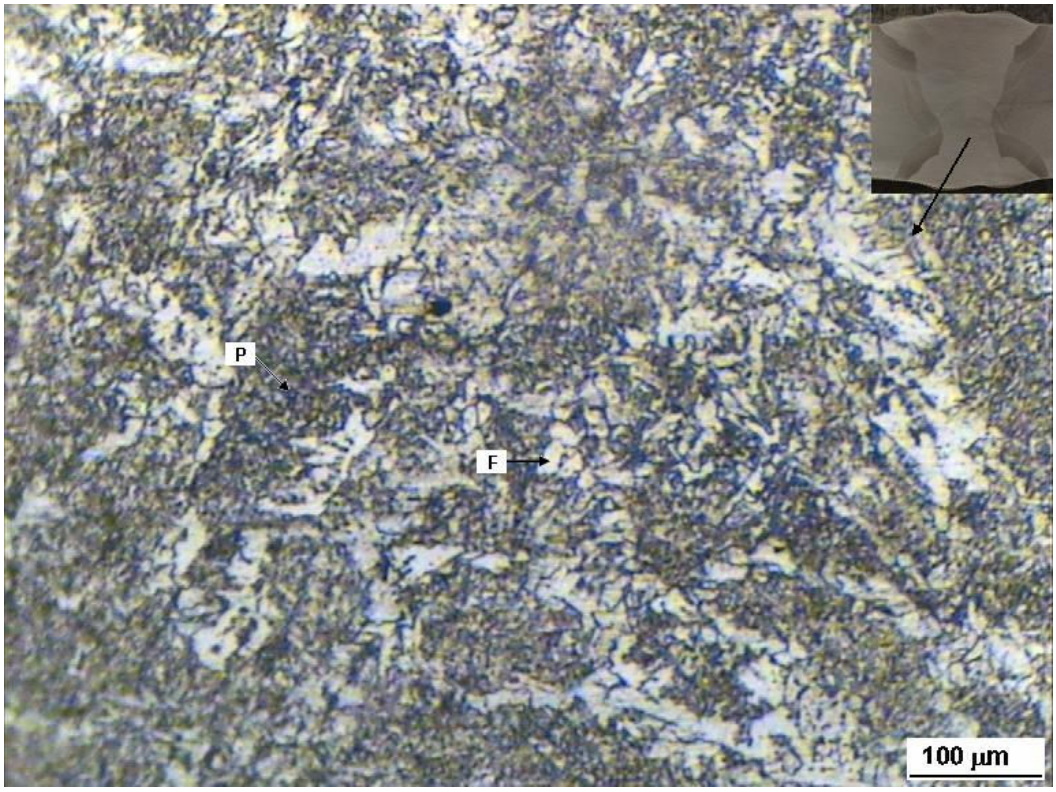


Şekil 5.47. WG4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).

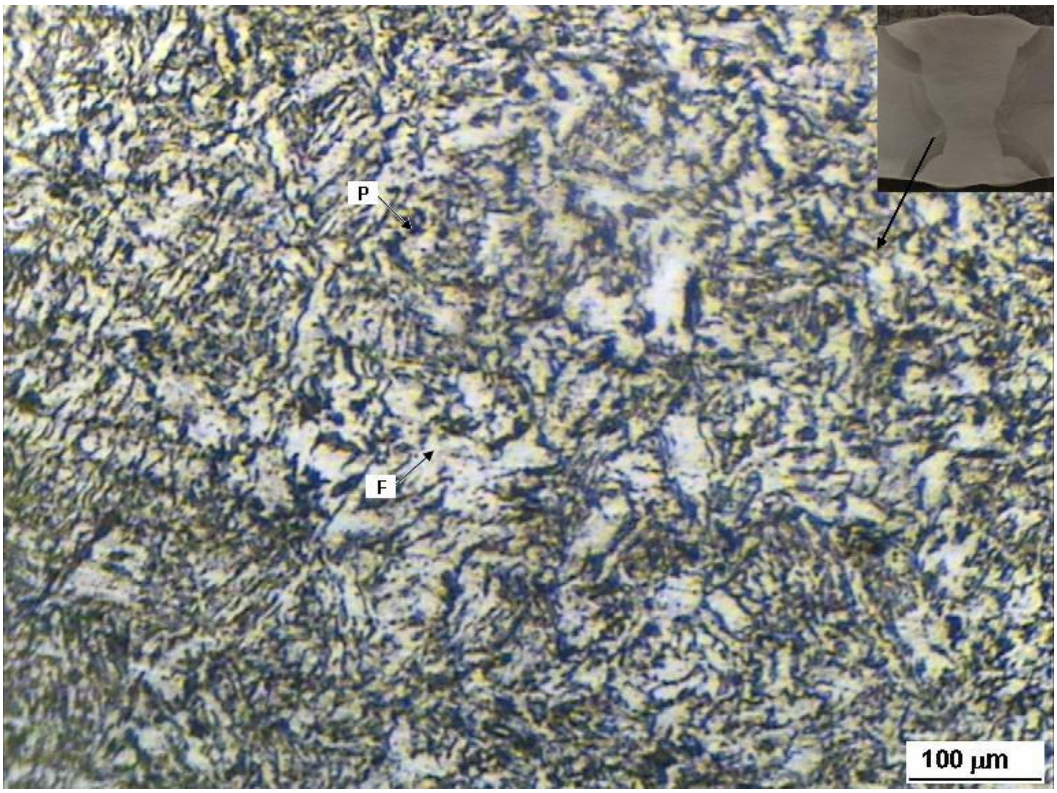


Şekil 5.48. WG4 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit; M=Martenzit).

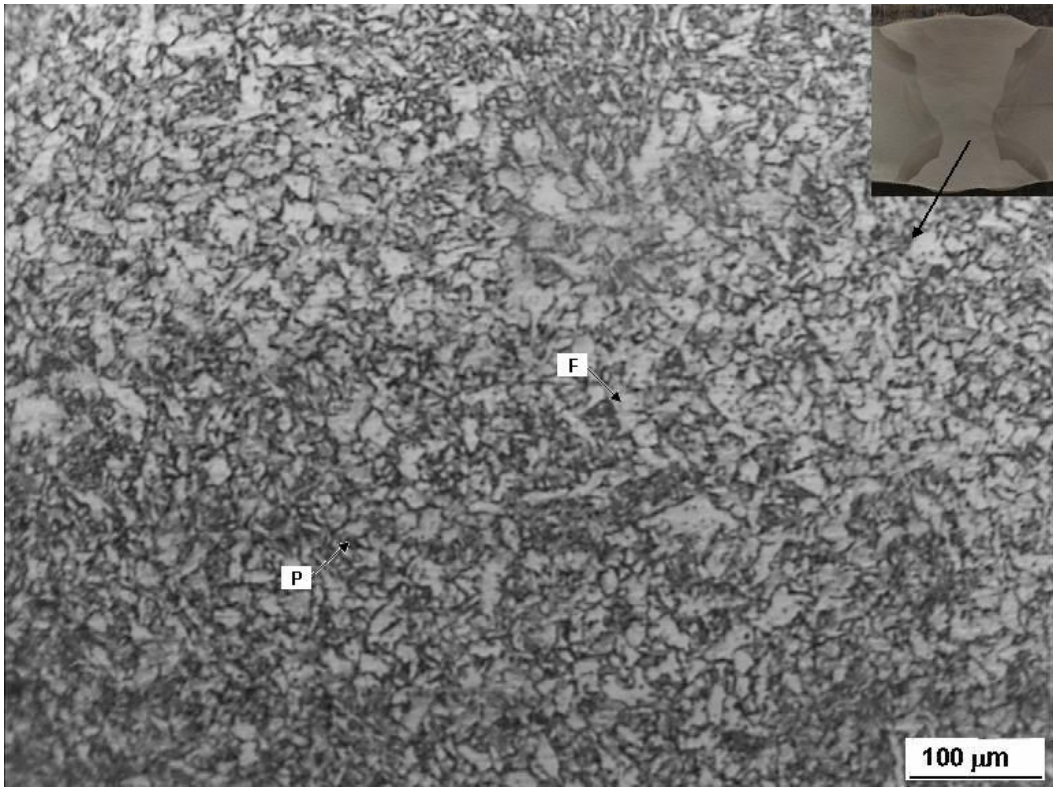
Şekil 5.41, 5.43, 5.45 ve 5.47'de FCAW yöntemleri ile kaynağı yapılan deney numunelerinin kaynak bölgesi mikroyapılarından görüleceği üzere ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır. WG1 numunesi 13 kj/cm ısı girdisinde kaynak işlemi daha yüksek ısı girdilerine göre daha fazla paso ile kaynak edildiğinden üstten çekilen kaynak pasoları alt bölgeleri aynı zamanda tavlama işlemi yapmaktadır. Şekil 5.42, 5.44, 5.46 ve 5.48'de FCAW yöntemi ITAB bölgesi mikroyapılarından görüleceği üzere ferrit, perlit ve martenzit fazından oluşmaktadır. Şekil 5.42'de 13 kj/cm ısı girdisinde ana malzemeye düşük ısı girdisinin etkisiyle ITAB'da martenzit fazı görülmemiştir. Artan ısı girdisinin etkisiyle 16, 20 ve 25 kj/cm ısı girdilerinde mikroyapılarda martenzit fazı görülmüştür. Bunun nedeni olarak yüksek enerji girişi kaynak elektrodunu erittikten sonra fazla enerji ana malzemeye etki ettiği düşünülmekte olup aynı zamanda yüksek enerji girişinde kaynak ağzına fazla metal doldurulduğu için kaynak paso sayısı azalmakta olup martenzit fazını oluşturmaktadır.



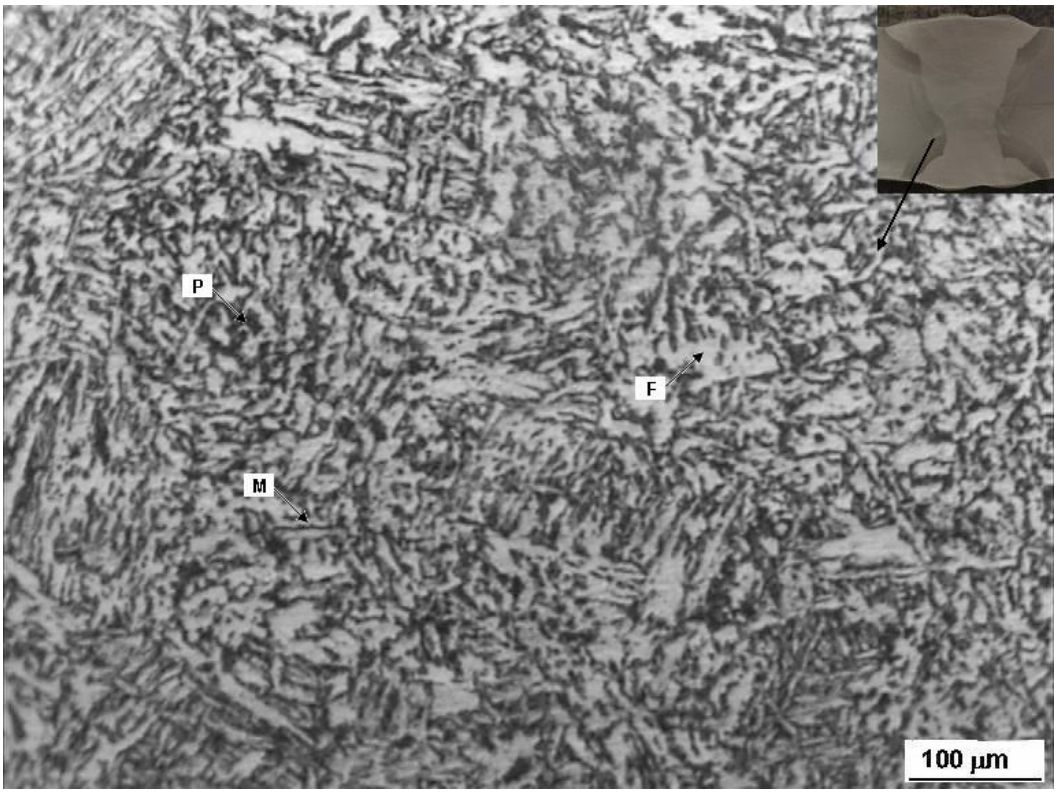
Şekil 5.49. WE1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



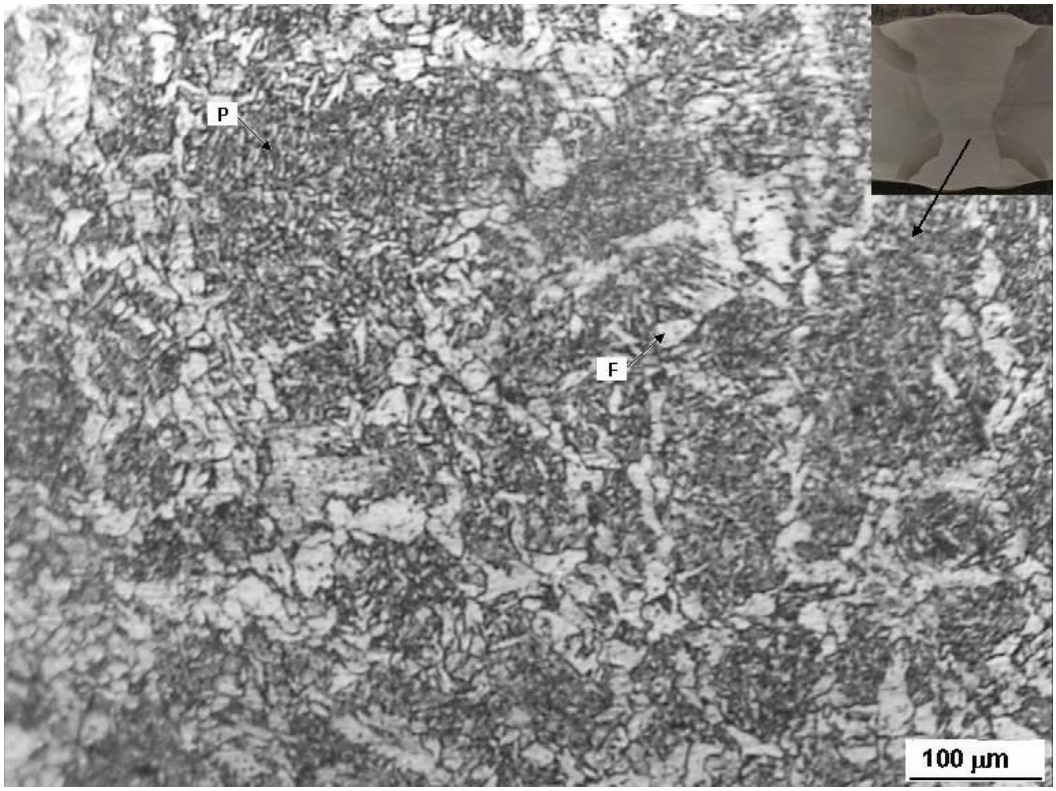
Şekil 5.50. WE1 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



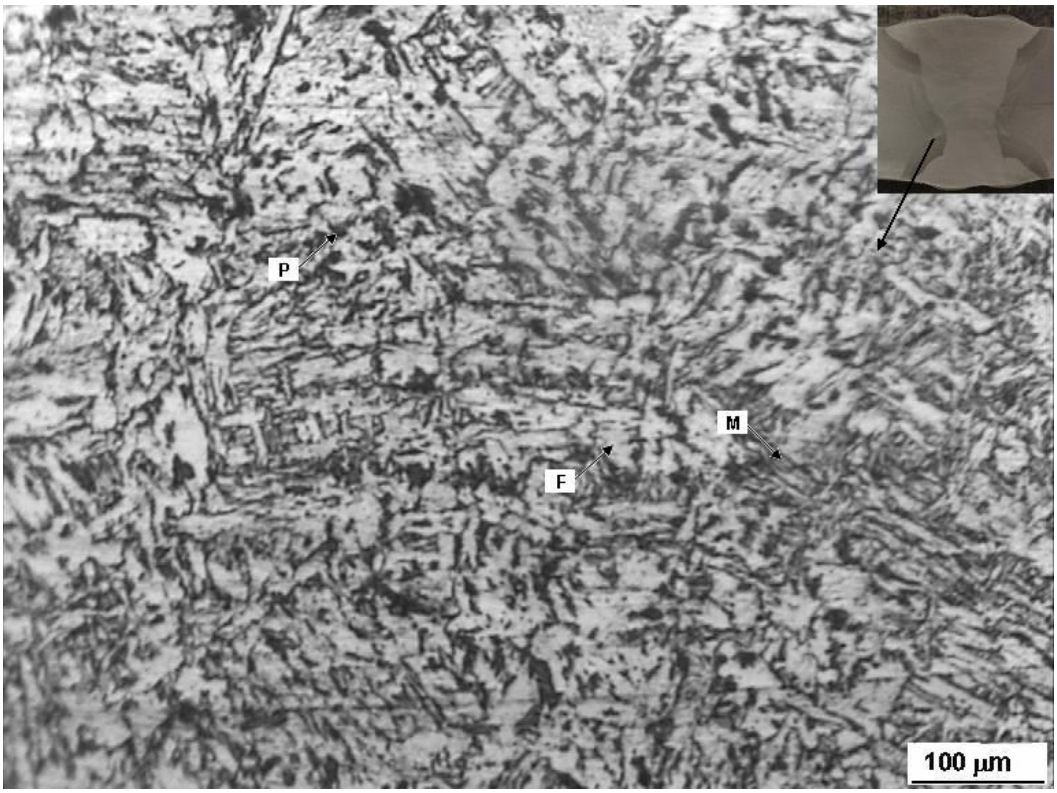
Şekil 5.51. WE2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



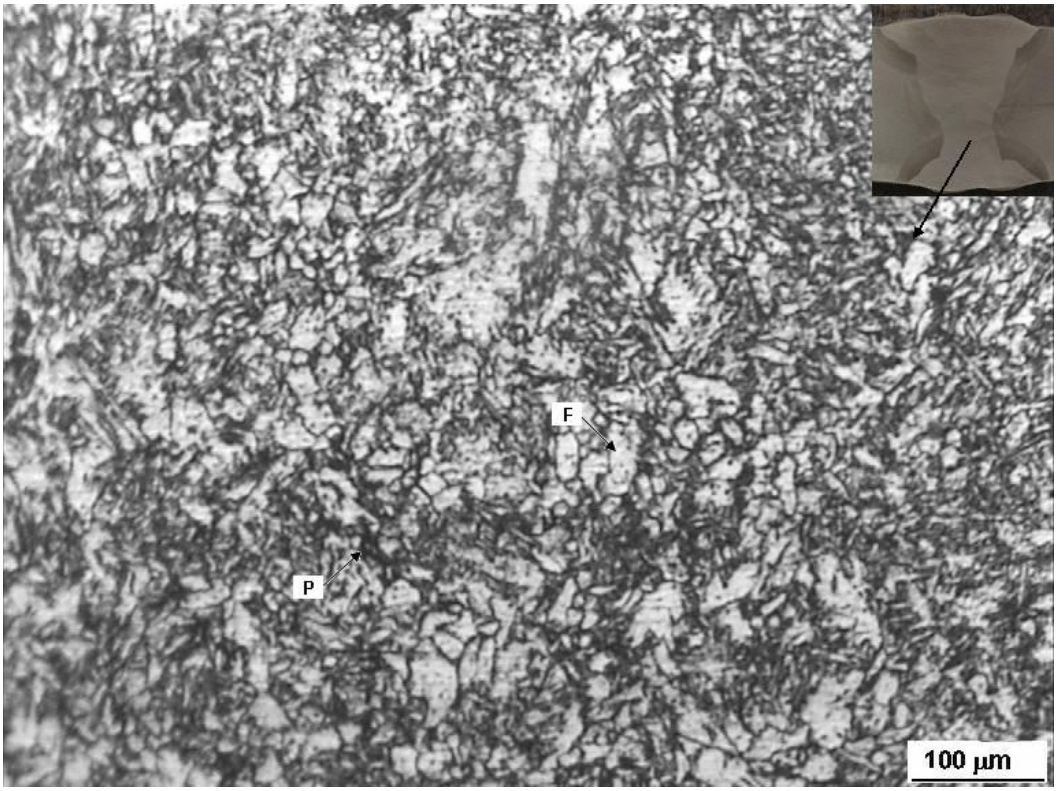
Şekil 5.52. WE2 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit; M=Martenzit).



