



**BASINÇLI KAPLARDA KULLANILAN ÇELİK KAYNAKLARI VE
KARAKTERİZASYONU**

İsmail Oğuzhan AYHAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İsmail Oğuzhan AYHAN

30/10/2025

BASINÇLI KAPLARDA KULLANILAN ÇELİK KAYNAKLARI VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

İsmail Oğuzhan AYHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2025

ÖZET

Basınçlı kaplar, enerji üretiminden kimyasal işlemeye kadar çeşitli endüstrilerde önemli bir rol oynar; yapısal bütünlük ve güvenliği sağlamak için sağlam malzemeler ve kaynak teknikleri gerektirir. 35-50 bar basınç aralığında kullanılan basınçlı kaplar, kullanılan kaynak yöntemi, kaynak parametreleri ve üretim sonrası yapılan tahribatsız muayeneler önem arz etmektedir. Bu çalışma, basınçlı kap çeliğinin imalatında kullanılan kaynak süreçlerini ve karakterizasyon yöntemlerini incelemektedir. Bu kapsamda, örtülü elektrot ark kaynağı MMA, gaz altı kaynağı, TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı ve toz altı kaynak (SA) yöntemleri kullanarak manganlı-düşük karbonlu P355GH basınçlı kap üretiminde kullanılan çelik numuneleri kaynak ile birleştirilmiştir. Üretilen numunelerin tahribatsız muayene sonrası kaynak parametreleri optimize edilerek mikroyapı ve mekanik özelliklerin karakterizasyonu yapılarak kıyaslanmıştır. Literatür araştırmalarında, P355GH basınçlı kap çeliği üzerine yapılmış araştırma sayısı oldukça azdır. Güncel araştırma ve endüstri uygulamalarının bir sentezi yoluyla bu inceleme, güvenilir ve dayanıklı basınçlı kapların imalatı için kaynak teknolojisinin ve malzeme biliminin ilerlemesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Bilim Kodu : 91511
Anahtar Kelimeler : Basınçlı kaplar, P355GH, kaynak karakterizasyonu, TIG, SMA, gaz altı kaynağı, SAW
Sayfa Adedi : 55
Danışman : Prof. Dr. Hakan ATEŞ

WELDING AND CHARACTERIZATION OF STEEL USED IN PRESSURE VESSELS

(M. Sc. Thesis)

İsmail Oğuzhan AYHAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2025

ABSTRACT

Pressure vessels play a crucial role in various industries, ranging from energy production to chemical processing; they require robust materials and welding techniques to ensure structural integrity and safety. For pressure vessels operating between 35–50 bar pressure, welding method, welding parameters, and non-destructive tests key parameters. This study examines the welding processes and characterization methods for manufacturing pressure vessels. In this context, steel samples used in the production of manganese-low carbon P355GH pressure vessels were welded using Shielded Metal Arc Welding (SMAW), Gas Metal Arc Welding (GMAW), Tungsten Inert Gas (TIG) welding, and Submerged Arc Welding (SAW) techniques. After non-destructive testing of the produced samples, welding parameters were optimized and the microstructure and mechanical properties were characterized and compared. Literature research shows that the number of studies conducted on P355GH pressure vessel steel is quite limited. Through a synthesis of current research and industrial applications, this study aims to contribute to the advancement of welding technology and materials science for the manufacturing of reliable and durable pressure vessels.

Science Code : 91511

Key Words : Pressure vessels, P355GH, Welding characterization, TIG, SMAW, GMAW, SAW

Page Number : 55

Supervisor : Prof. Dr. Hakan ATES

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında emeği geçen, katkı sağlayan ve destek olan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, tez çalışmam süresince bilgi, birikim ve deneyimleriyle bana rehberlik eden, her aşamada yol gösterici olan değerli danışmanım Prof. Dr. Hakan ATEŞ'e sonsuz teşekkür ederim. Kendilerinin yapıcı eleştirileri ve yönlendirmeleri, çalışmamın akademik kalitesini artırmada büyük rol oynamıştır.

Ayrıca, bu süreçte bana akademik ve teknik destek sağlayan Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyelerine ve tüm personeline teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca birlikte fikir alışverişinde bulunduğum, desteklerini esirgemeyen Atilla MURATHAN, Ömer Faruk MURATHAN, Mehmet Remzi ABUL, Utku NURLU ve İsmail Hakkı İŞİTEMİZ değerli büyüklerime ve çalışma arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan, sabırları, sevgileri ve motivasyonlarıyla bana güç veren ailem Emine Mualla AYHAN, Tülay YALDIR, Muhammed Baran KARADUMAN ve Mehmet AYHAN'a minnettarım. Onların desteği olmasaydı bu süreci tamamlamak mümkün olmazdı.