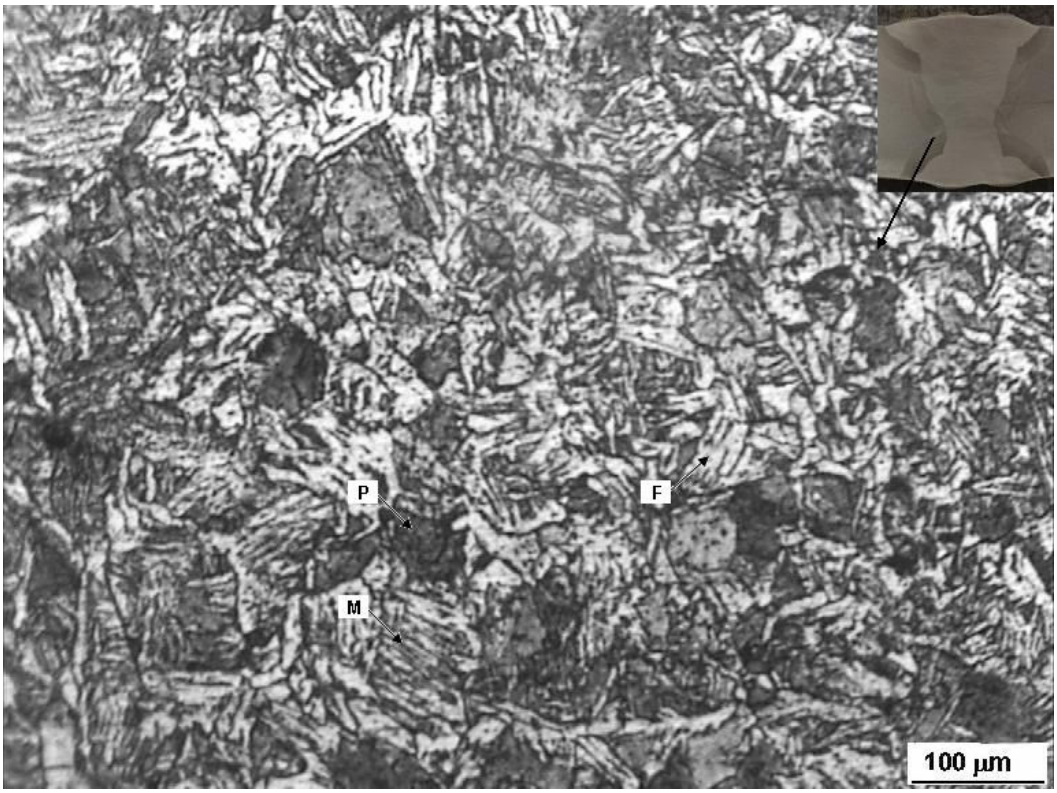
Şekil 5.53. WE3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



Şekil 5.54. WE3 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit; M=Martenzit).

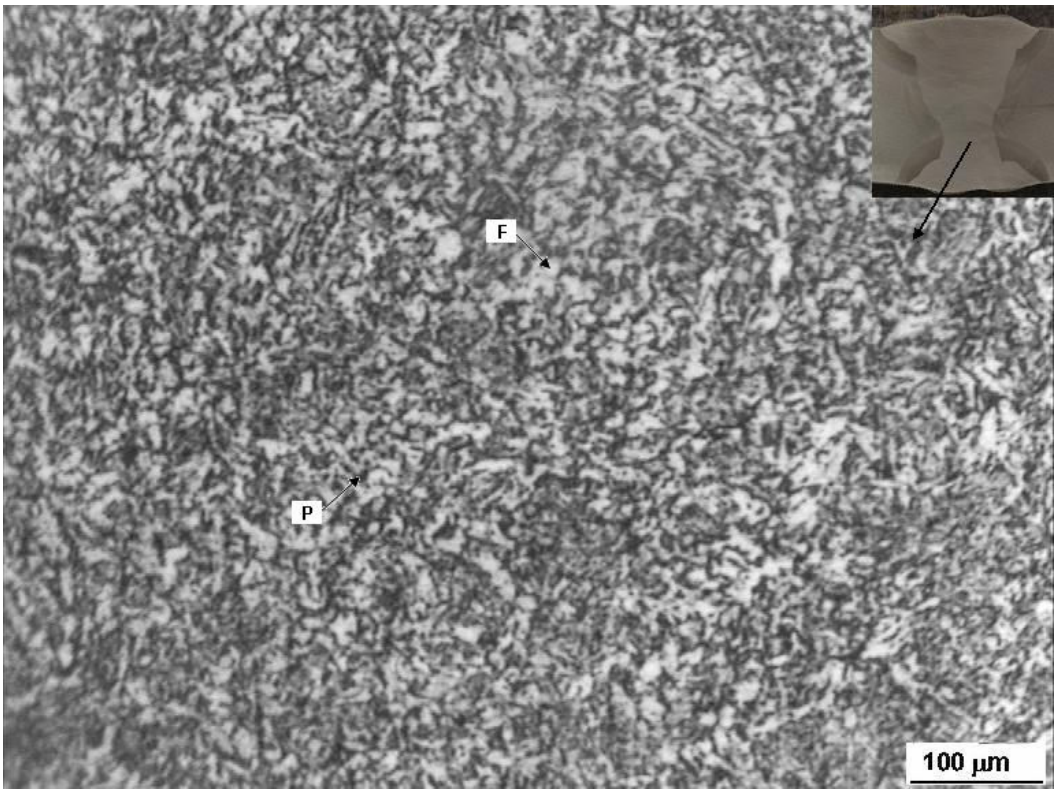


Şekil 5.55. WE4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).

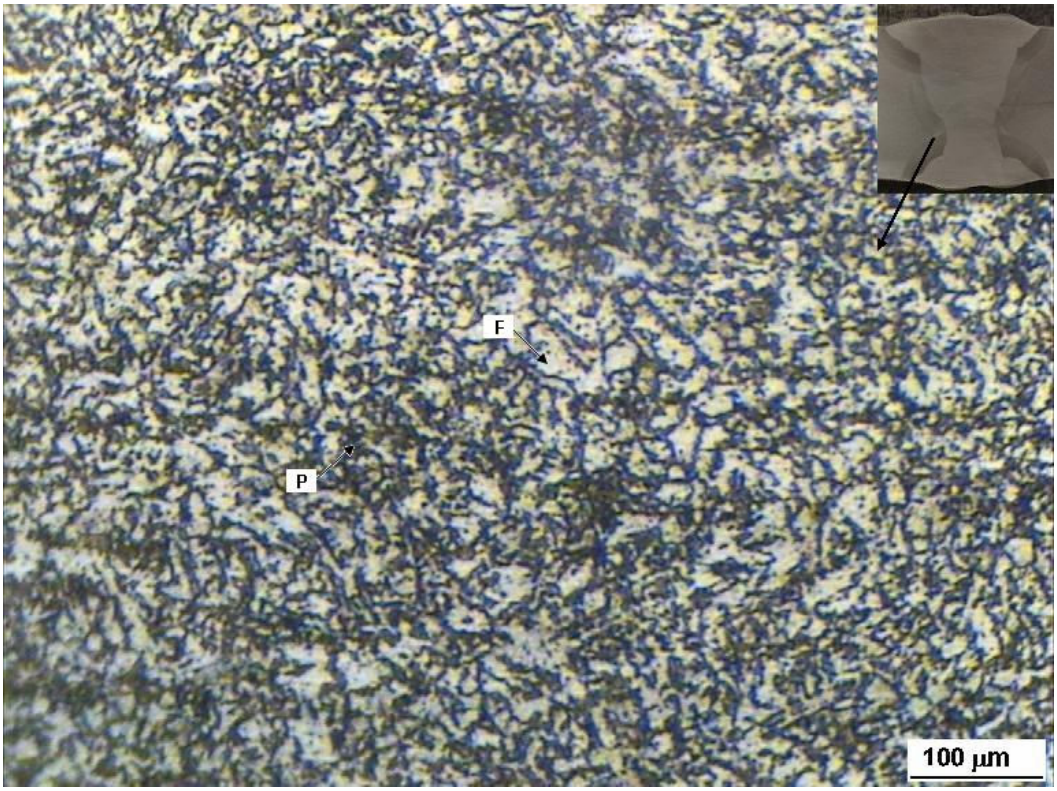


Şekil 5.56. WE4 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit; M=Martenzit).

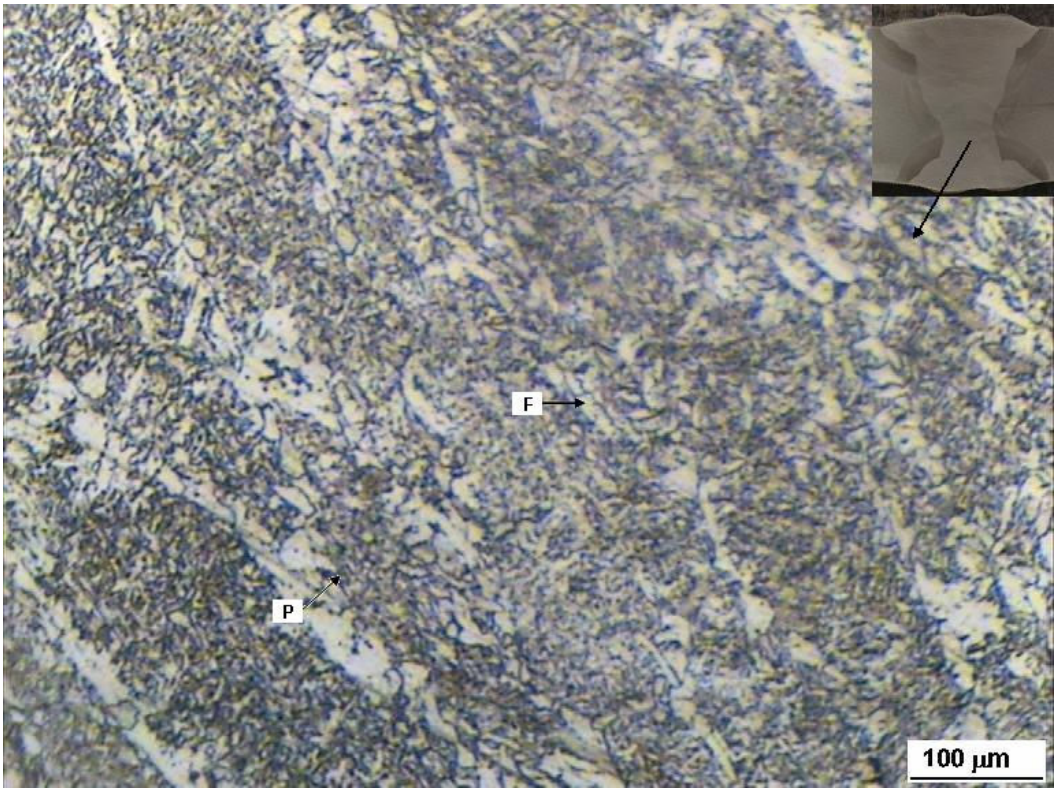
SMAW yöntemi kaynak bölgesi mikroyapıları Şekil 5.49, 5.51, 5.53 ve 5.55'den görüleceği üzere ferrit ve perlit tanelerinden oluşmaktadır. Isı girdisinin arttıkça kaynak bölgesi mikroyapılarında hızlı katılaşma etkilerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 5.50, 5.52, 5.54 ve 5.56'dan görüleceği üzere ITAB bölgesi mikroyapıları ferrit, perlit ve martenzit fazından oluşmaktadır. Isı girdisi arttıkça ITAB bölgesinde martenzit fazı artış göstermektedir.



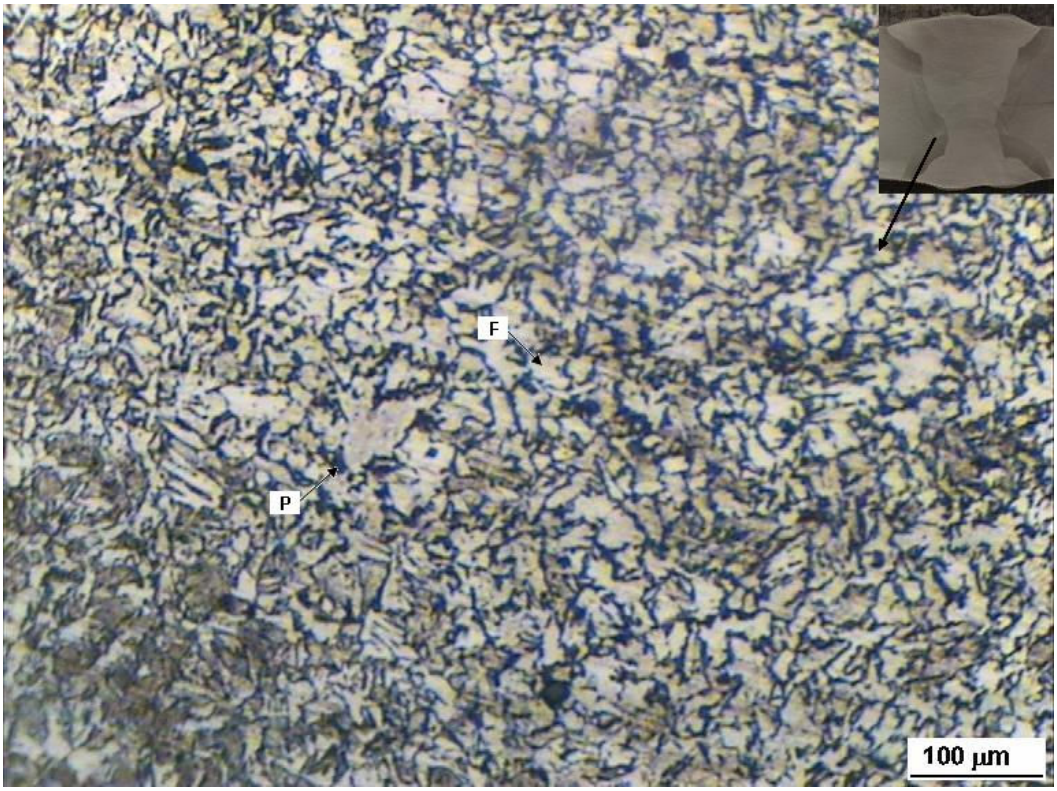
Şekil 5.57. WT1 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



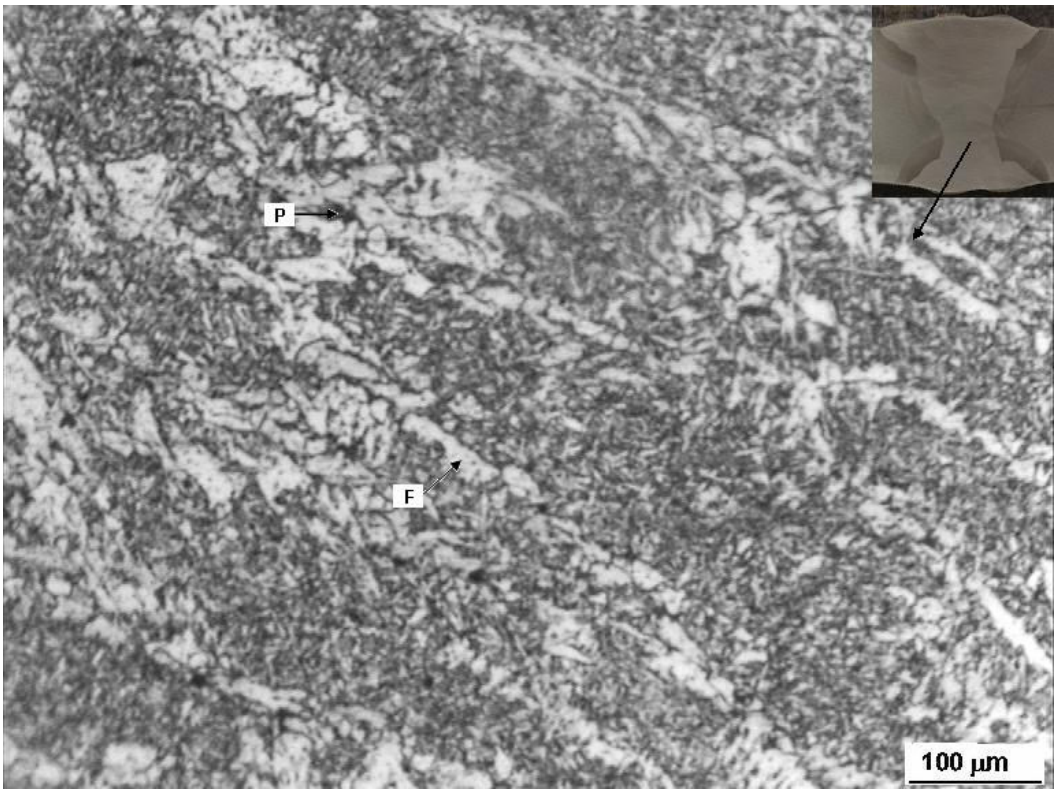
Şekil 5.58. WT1 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



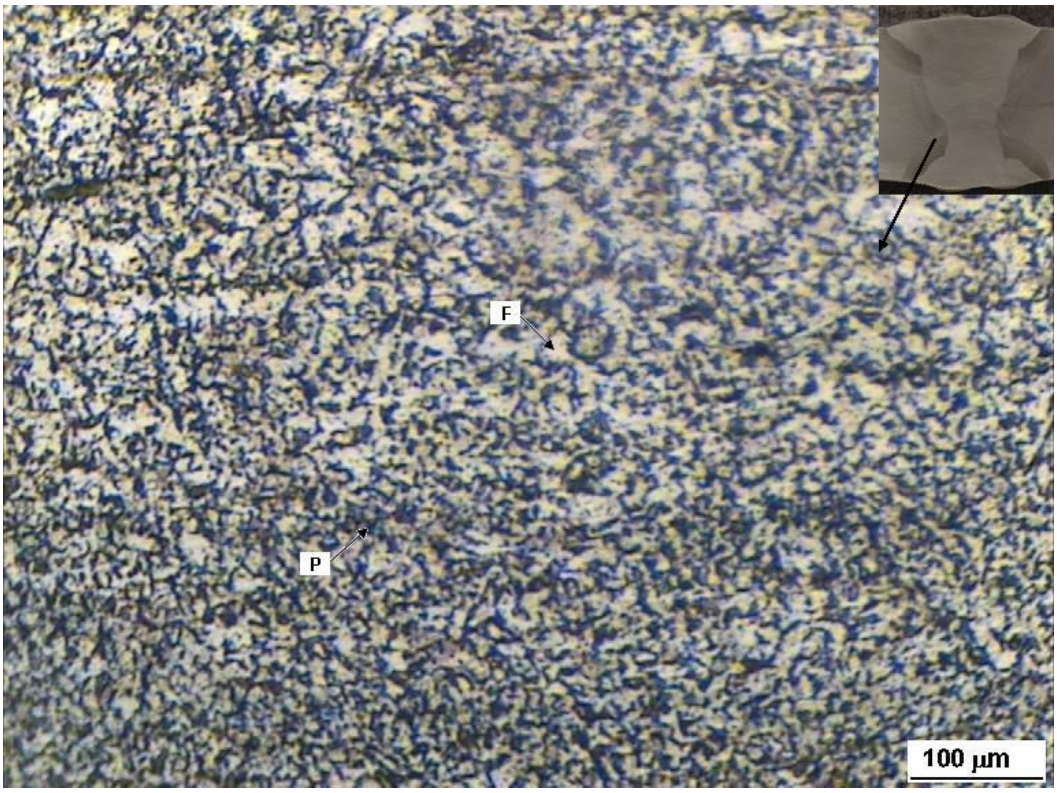
Şekil 5.59. WT2 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



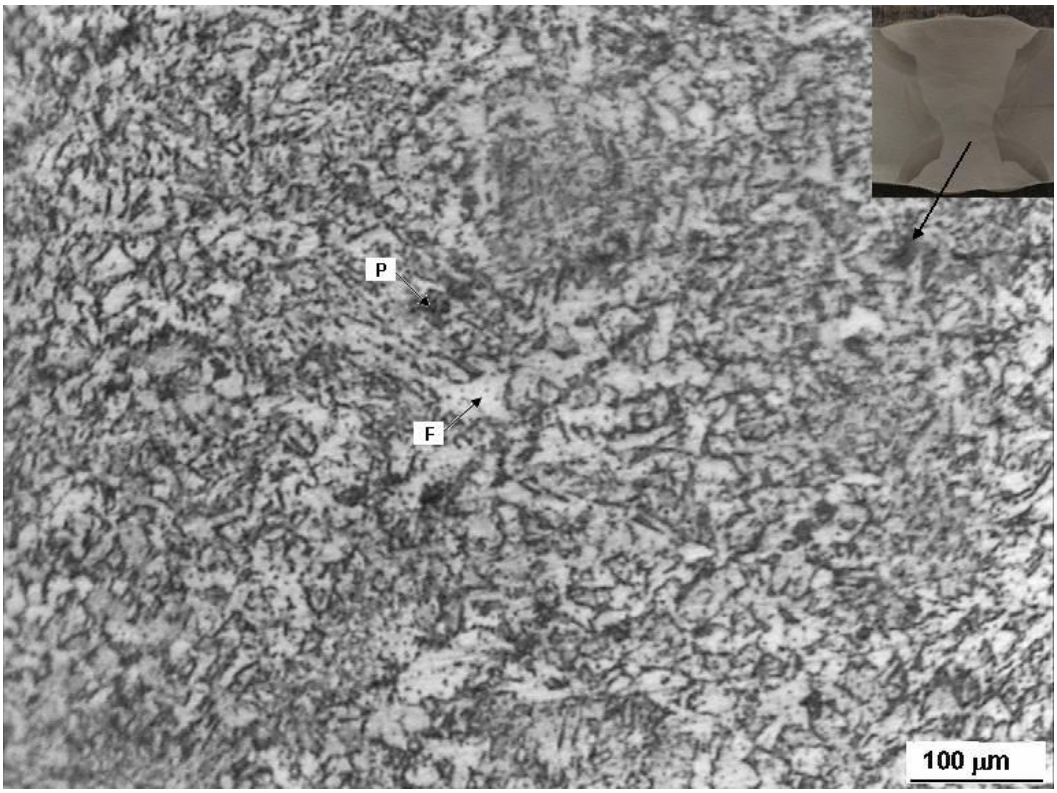
Şekil 5.60. WT2 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



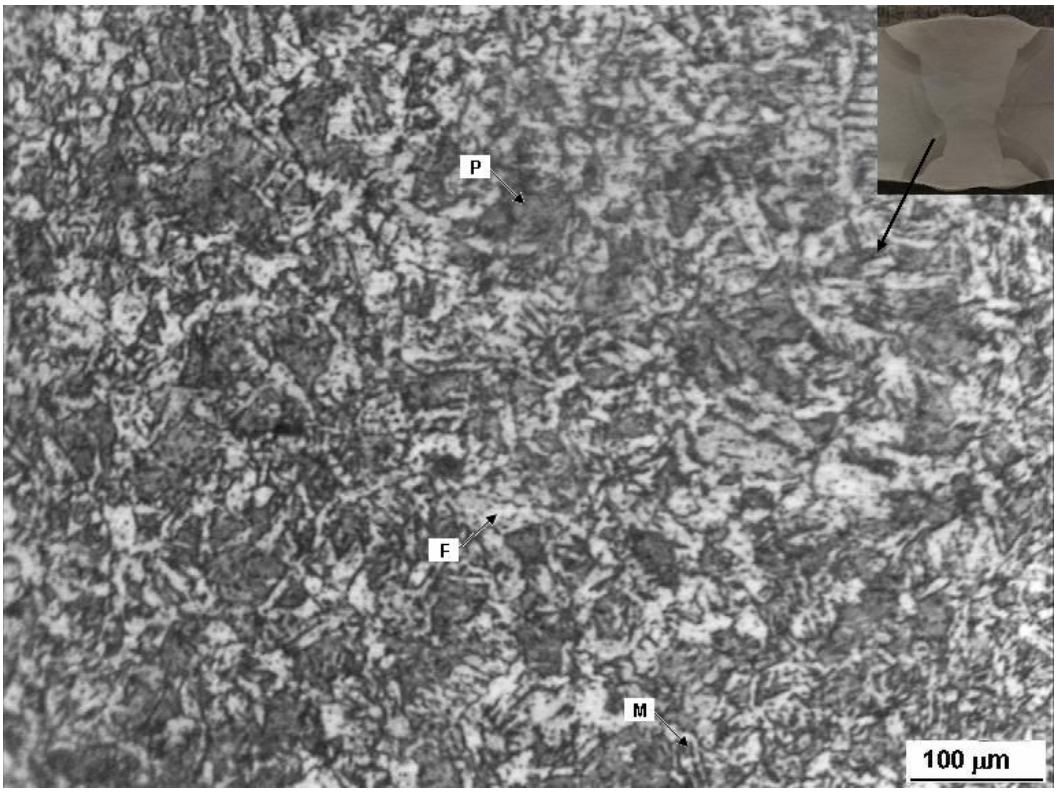
Şekil 5.61. WT3 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



Şekil 5.62. WT3 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).



Şekil 5.63. WT4 numunesi kaynak bölgesi mikroyapısı (F=Ferrit; P= Perlit).

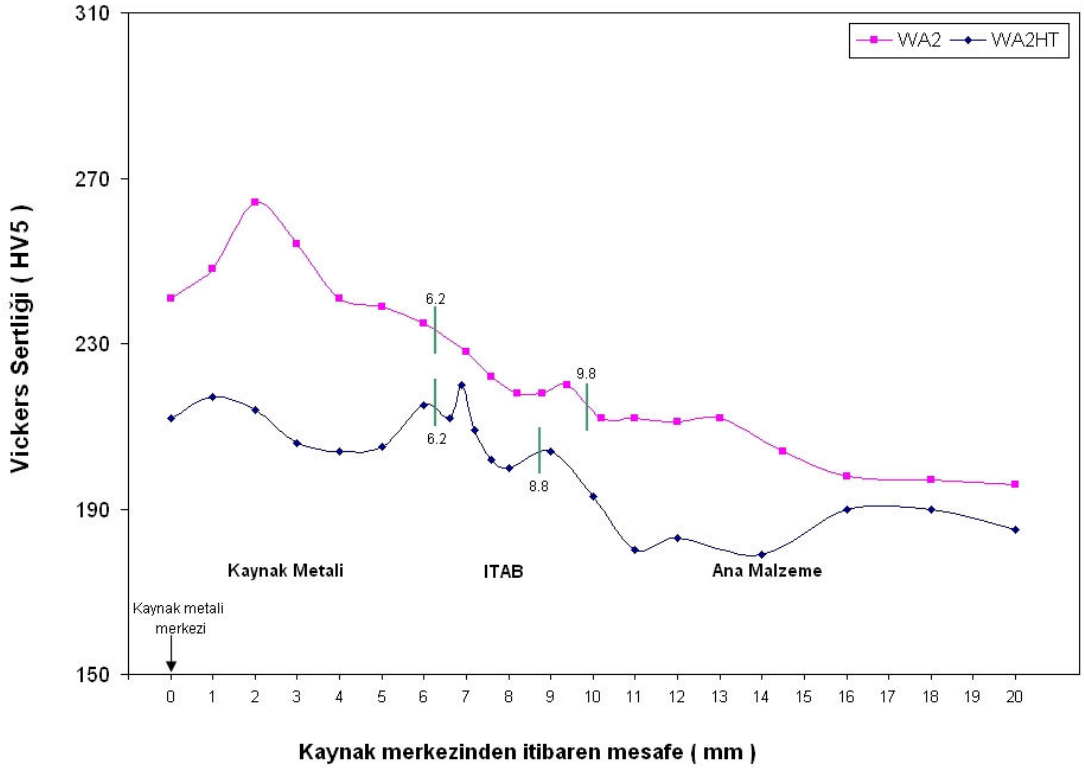


Şekil 5.64. WT4 numunesi ITAB mikroyapısı (F=Ferrite; P= Perlit; M=Martenzit).

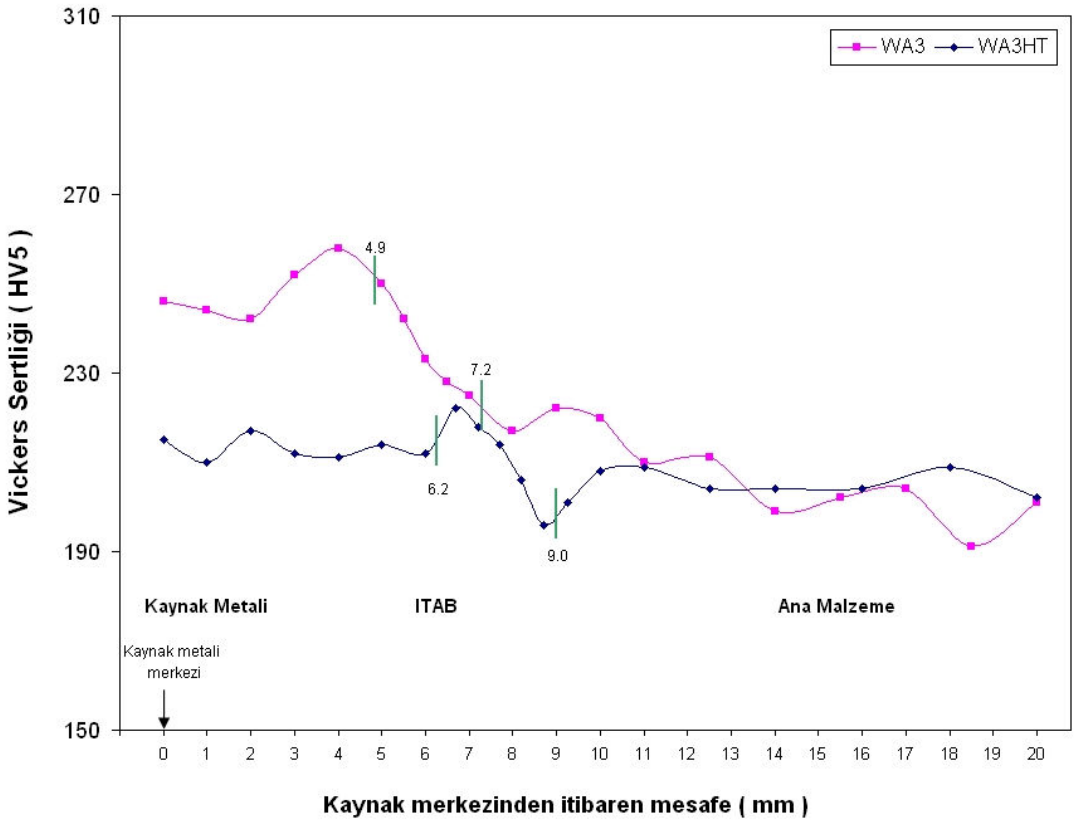
Şekil 5.57, 5.59, 5.61 ve 5.63'te SAW yöntemi ile kaynağı yapılan deney numunelerinin kaynak bölgesi mikroyapıları verilmiştir. Kaynak bölgesi mikroyapısı ferrit ve perlit fazlarından oluşmaktadır. Isı girdisinin artışıyla hızlı soğuma etkileri azalıyor ve mevcut fazlarda yumşama meydana gelerek Şekil 5.20'den görüleceği üzere tokluk değerleri artmaktadır. Şekil 5.58, 5.60, 5.62 ve 5.64'te ise SAW yöntemi ITAB bölgesi mikroyapıları verilmiştir. Mikroyapı ferrit ve perlit fazlarından oluşmaktadır. Fakat, ısı girdisinin daha fazla artmasıyla 25 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.64'ten görüleceği üzere martenzit fazları oluşmaktadır.

5.6. Sertlik Deneyi Sonuçları

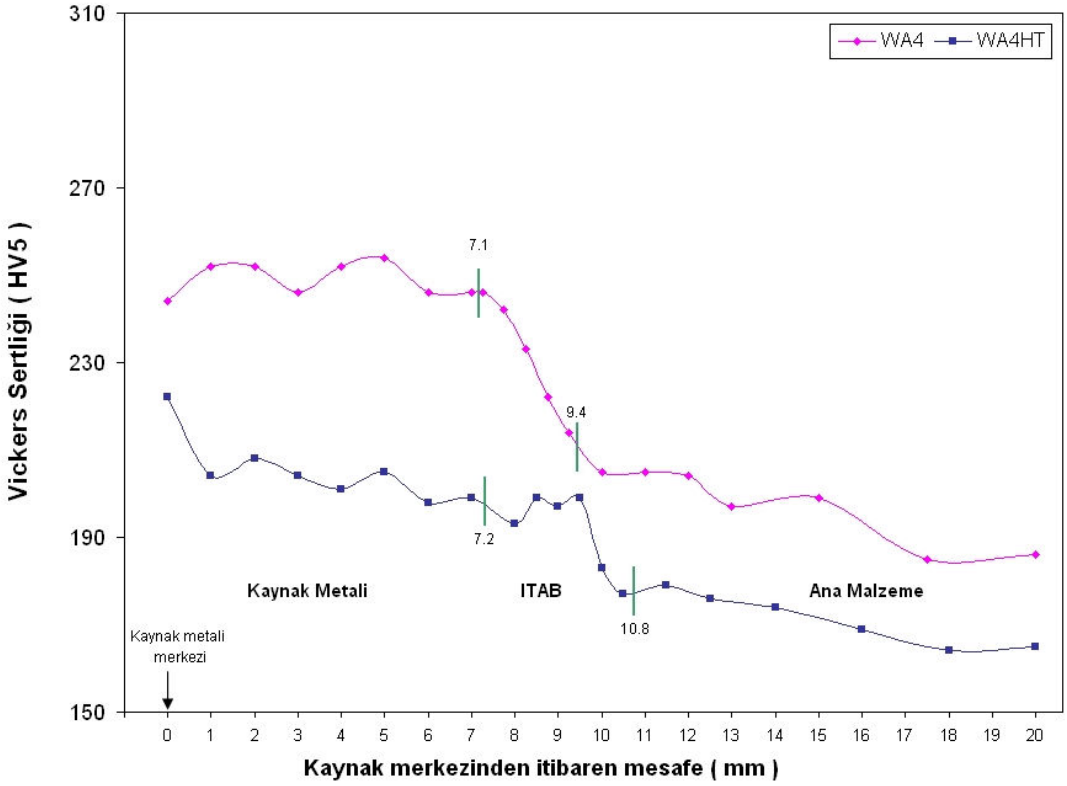
Yapılan çalışmada Tablo 4.4'te verilen kaynak parametreleri ve dört kaynak prosesine göre (SMAW, SAW, GTAW ve FCAW) işlemleri tamamlanan deney numunelerin kaynak merkezinden itibaren alınan sertlik değerleri Şekil 5.65-5.85 'de verilmiştir.



Şekil 5.65. WA2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

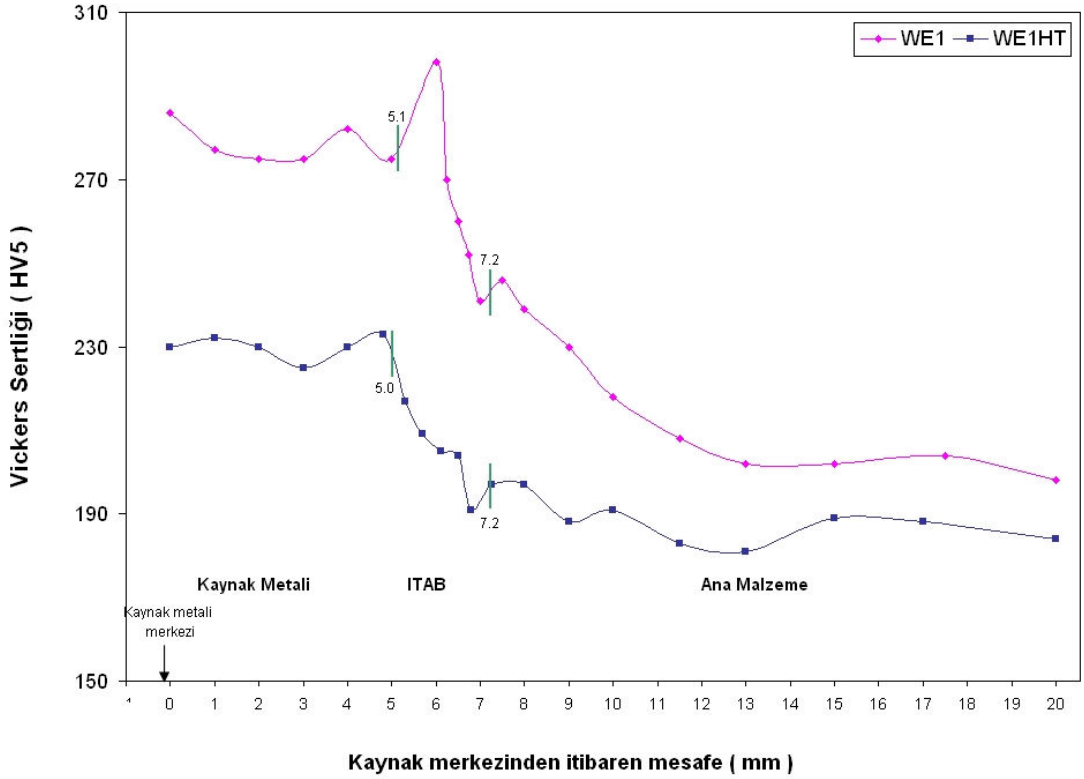


Şekil 5.66. WA3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

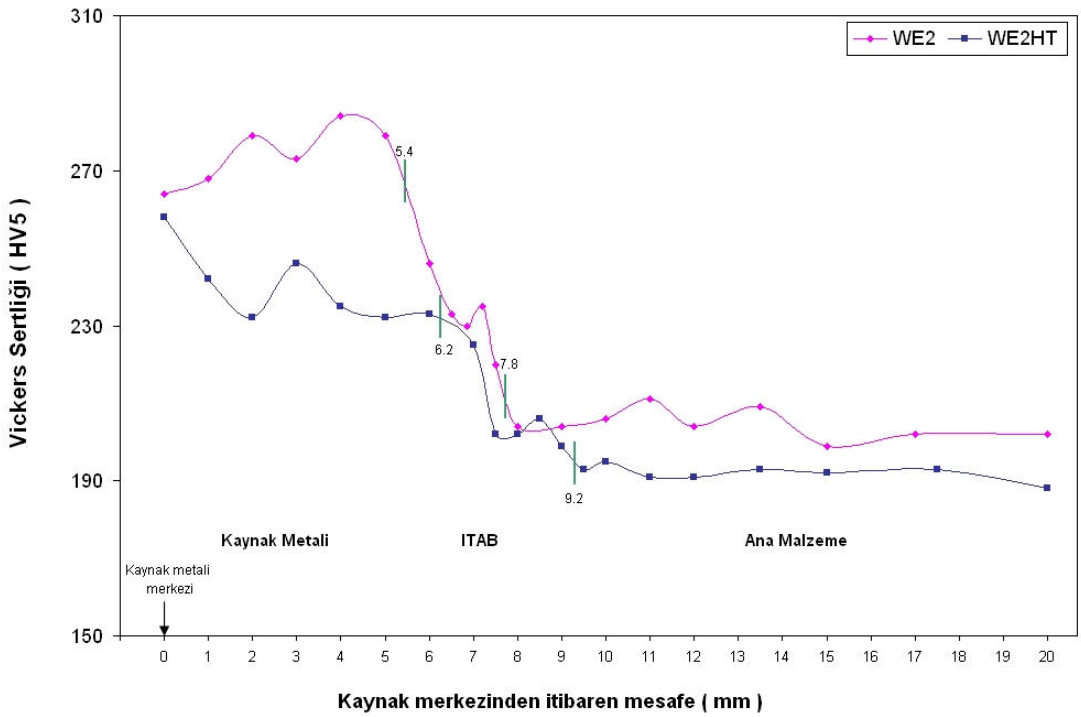


Şekil 5.67. WA4 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

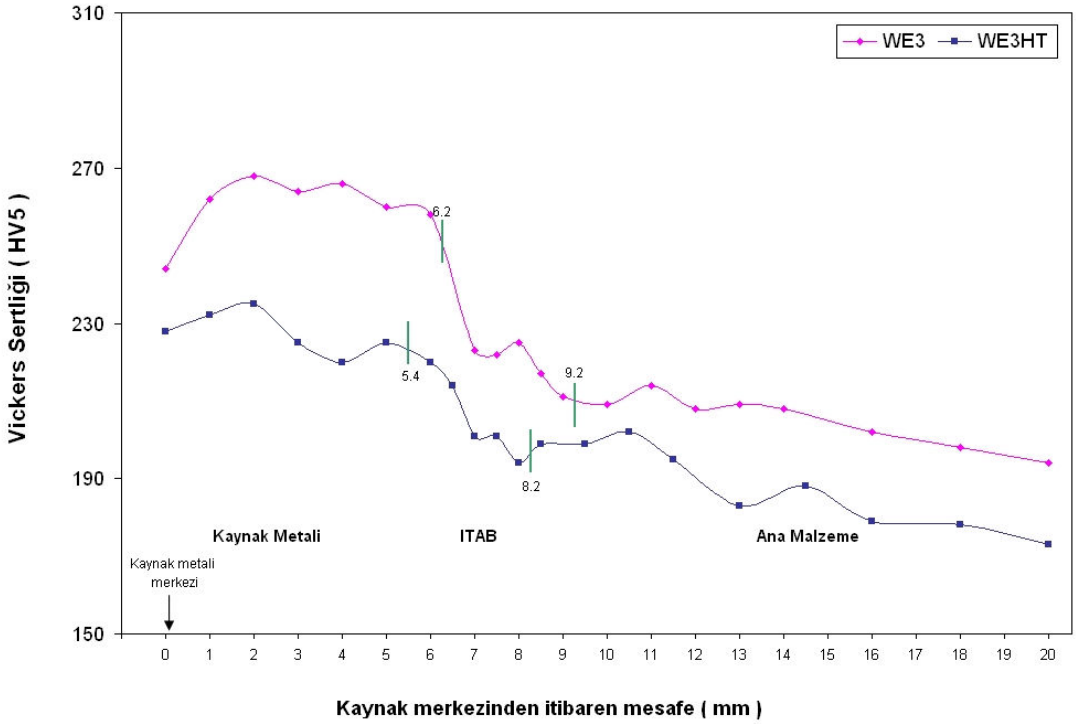
GTAW kaynak yöntemleri ile kaynağı yapılan deney numunelerinin kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimleri Şekil 5.65, 5.66, 5.67'de 13, 16 ve 20 kj/cm ısı girdilerinden görüleceği üzere yapılan ölçümler sonucunda ısıl işlemli numunelerin sertlik değerleri ısıl işlemsize göre daha düşük çıkmaktadır. Bunun nedeni olarak kaynak işlemi sonucunda oluşan sert fazların ve gerilimlerin ısıl işlem ile giderildiği anlaşılmaktadır. Isı girdisinin artması ile hızlı katılaşma etkileri azaldıkça kaynak bölgesi sertlik değerleri düşüş görülmektedir. Hızlı katılaşma ile en yüksek sertlik değeri 13 kj/cm ısı girdisinde gerçekleşmiştir. ITAB bölgesi sertlik değerleri kaynak bölgesine göre daha düşük olduğu grafiklerden açıkça gözükmektedir. Şekil 5.67'de 20 kj/cm ısı girdisinde kaynak dikişinde sertliklerin değişmediği açıkça gözükmekte iken yüksek enerji girişinin etkisiyle ısıl işlemli numunelerin sertlik değerlerinde belirgin bir azalma açıkça gözükmektedir. Tüm ısı girdilerinde ITAB bölgesinden alınan sertlik değerleri dikiş bölgesine göre ısıl işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış numunelerin sertliğinin düştüğü Şekil 5.65, 5.66, 5.67'de açıkça görülmektedir. Bunun nedeni olarak Tablo 4.1'de kimyasal özellikleri ve Tablo 4.2'de mekanik özellikleri verilen kaynak dolgu metalinin ana malzemeye göre Mn, Si oranları bakımından daha zengin ve mekanik özelliklerinin iyi olması söylenebilir.



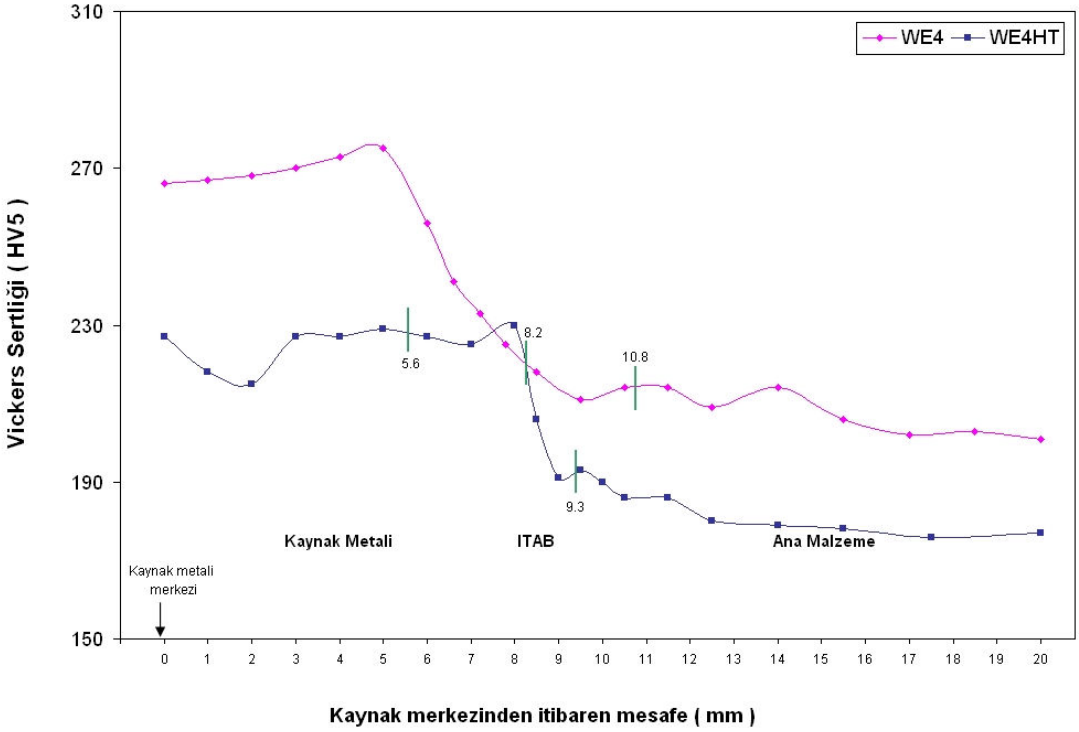
Şekil 5.68. WE1 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.



Şekil 5.69. WE2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

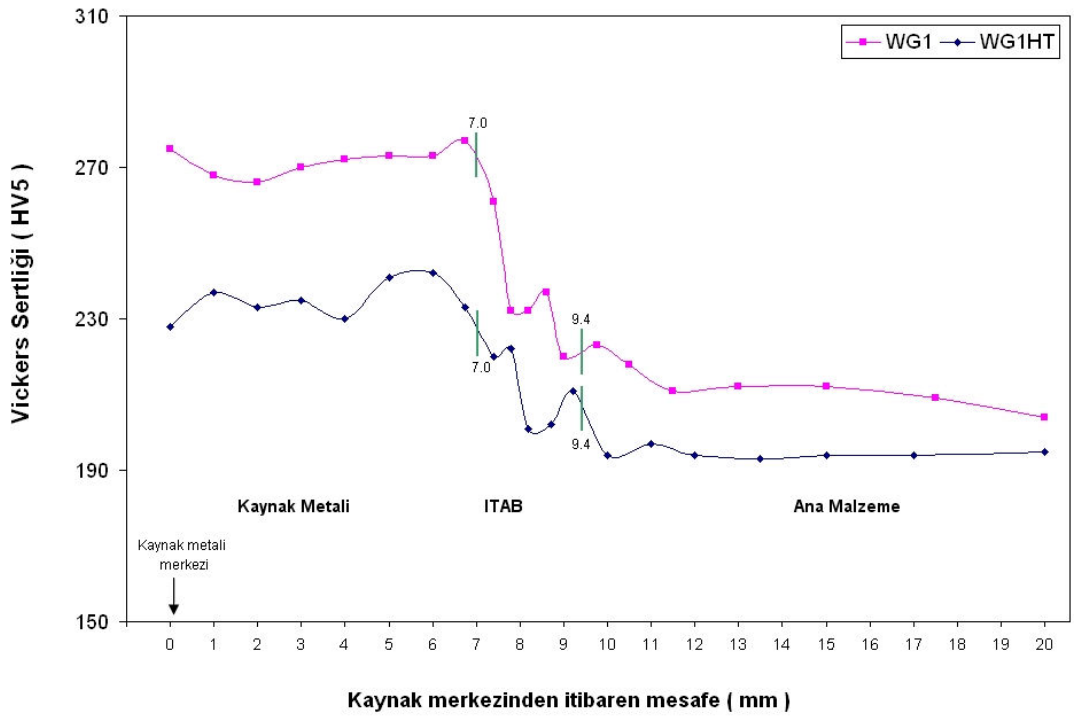


Şekil 5.70. WE3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

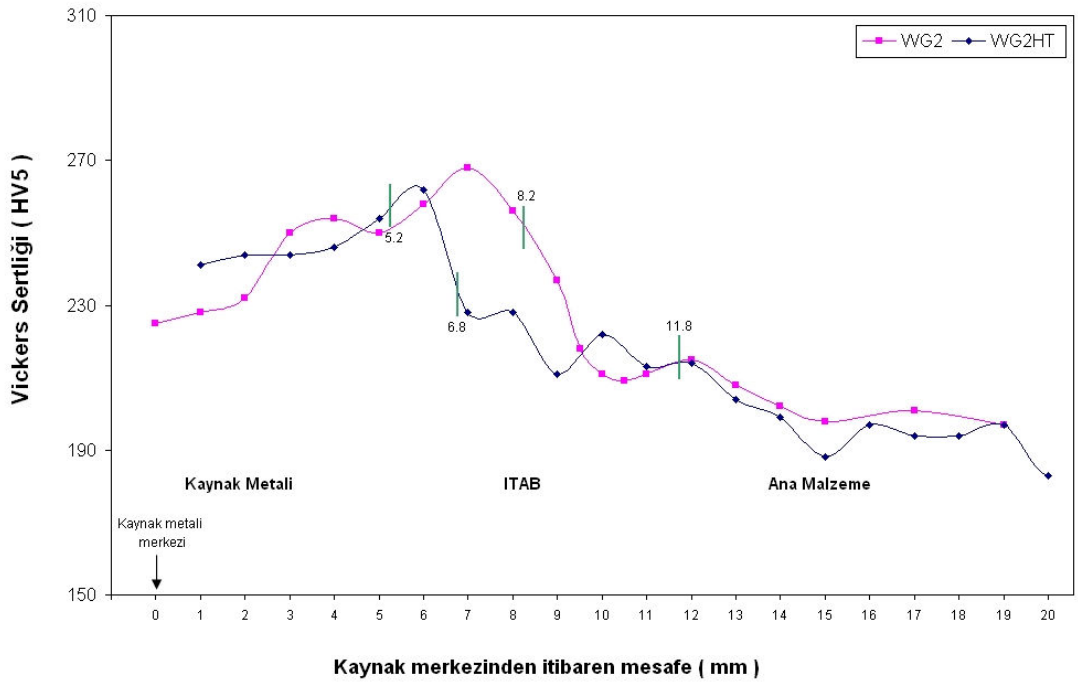


Şekil 5.71. WE4 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

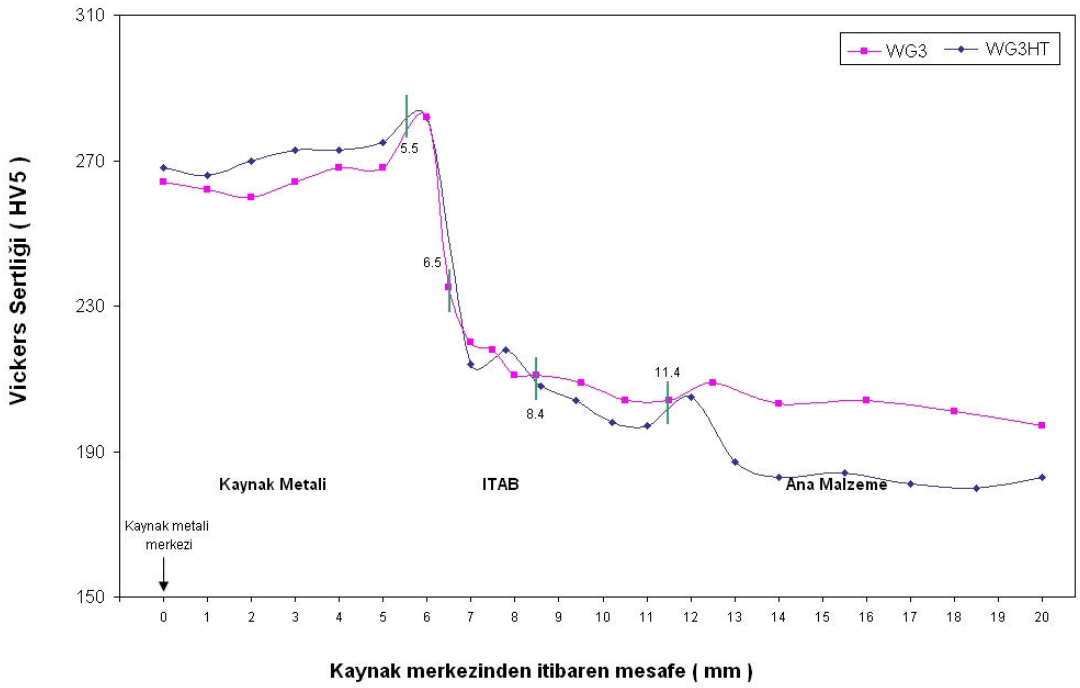
SMAW kaynak yöntemlerinde 10, 13, 16 ve 20 kj/cm ısı girdileri ile yapılan kaynak işleminden sonra gerilim giderme ısıl işleminin etkisi Şekil 5.68, 5.69, 5.70 ve 5.71'de görüleceği üzere ısıl işlem görmüş numuneleri sertlik değerleri ısıl işlem uygulanmayan numunelere göre daha düşük çıkmaktadır. Kaynakta soğuma ile meydana gelen artık gerilimler giderilmiştir. Dikiş bölgesinde en yüksek sertlik değeri 286 $HV_{0.5kg.}$ ile 10 kj/cm ısı girdisinde hızlı soğuma ile oluştuğu anlaşılmaktadır. 16 kj/cm ısı girdisinde ise en düşük 244 $HV_{0.5kg.}$ sertlik değerleri elde edilmiştir. Artan ısı girdisi ile sertlik değerlerinin dikiş bölgelerinde azalmakta olup 20 kj/cm ısı girdisinde az miktarda artış göstermektedir. Bunun nedeni olarak kaynak dolgu metalini yüksek enerji girişi nedeniyle birim zamanda kaynak ağzına yığılan dolgu metalinin az olması ve çekilen paso sayısının az olması sebebiyle üstten çekilen pasonun alt pasolarda tavlama işlemini yapamadığı düşünülmektedir.



Şekil 5.72. WG1 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

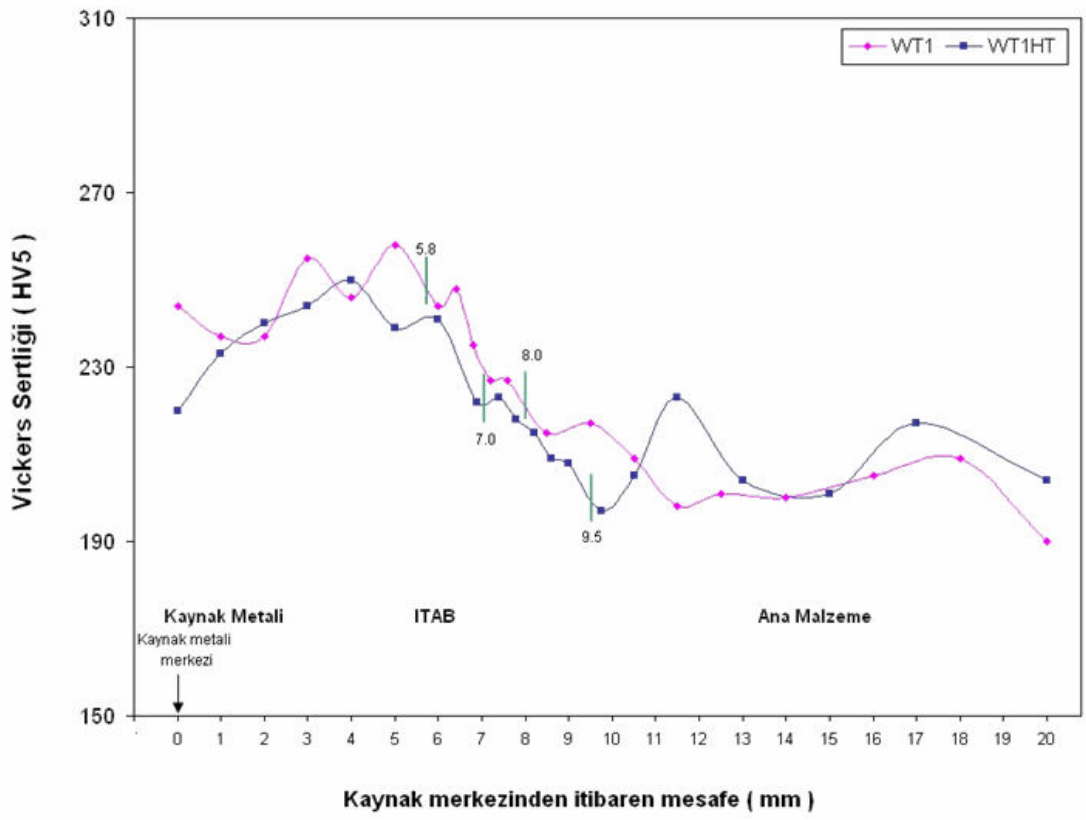


Şekil 5.73. WG2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

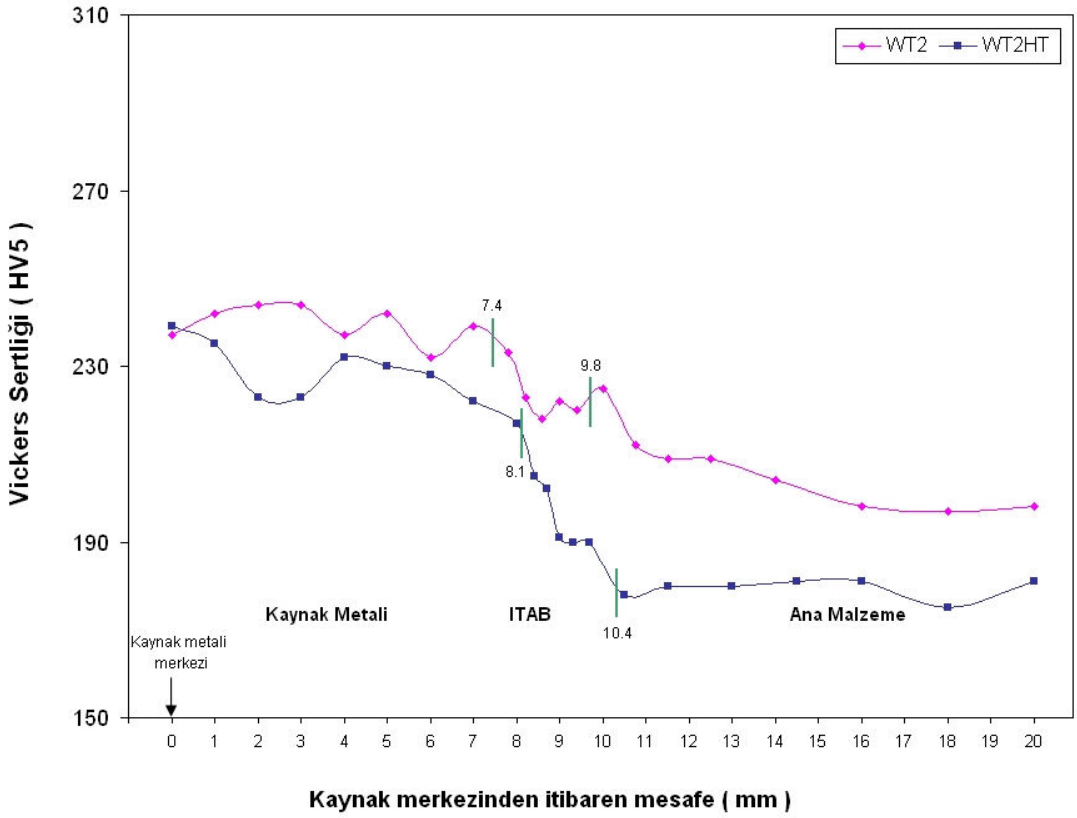


Şekil 5.74. WG3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

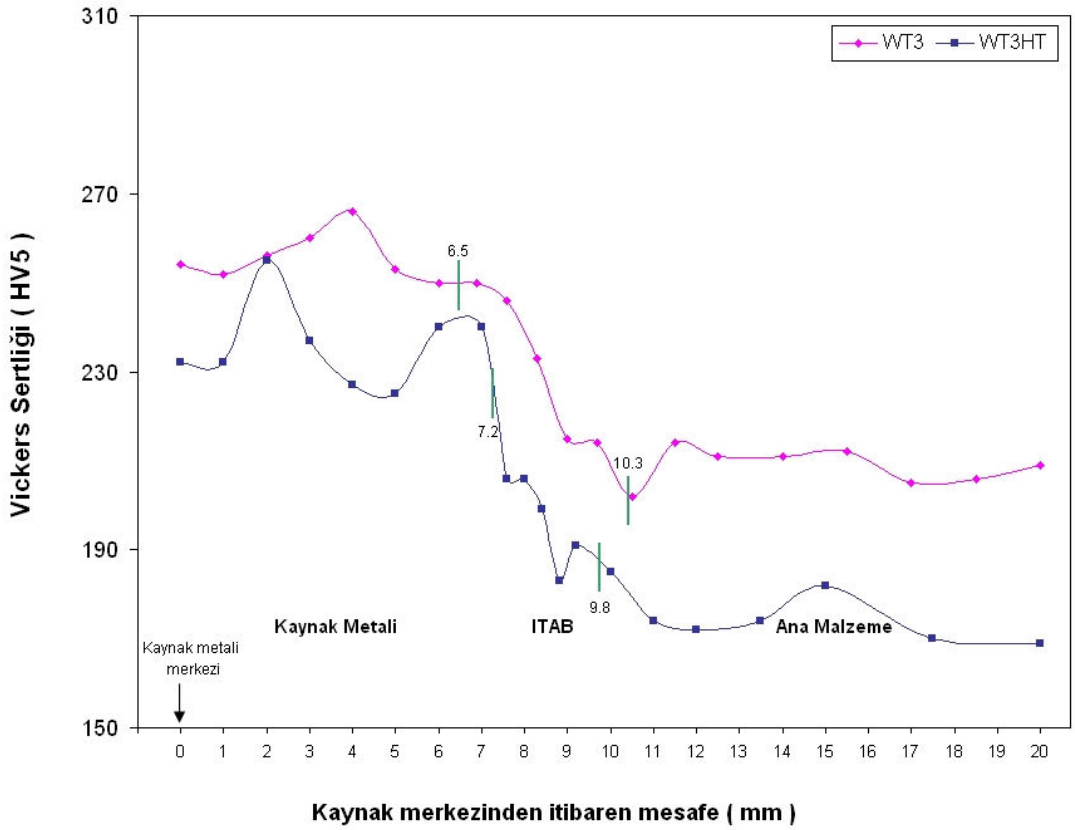
FCAW kaynak proseslerinde ise 13 kj/cm ısı girdisinde Şekil 5.72'den görüleceği üzere kaynak işleminden sonra yapılan ısıl işlemin dikiş ve ITAB bölgelerinde sertliklerde azalmaya yardımcı olduğu görülmektedir. Şekil 5.73, 5.74'te 16 kj/cm ve 20 kj/cm ısı girdilerinde ise ısıl işlemin fazla etki etmediği açıkça görülmektedir. Bunun nedeni olarak bu yöntemde koruyucu gaz olarak kullanılan karmix (%82 Ar + %18 CO_2) gazının kaynak banyosunu dış etkenlerden tam olarak koruyamadığı düşünülmektedir. Aynı zamanda yüksek ısı girdisinin etkisiyle kaynak banyosunun büyük olması sebebiyle kaynak parametreleri uygun olarak kullanılmadığı düşünülmektedir. WG4 numunesi sertlik değeri Tablo 4.3'de radyografik test raporlarından görüleceği üzere sıralı cüruf hatası nedeniyle ölçülememiştir. FCAW yönteminde yüksek enerji girişlerinde kaynak banyosunun kontrolünün zor olması sebebiyle bu yöntemde yüksek ısı girdilerinde çalışılmaması sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



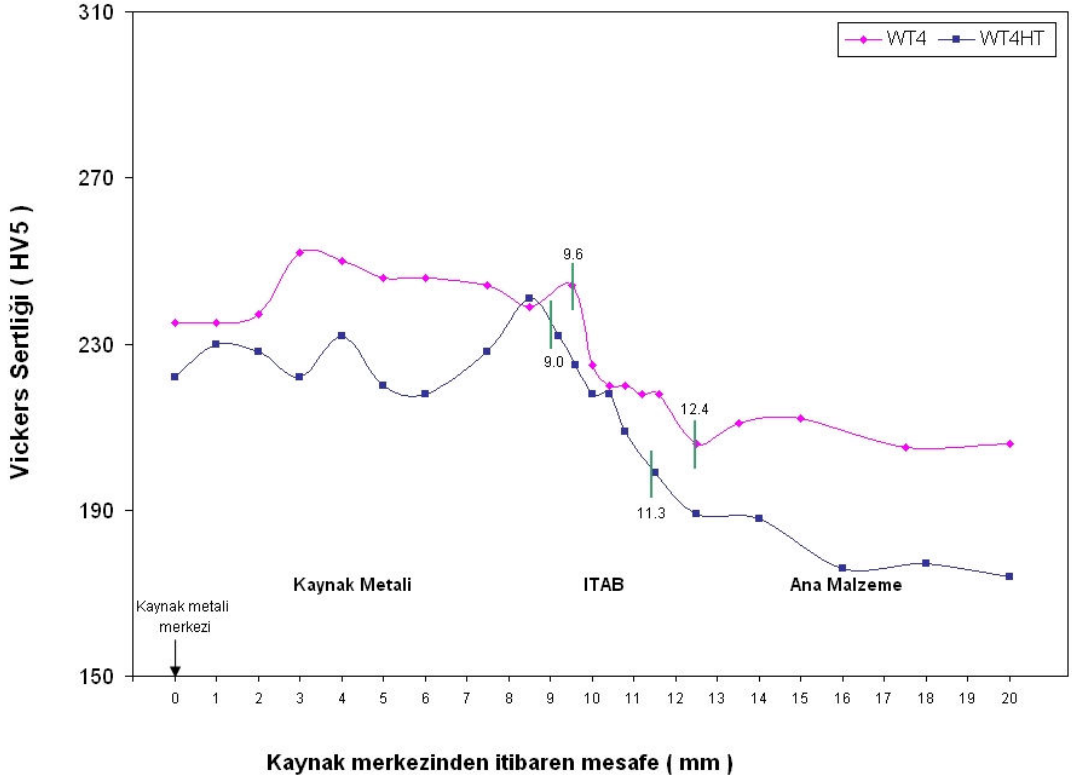
Şekil 5.75. WT1 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.



Şekil 5.76. WT2 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

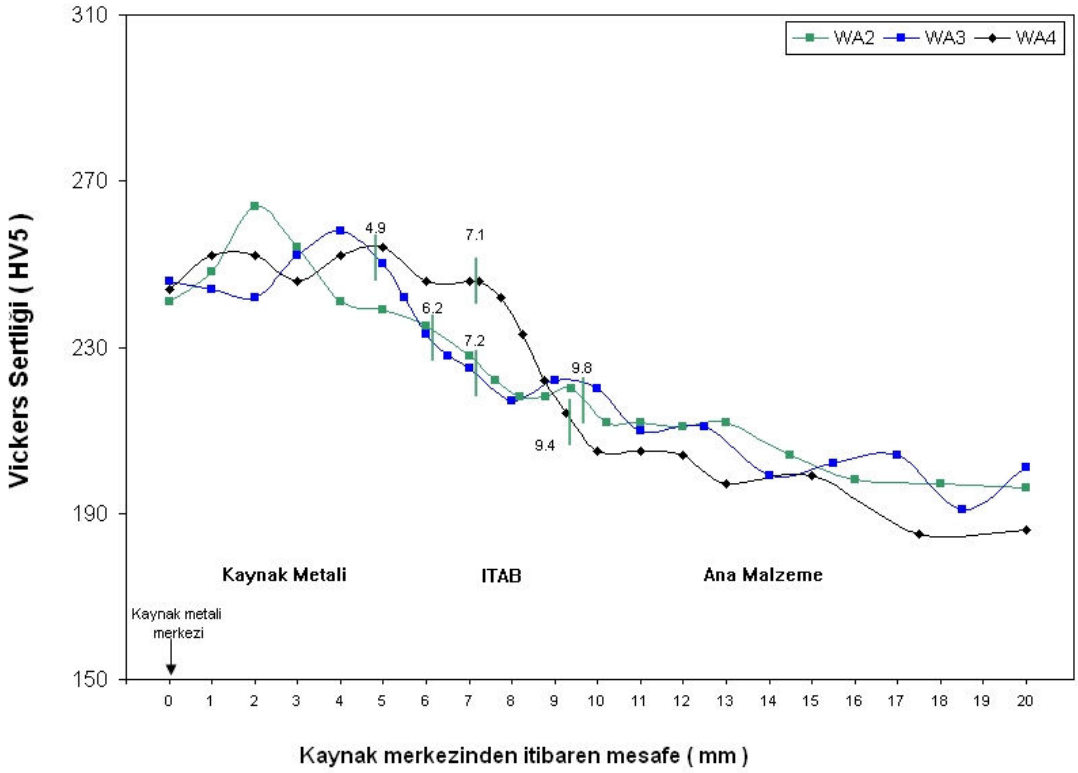


Şekil 5.77. WT3 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.



Şekil 5.78. WT4 numunesi kaynak merkezinden itibaren sertlik değişimi.

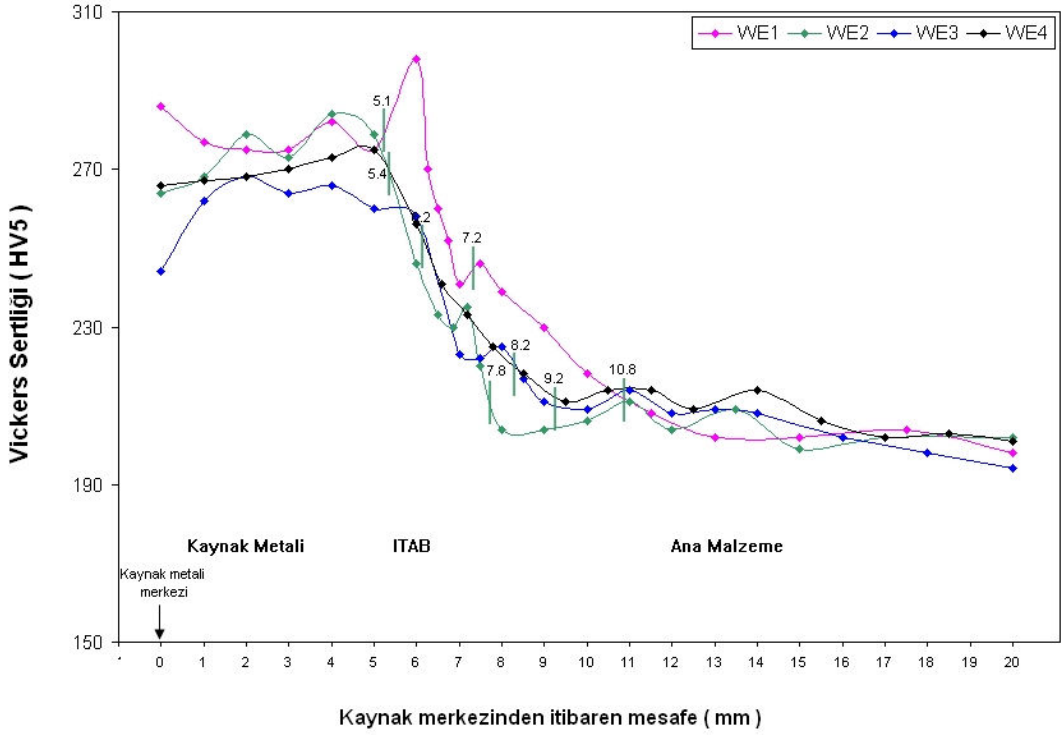
SAW kaynak yöntemlerinde ısı girdisi 13 kj/cm'den 16 kj/cm'ye çıktığında Şekil 5.75, 5.76'dan görüleceği ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz numuneler sertliklerinde soğumanın yavaşlaması ile belirgin bir azalma görülmektedir. Bunun sebebi olarak düşük ısı girdisinde hızlı soğuma ile oluşan sert fazlardan varlığı öngörülmekte olup bu fazlar 16kj/cm ısı girdisinde yumuşama göstermektedir. Şekil 5.77'de 20 kj/cm ısı girdisinde sertlikte bir miktar artış görülmekte olup tüm ısı girdileri içinde dikişte en yüksek ölçülen değer 266 $HV_{0.5kg.}$ ile bu ısı girdisindedir. Sertliğin 20 kj/cm ısı girdisinde bir miktar artmasının sebebi olarak artan sı girdisi ile kaynak işleminde çekilen paso sayısının az olmasıdır. En düşük sertlik değeri ise 16 kj/cm ısı girdisinde 232 $HV_{0.5kg.}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.79. GTAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi

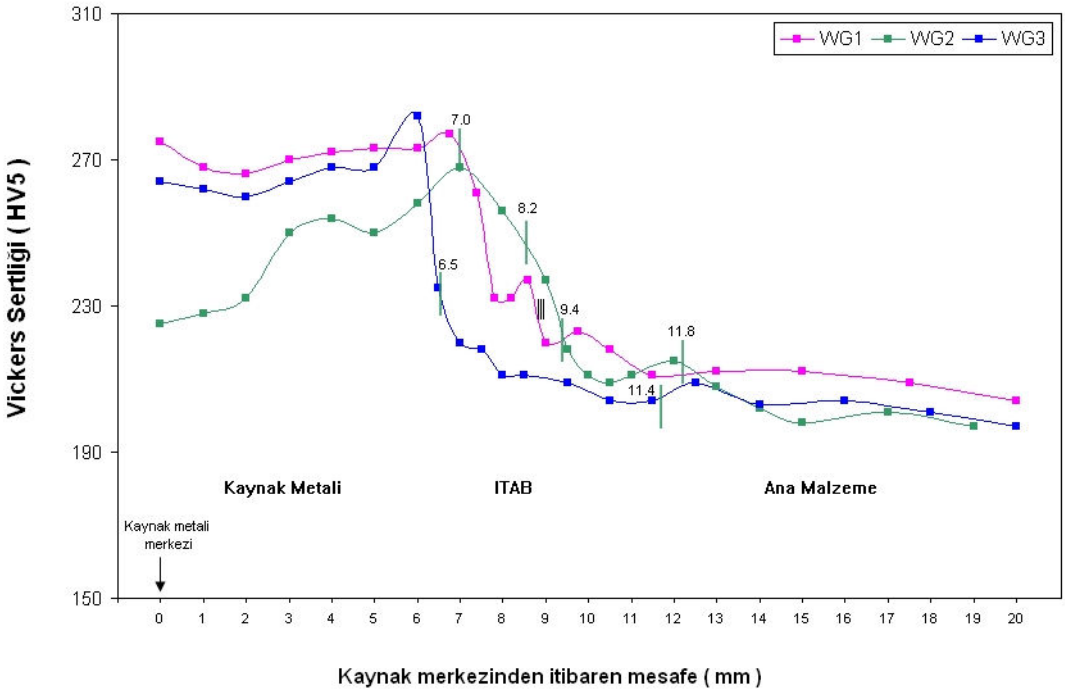
Şekil 5.79'da GTAW yöntemiyle 13, 16 ve 20 kj/cm ısı girdilerinde kaynağı yapılan deney numunelerinin sertlik değerleri birlikte verilmiştir. Kaynak dolgu metali bölgesinde ısıl işlem görmeyen numuneler üzerinden alınan sertlik sonuçlarına göre en yüksek sertlik değeri 13 kj/cm ısı girdisinde 264 $HV_{0.5kg.}$ olarak ölçülmüştür.

Bunun nedeni olarak düşük ısı girdisinde hızlı soğuma neticesinde martenzit ve widmanstaten ferrit (Şekil 5.35) gibi fazların varlığı sebep olmaktadır. Şekil 5.79'da kaynak dikişinde en düşük sertlik değeri 16 kj/cm ısı girdisinde 242 $HV_{0.5kg.}$ olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesinde sonra mesafeye bağlı olarak ölçülen sertlik değerlerinde düşüşler açıkça gözükmektedir. Ayrıca değişime uğramamış bölgenin ana malzemeye (Tablo 5.2) göre biraz daha sert olduğu görülmekte olup, bu bölgelerde kaynak işlemi ile malzemeye verilen enerjinin etkilediği düşünülmektedir.



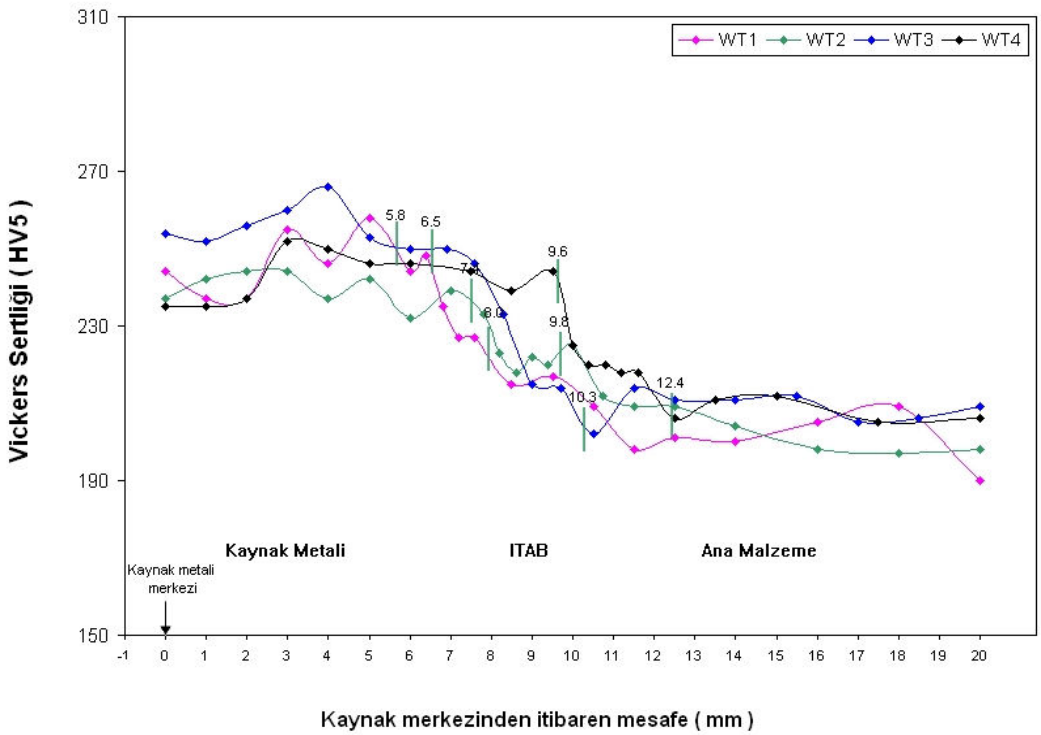
Şekil 5.80. SMAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi.

Şekil 5.68, 5.69, 5.70, 5.71 ve 5.80'den görüleceği üzere ITAB bölgesi sertlik değerleri dikiş bölgesinden daha az çıkmaktadır. Tablo 4.1, 4.2, 5.1 ve 5.2'den görüleceği üzere kimyasal ve mekanik özellikleri ana malzemeye göre daha sert yapıda olan kaynak dolgu metali dikişte daha sert bir yapıyı oluşturmaktadır. ITAB'dan sonra alınan sertlik değerleri mesafeye bağlı olarak ana malzemeye yaklaştıkça düşmektedir.



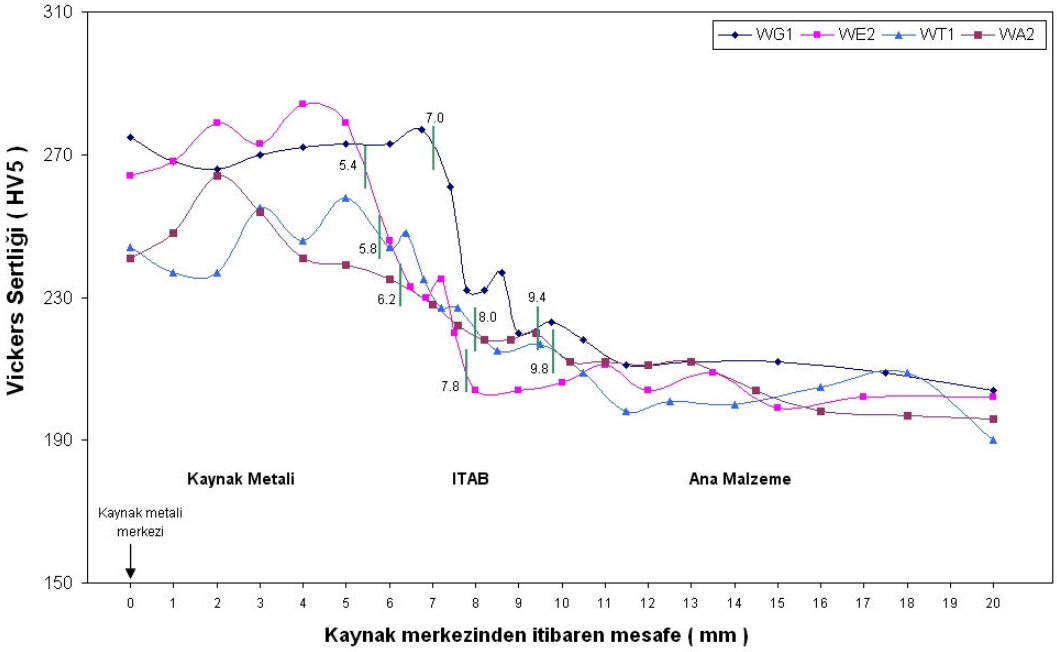
Şekil 5.81. FCAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi.

FCAW yöntemlerinde Şekil 5.81'den görüleceği üzere en yüksek sertlik değeri gerçekleşen hızlı soğuma ile en düşük ısı girdisi 13 kj/cm'de 277 $HV_{0.5kg}$ olarak, en düşük sertlik değeri ise daha düşük enerji girişine göre daha yavaş soğuma sırasında 16 kj/cm ısı girdisinde 232 $HV_{0,5kg}$ olarak gerçekleşmiştir. FCAW kaynak yöntemlerinde Tablo 4.1, 4.2, 5.1 ve 5.2'den görüleceği üzere kaynak dolgu metalinin kimyasal ve mekanik özelliklerinin ana malzemeye göre daha iyi olması ile kaynak dikişinin sertlik değerleri ITAB'a göre daha fazladır. Değişime uğramamış bölgede ana malzemeye göre daha serttir.

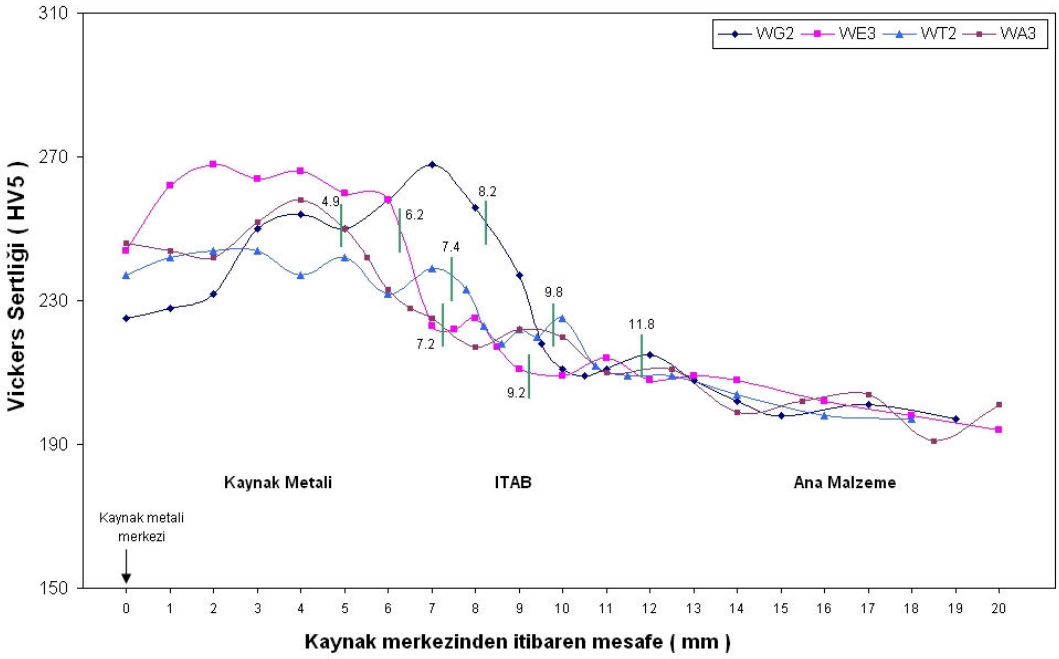


Şekil 5.82. SAW kaynağı ısı girdisine bağlı olarak sertlik değişimi.

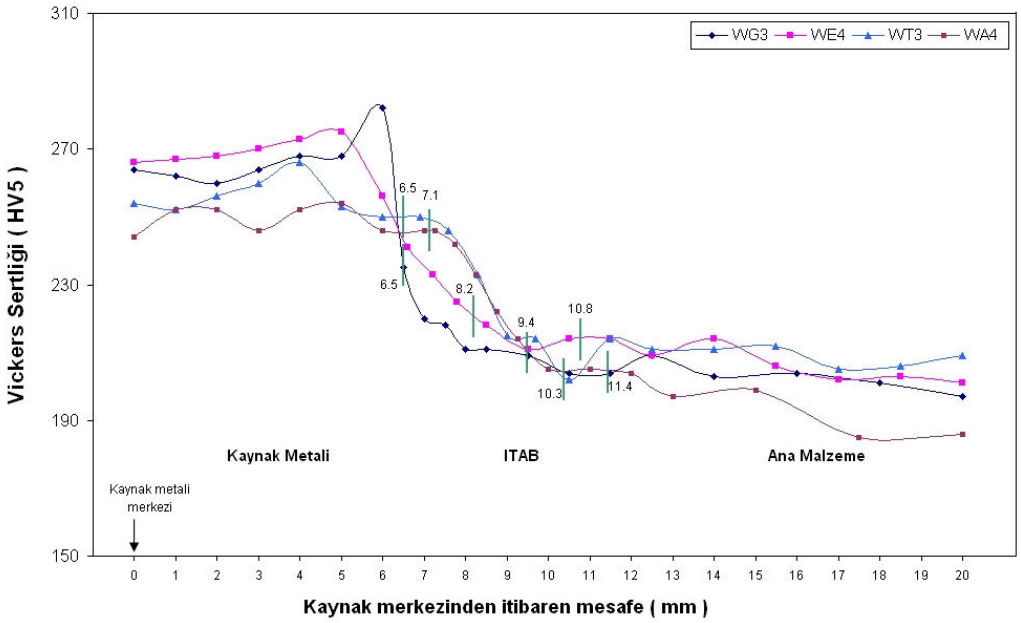
Şekil 5.82'den görüleceği üzere kaynak dikişi bölgesinden ITAB geçildiğinde sertlikte önemli bir düşüş gözlemlenmektedir. Bunun sebebi diğer proseslerde olduğu gibi Tablo 4.1, 4.2, 5.1 ve 5.2'den görüleceği üzere kaynak dolgu metalinin kimyasal ve mekanik özelliklerinin ana malzemeye göre daha iyi olmasıdır. Kaynak bölgesi en yüksek sertlik değeri 20 kj/cm ısı girdisinde 266 $HV_{0.5kg}$ olarak ölçülmüştür. Kaynak bölhgesi en düşük sertlik değeri ise, 222 $HV_{0.5kg}$ olarak 25 kj/cm ısı girdisinde ölçülmüştür. ITAB bölgesi en yüksek sertlik değeri ise, 13 kj/cm ısı girdisinde 248 $HV_{0.5kg}$ olarak ölçülmüştür. Değişime uğramamış bölgede ısı girdilerine bağlı olarak sertlik değerleri 190-225 $HV_{0.5kg}$ arasında ölçülmüştür ve bu değer ortalama olarak ana malzemeye göre % 24 artmıştır.



Şekil 5.83. 13 kj/cm kaynak ısı girdisine proseslerin sertlik değişimi.



Şekil 5.84. 16 kj/cm kaynak ısı girdisine proseslerin sertlik değişimi.



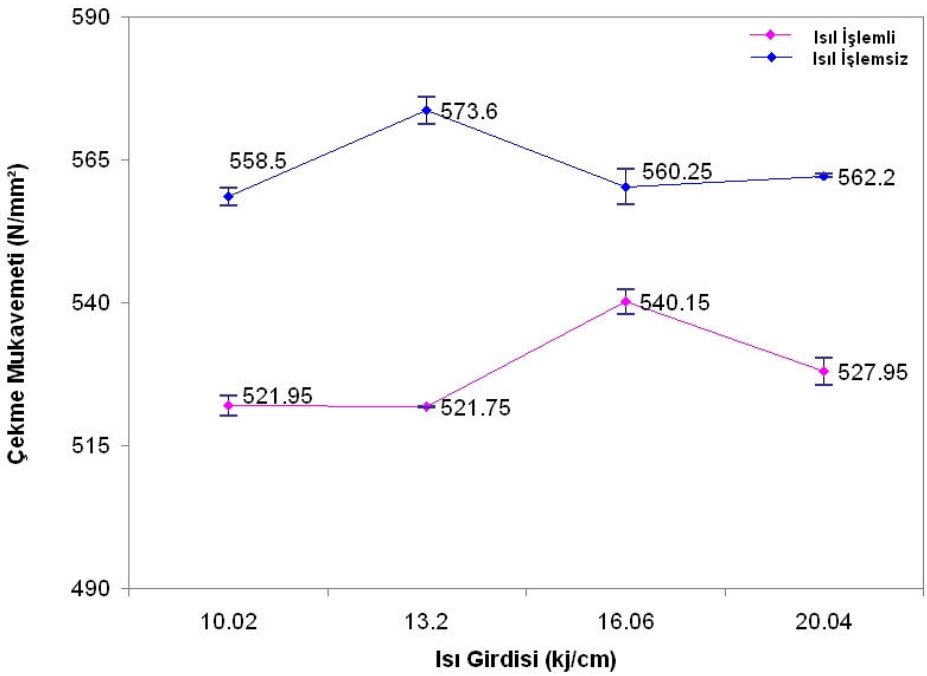
Şekil 5.85. 20 kj/cm kaynak ısı girdisine proseslerin sertlik değişimi.

Şekil 5.83, 5.84 ve 5.85'te 13, 16, 20 kj/cm ısı girdilerine ait dört kaynak yöntemi ait deney numunelerinin kaynak merkezinden itibaren sertlik değişim grafikleri verilmiştir. Dört yöntem için yapılan kaynak işlemleri sonucunda Şekil 5.83'te 13 kj/cm ısı girdisinde dolgu metali bölgesinde sertlik değeri en yüksek SMAW prosesinde, en düşük sertlik değeri ise SAW prosesinde elde edilmiştir. Tablo 4.1'de görüleceği üzere dolgu metalleri içinde C ve Mn miktarı en fazla SMAW iken en düşük SAW kaynak elektrotudur. ITAB bölgesinde ise FCAW sertlik değerinin yüksek olduğu görülmekte olup bunun nedeni olarak kaynak dolgu metalinin çapının düşük, enerji girişinin yüksek olması ile yeterli enerjinin elektrodu hızlı bir şekilde eritip geri kalan ısının ITAB'a etki etmesidir. ITAB en geniş Tablo 5.5'den görüldüğü gibi FCAW prosesinde gerçekleşmiştir. Artan enerjisinin ITAB'ın alt bölgesi olan kaba taneli bölgenin genişliğinin artırdığı anlaşılmakta olup, Şekil 5.23'den görüleceği üzere tokluk değerini düşürmekle beraber sertlik değeri artırmakta ile beraber Şekil 5.44'te mikroyapı fotoğrafında martenzit fazı bunu desteklemektedir. 16 kj/cm ısı girdisinde sertlik değerleri Şekil 5.84'ten görüleceği üzere 13 kj/cm ısı girdisine göre tüm prosesler de kaynak bölgesi ve ITAB'ın sertliklerinde düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşün sebebi olarak soğuma hızının artan ısı girdisi ile azalması gösterilmektedir. 16 kj/cm ısı girdisinde 13 kj/cm ısı girdisine benzer şekilde kaynak bölgesinde en yüksek sertlik SMAW prosesinde elde edilirken, en düşük sertlik değeri ise SAW prosesinde elde edilmiştir. ITAB

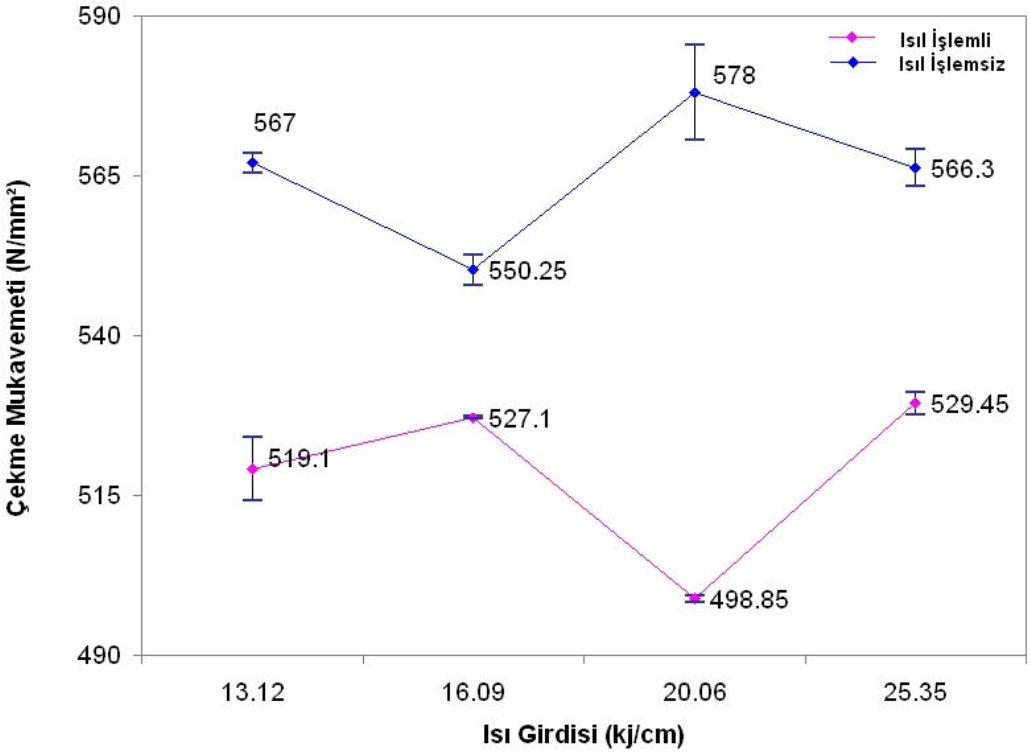
bölgesinde de FCAW proseslerinin sertlik değerleri diğer proseslere göre kaynak dolgu metalinin özelliklerinin iyi olması ve enerji girişinin elektrod çapına göre daha yüksek olması düşünülmektedir. Şekil 5.85'te 20 kj/cm ısı girdisinde ise dört proses için kaynak bölgesinde sertlik değerleri çok az yukarı kaymıştır. Bunun nedeni olarak ısı girdisinin artması, kaynak ağzına çekilen kaynak paso sayısının azalması ve böylelikle üst üste atılan kaynak pasolarının ortada kalan dolgu metalini az tavlaması düşünülmektedir. Kaynak bölgesinde sertlik değerleri içinde 13, 16 kj/cm ısı girdisinde olduğu gibi SMAW prosesinde en yüksek çıkmaktadır. ITAB bölgesinde ise sertlik değerleri dört yöntem içinde önemli bir faklılık görülmemektedir. Şekil 5.83, 5.84, 5.85'ten görüleceği üzere kaynak bölgesi, ITAB ve değişime uğramamış bölge arasındaki sertlik değerleri farklılığı en çok 13 kj/cm ısı girdisinde elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak, kaynak işlemi sırasında hızlı ısıtma, soğutma ve homojensizliklerle alakalıdır. Isı girdisinin artması ile hızlı soğuma etkileri azalıyor ve üç bölge arasındaki sertlik değeri farklılıkları daralıyor.

5.7 Çekme Deney Sonuçları

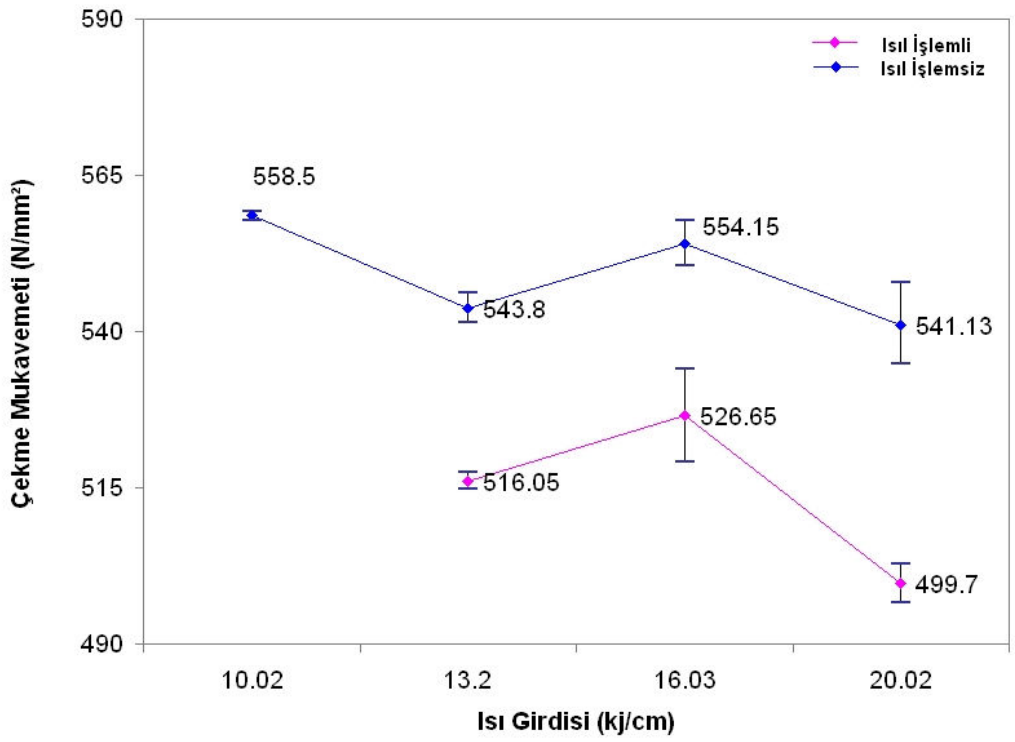
Tablo 4.4'te verilen kaynak parametrelerine göre SMAW, SAW, FCAW ve GTAW yöntemleriyle kaynağı yapılan ısıl işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış deney numunelerinin çekme deneyi mukavemet değerleri Şekil 5.86, 5.87, 5.88, 5.89 ile uzama değerleri de Şekil 5.90, 5.91, 5,92, 5.93'te verilmiştir.



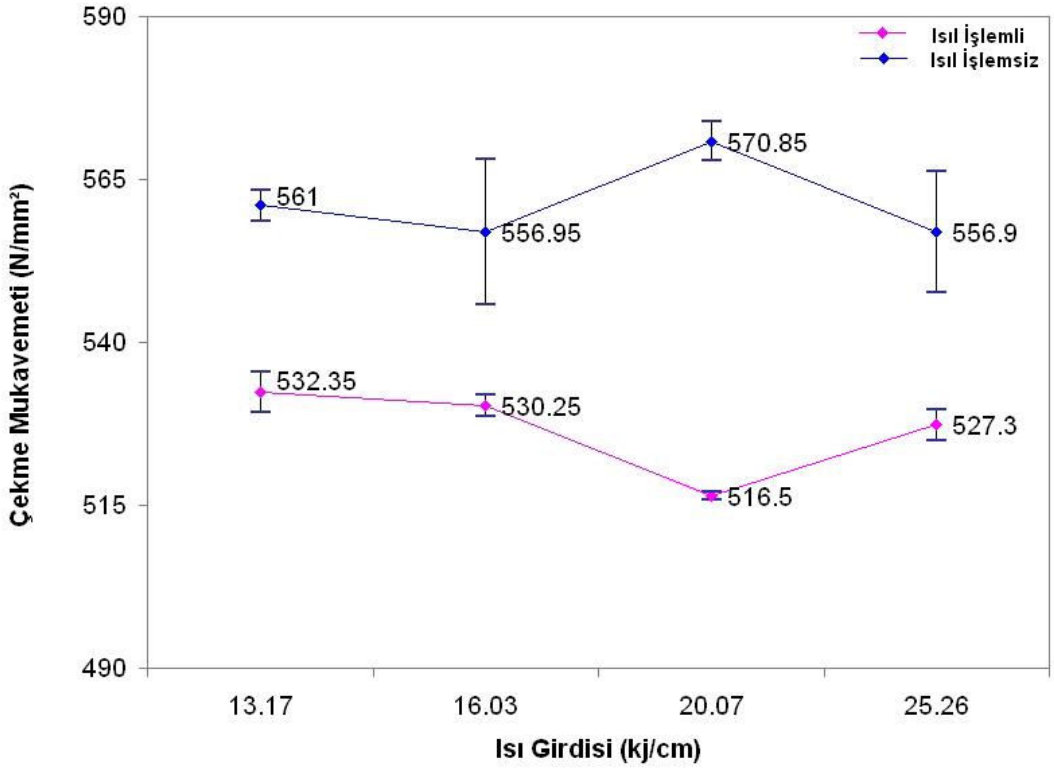
Şekil 5.86. SMAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi



Şekil 5.87. SAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi.

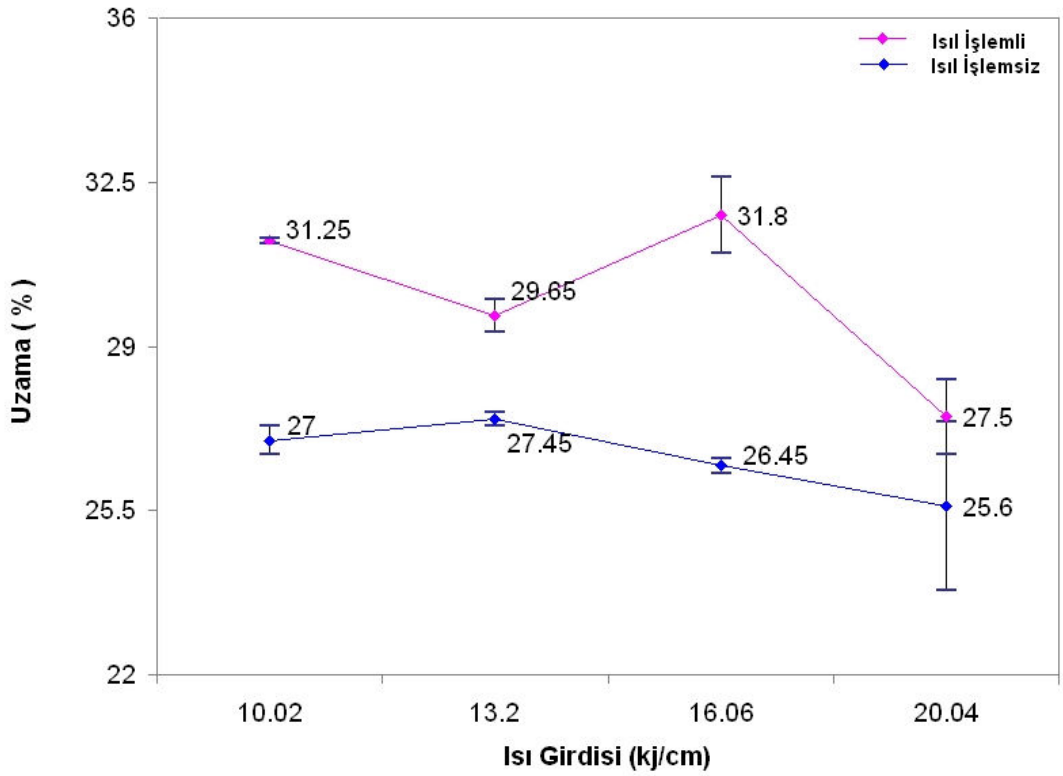


Şekil 5.88. GTAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi.

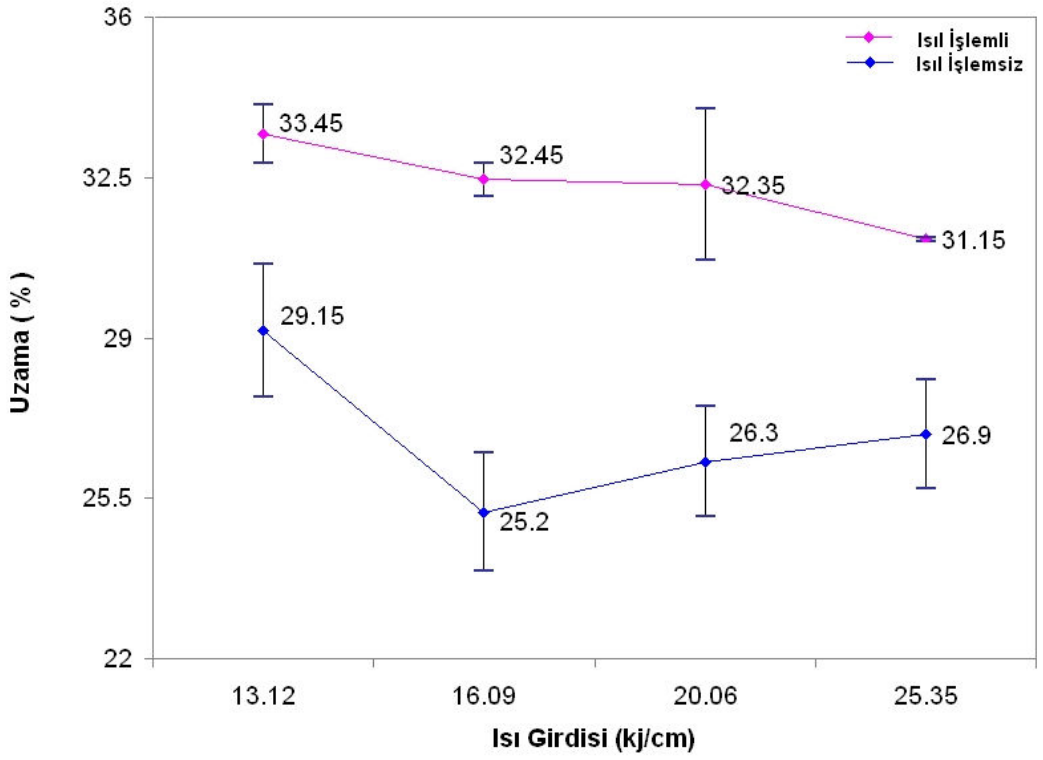


Şekil 5.89. FCAW yöntemi ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi.

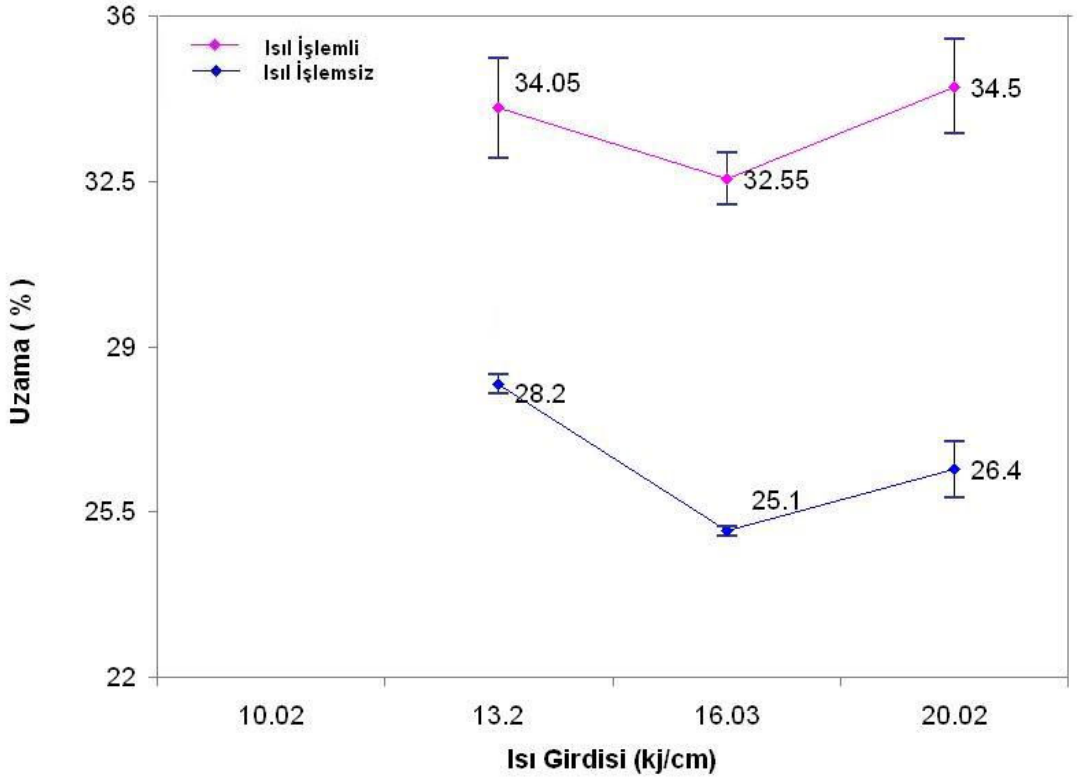
Şekil 5.86, 5.87, 5.88 ve 5.89'dan görüleceği üzere 10, 13, 16, 20 ve 25 kj/cm ısı girdilerinde yapılan kaynak işlemleri sonucunda deney numunelerinin çekme mukavemet değerleri ASME bölüm IX kısım II'ye göre standartların (485-620 Mpa) içinde çıkmıştır. Çekme deneyi sırasında tüm deney numuneleri için kopmalar kaynak edilmiş bölgenin dışından gerçekleşmiştir. Isıl işleme tabi tutulmuş deney numunelerinin deney sonuçları ısıl işlemsize göre grafiklerde altta çıkmaktadır. Bunun nedeni olarak kaynak işlemi sırasında oluşan gerilimlerin giderilmesi düşünülmektedir. Şekil 5.88'ten görüleceği üzere GTAW yöntemi 10 kj/cm ısı girdisi ile yapılan kaynaklı numune çekme deneyi yapılamamıştır, bu ısı girdisindeki deney numunesi radyografik test sonuçlarına göre Tablo 5.3'te belirtildiği sıralı cüruf hatası vardır.



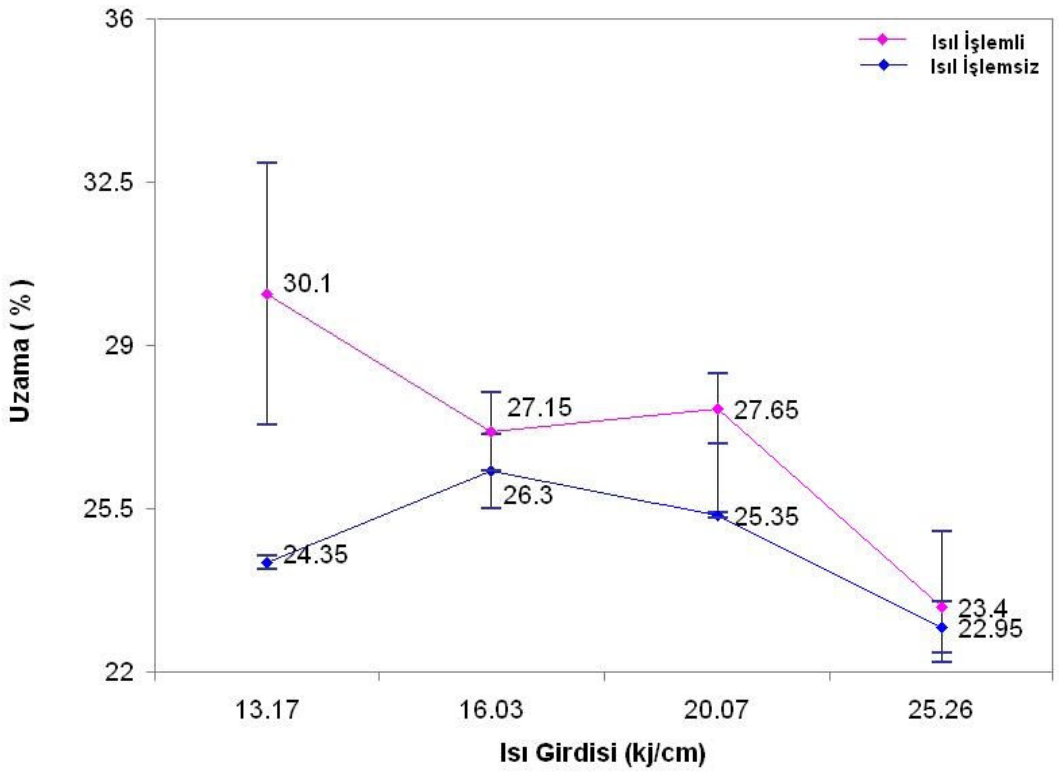
Şekil 5.90. SAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi.



Şekil 5.91. SMAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi.

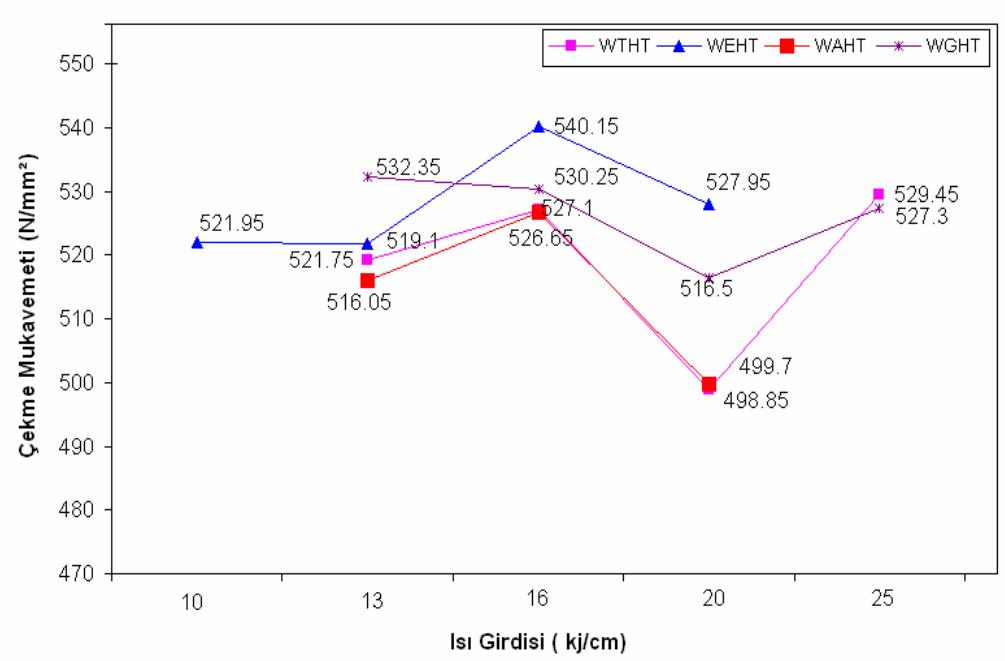


Şekil 5.92. GTAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi.



Şekil 5.93. FCAW yöntemi ısı girdisi ile %uzama değerlerinin değişimi.

10, 13, 16, 20 ve 25 kj/cm ısı girdilerine göre kaynakları yapılan deney numuneleri SAW, GTAW ve SMAW yöntemleri ile uzama değerleri Şekil 5.90, 5.91, 5.92, 5.93'ten görüldüğü üzere ısı girdisine bağlı olarak önemli bir değişiklik görülmemiştir. Şekil 5.93'te FCAW yönteminde ise 10 kj/cm ısı girdisinde %30 olan uzama değeri 25 kj/cm ısı girdisinde %23 olmakla beraber pratik olarak ihmal edilebilecek çok az bir düşüş görülmüştür. Bunun nedeni olarak FCAW yönteminde kullanılan dolgu metali çapının diğer yöntemlere göre düşük olması ile birlikte dolgu metalini eriten enerjinin bu yöntemde ana malzemeyi diğer yöntemlere göre daha fazla etkilemesidir. Ayrıca, FCAW yöntemi 25 kj/cm ısı girdisinde yapılan kaynak işleminde Tablo 4.3'ten görüleceği üzere bazı bölgelerinde sıralı cüruf hatası görülmüştür. Çekme deneyleri sonucunda ısıl işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış numunelerinin uzama değerleri arasında farklılık vardır. Kaynak işlemi sırasında ana malzemeye uygulanan enerji girişi ile oluşan artık gerilmelerin 620°C'de 1 saat bekleme ile yapılan gerilim giderme ısıl işlemiyle uzama değerlerini artırdığı görülmektedir. Isıl işlem uygulanmayan deney numunelerinin uzama değerleri genel olarak %24 ile 29 arasında iken uygulan ısıl işlem ile bu değer %27 ile 34 arasında değişmektedir.



Şekil 5.94. Kaynak yöntemleri ısıl işlemli numunelerin ısı girdisi ile çekme mukavemetlerinin değişimi.

SAW, SMAW, FCAW ve GTAW yöntemleri ile kaynağı yapılan ve ısıl işlem uygulanmış deney numunelerinin ısı girdisine bağlı olarak çekme deney sonuçları Şekil 5.94'te verilmiştir. Kaynağı yapılan çekme deney numunelerinin sonuçlarına göre kaynak yöntemlerine ve ısı girdisine bağlı olarak önemli bir değişim görülmemiştir. Deney sonuçlarına göre ısıl işleme tabi tutulmuş numunelerin mukavemet değerleri 498-540 Mpa arasında çıkmıştır. Şekil 5.94'ten görüleceği üzere SMAW vw FCAW yöntemleri deney numuneleri mukavemet değerleri GTAW ve SAW yöntemleri deney numunelerinden daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni olarak Tablo 4.2 ve 4.3'te verilen dolgu metali kimyasal ve mekanik özellikleri gösterilmektedir. Isıl işlem uygulanmış en yüksek mukavemet değeri 540 Mpa ile SMAW yönteminde elde edilirken en düşük mukavemet değeri 498 Mpa ile SAW yönteminde elde edilmiştir.

Bölüm 6. Genel Sonuçlar

1. SAW, SMAW, GTAW ve FCAW yöntemleri kaynak işlemleri sonucunda ısı girdisi arttıkça dikiş genişliği ve ITAB'ın genişliği artmaktadır. Isı girdisine bağlı olarak dikiş ve ITAB'ın genişliği en fazla FCAW, en az GTAW yöntemlerinde ölçülmüştür.

2. Makro kesitlerden görüleceği üzere ısı girdisi arttıkça dört yöntem içinde kaynak ağzına yığılan dolgu metal miktarı artmakta ve kaynak banyosunun boyutları büyümektedir. SMAW, FCAW yöntemlerinde ısı giridisi arttıkça kaynak dikişi görüntülerinde yüzeysel hatalardan kaynak sıçrantısı ve yanma oluğu görülmüştür. GTAW, SAW yöntemlerinde ise düşük ısı girdisinde hızlı katılaşma sonucu meydana gelen soğuma izleri ısı girdisinin artışıyla azalmıştır.

3. Kaynağı yapılan deney numunelerinin radyografik test sonuçlarına göre SMAW ve SAW yöntemlerinde kaynak dikişinde bir hata görülmemiştir. GTAW kaynak prosesi 10 kj/cm ve FCAW kaynak prosesi 25 kj/cm ısı girdilerinde kaynak dikişinde sıralı cüruf hatasına rastlanmıştır, bu hata makro kesitlerde açıkça gözükmektedir.

4. Mikro yapı numuneleri incelemeleri sonucunda ısı girdisinin artması ve soğumanın yavaşlaması ile hızlı katılaşma etkilerinin azaldığı görülmektedir. azalıyor. Dört yöntem içinde kaynak bölgesi ferrit ve perlit fazlarında oluşmakta iken ITAB bölgesi ise ferrit, perlit ve martenzit fazlarından oluşmaktadır.

5. Sertlik deneyleri sonucunda SMAW, FCAW, GTAW ve SAW kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesi ITAB bölgesine göre daha sert olduğu görülmektedir. Kaynak merkezinden itibaren değişime uğramamış bölgeye kadar sertlik değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.

6. 10, 13 ve 20 kj/cm ısı girdileri kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerleri SMAW yöntemlerinde görülmüştür. ITAB bölgesinde ise 10 ve 13 kj/cm ısı girdisinde en yüksek sertlik değeri FCAW yöntemlerinde elde edilmiştir.

7. Kaynağı yapılan ısıl işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış çentik deney numuneleri sonuçlarına göre kaynak bölgesinde ısı girdisinin artışına bağlı olarak tokluk değerleri GTAW ve SAW yöntemlerinde artarken, FCAW ve SMAW yöntemlerinde azalmıştır.

8. FCAW ve SMAW yöntemleri kaynak bölgesinde tokluk değerlerinin düşük çıkmasının sebebi olarak kaynak banyosunun dış etkenlerden korunmasını sağlayan elektrod örtüsü ve koruyucu gazın kaynak işlemi ile meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan oksijenin dolgu metalinde bulunan alaşım elementlerinin yakarak cüruf oluşturması ve alaşım kaybını artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca, bu iki kaynak yöntemi dolgu metalinde bulunan Si miktarı değerleri SAW ve GTAW dolgu metali değerlerine göre daha fazladır.

9. SAW, SMAW, FCAW ve GTAW prosesleri ısı girdisine bağlı olarak ısıl işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış deney numunelerinin ITAB bölgesi tokluk değerleri sonuçlarına göre kaynak işlemi sırasında uygulanan ısının etkisiyle ana malzeme göre %40 civarında azalmıştır.

10. SAW, SMAW, FCAW ve GTAW prosesleri ile yapılan kaynak işlemleri sonucunda değişime uğramamış bölgede ortalama olarak tokluk değerleri %35-50 arasında azalma görülürken sertlik değerlerinde %25 artma görülmüştür. Bunun nedeni olarak temper gevrekliği veyahut yaşlanma olarak düşünülmektedir.

11. SMAW, FCAW, GTAW ve SAW yöntemleri ve ısı girdilerine bağlı olarak yapılan kaynak işlemleri sonucunda çekme mukavemet değerleri 498-578 Mpa arasında sonuçlar elde edilerek ana malzeme mukavemet değerlerine göre önemli bir değişim görülmemiştir.

12. Planlanan ısı girdilerine göre yapılan kaynak işlemlerinden sonra 620°C'de deney numunelerine uygulanan gerilim giderme ısıl işleminin etkisi; tokluk değerleri kaynak bölgesinde FCAW ve SMAW yönteminde önemli bir değişim görülmemiştir. SAW ve GTAW yöntemleri tokluk değerleri %10-20 arasında artmıştır. ITAB bölgesi tokluk değerlerinde ise dört yöntem için ortalama olarak %10-20 arasında artış görülmüştür. Çekme mukavemet değerleri % 5-10 arasında azalmıştır, uzama değerleri % 5-20 oranında artmıştır.

KAYNAKLAR

1. Anık S., Tülbentçi, K., Kaluç E., 1991, Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayınları, İSTANBUL.

2. Adsan, K., Temel, M., 1984, Otomatik (İleri) kaynak teknolojisi M.E.B.yay., sl4,278,297, İstanbul.

3. Anık, S., Anık, E.S., Vural, M., 1993, 1000 Soruda kaynak teknolojisi el kitabı ciltl, Birsen yay., s 78, 80,132, İstanbul.
4. Avner H.S., Introduction to Physical Metallurgy, McGraw-Hill, New York, 1974.
5. Bargel H.J., Schulze G., Çev: Güleç Ş., Aran A., Malzeme Bilgisi Cilt II. İTÜ Makine
Fakultesi Ofset Atöyesi . 1995 İstanbul.

6 http://www.eng.ox.ac.uk/~ftgamk/2a4f.html

7. Thelning K.E, (Çev: Tekin A.), Çelik ve Isıl İşlemi, İTÜ Kimya-Metalurji Fakultesi 1984

8. Topbaş M.A., Isıl İşlemler YTÜ 1993

9. Krauss G., Steels: Heat treatment and Processing Principles, ASM, Materials Park, Ohio, 1990.

10. Anık S., Kaynak Tekniği Cilt 1 İTÜ Matbaası. 1973.

11. Anık S., Kaynak Tekniği Cilt 2 İTÜ. Matbaası 1972.

12. DIN-DVS Taschenbuch 191

13. ASME Boiler&Pressure Vessel Code IX. 2007

14. Oğuz, B., 1987, Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı, Oerlikon Yayınları**,** İstanbul.

15. Anık, S , 1981, Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti, **İ.T.Ü. Makina Fakültesi Ofset Atelyesi,** 3, İstanbul.

16. Tülbentçi, K., 1990, Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı, **Gedik Yayınlan,** 96, İstanbul.

17. Güleç, Ş., Aran, A , 1985, Malzeme Bilgisi, **Tübitak Gebze Araştırma Merkezi,** Tügam matbaası, 1 , Gebze.

18. Yüksel, M., Eylül 1996, Çeliklerin, kaynağında.karbon eşdeğerliğinin rolü, **Mühendis ve Makina** , 37(440), 20-23, Ankara.

19. http://www.gidb.itu.edu.tr/staff/odabasi/shippro/oerlikon.pdf

20. http://www.jflf.org/pdfs/wi199.pdf

21. AWS Structural Welding Code-Steel 1998

22. Deutscher Verband für Schwiebtechnik (DVS) – Guide to Weld.

23. Anık S., Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Holding Yayını 1991

24. Durgutlu A., Ark Kaynağında (Manuel,MIG/MAG, Tozaltı) Kaynak Hızının Mikroyapı ve Nüfuziyet Etkisi, G.Ü.F.B.E. Y.Lisans Tezi, Kasım 1997, Ankara

25. Welding Metal Handbook Volume Two, AWS, 1978, USA.

26. Karadeniz, S., 1995, Kaynak Makinaları, Segem Yayım, Ankara

27. ANIK, S., ANIK E.S., VURAL, M., "Kaynak Teknolojisi El Kitabı", Cilt 1. Birsen Yayınevi**,** İstanbul, (1993 a).

28. ERYÜREK, B., "Gazaltı Kaynağı", İstanbul, (2003).

29. AWS, 1991. "Welding Processes", 8th Edition, USA

30. ANIK, S., VURAL M., "Gazaltı Ark Kaynağı (TIG,MIG,MAG)", ***Gedik Eğitim Vakfı,*** İstanbul, (1998).

31. TÜLBENTÇİ, K., "MIG-MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi", ***Arctech,*** İstanbul, (1998).

32. ANIK, S., "Gazaltı Kaynağında Helyum mu, Argon mu?", ***Gedik Kaynak Dünyası,*** (1989 a).

33. ODTÜ KTM Uluslararası Kaynak Mühendisliği Kurs Notları, ODTÜ Kaynak Teknolojisi Merkezi & SLV München, 2003, Ankara

34. Tülbentçi, K., 1988, Tozaltı kaynak yönteminin üstünlükleri ve uygulama alanları, Kaynak Dünyası, **Gedik Yayınlan,** 18-21, İstanbul.

35. Gültekin, N., Müftüoğlu, F., Tozaltı kaynak tozlarının korunma şartları, **Gedik Yayınlan,** İstanbul.

36. American Society of Mechanical Engineers, ASME; Section II A . SA370 2007

37. American Society of Mechanical Engineers, ASME; Boiler and Pressure Vessel Code Section V, Non-destrucitive Examination 2007 Edition.