Bu yolculukta bana doğrudan veya dolaylı olarak katkı sağlayan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. MALZEME SEÇİMİ	3
3. KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	5
3.1. Gaz Altı Kaynak Yöntemi.....	5
3.2. Tungsten Inert Gaz Kaynak Yöntemi.....	6
3.3. Örtülü Elektrot Kaynak Yöntemi	7
3.4. Toz Altı Kaynak Yöntemi.....	8
4. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ.....	9
4.1. Görsel Muayene	9
4.2. Sıvı Penetrant Muayene Yöntemi.....	10
4.3. Ultrasonik Muayene Yöntemi.....	11
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	13
5.1. Malzeme	13
5.2. Numune Hazırlanması.....	14
5.3. Tahribatsız Muayene	15
5.4. Mekanik Testler	16
5.4.1. Sertlik testi.....	16

	Sayfa
5.4.2. Çekme testi	18
5.4.3. Charpy darbe testi	20
5.4.4. Kaynak parametrelerinin etkisi.....	21
5.4.5. Mikroyapı analizi.....	24
5.4.6. Tane boyutu analizi	39
5.4.7. XRD Analizi.....	43
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	55

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. EN 10028-2'ye göre P355GH çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	3
Çizelge 2.2. EN 10028-2'ye göre P355GH çeliğinin mekanik özellikleri.....	3
Çizelge 5.1. P355GH çeliğinin spektrometre analiz sonuçları.....	12
Çizelge 5.2. AWS A5.1 E7018-1 H4 dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi	12
Çizelge 5.3. AWS A5.18 ER70S-6 dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi.....	12
Çizelge 5.4. AWS A5.23 EA2 dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi	13
Çizelge 5.5. Kaynak yöntemlerine bağlı olarak kaynak parametreleri.....	14
Çizelge 5.6. Kaynak numune bağlantılarının tahribatsız test sonuçları	15
Çizelge 5.7. Numunelerin sertlik sonuçları (HV10)	17
Çizelge 5.8. Numunelerin çekme ve uzama sonuçları (HV10).....	18
Çizelge 5.9. Numunelerin 20°C'deki Charpy darbe testi sonuçları (Joule).....	20
Çizelge 5.10. Kaynak parametreleri	21
Çizelge 5.11. Farklı kaynak yöntemleri için hesaplanan ısı girdisi.....	21
Çizelge 5.12. Farklı kaynak yöntemlerinin soğutma hızı.....	22
Çizelge 5.13. ITAB Tane boyutu ile Isı girdisi karşılaştırılması	41
Çizelge 5.14. TIG XRD tarama sonucu.....	43
Çizelge 5.15. Örtülü elektrot XRD tarama sonucu	43
Çizelge 5.16. Gaz altı XRD tarama sonucu	44
Çizelge 5.17. Toz altı XRD tarama sonucu.....	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Gaz-metal ark kaynağı	5
Şekil 3.2. Gaz-tungsten ark kaynağı	6
Şekil 3.3. Örtülü metal ark kaynağı	8
Şekil 5.1. Test plakaları için hazırlanan kaynak ağzı şekli (t:14 mm).....	15
Şekil 5.2. Ana Malzeme, ITAB ve Kaynak Metalinden alınan sertlik bölgeleri.....	17
Şekil 5.3. Ana Malzeme, ITAB ve Kaynak Metalinin sertlik sonuçları (HV10)	18
Şekil 5.4. Ana Malzeme, ITAB ve Kaynak Metalinin çekme testi değerleri	19
Şekil 5.5. Charpy darbe testi için alınan numunlerin bölgeleri	21
Şekil 5.6. Farklı kaynak yöntemleri ile üretilen numunelerin Charpy darbe testi sonuçlar	21
Şekil 5.7. Normalize edilmiş P355GH çeliğinin genel iç yapısı, siyah bölge Perlit, açık bölgeler Ferrit.	25
Şekil 5.8. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kapak).....	26
Şekil 5.9. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kök)	27
Şekil 5.10. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde).....	27
Şekil 5.11. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak).....	28
Şekil 5.12. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)	28
Şekil 5.13. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kapak)	30
Şekil 5.14. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kök).....	30
Şekil 5.15. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde).....	31
Şekil 5.16. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak)	31

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)	32
Şekil 5.18. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kapak)	33
Şekil 5.19. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kök).....	33
Şekil 5.20. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde).....	34
Şekil 5.21. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak).....	35
Şekil 5.22. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)	35
Şekil 5.23. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak bölgesi (Kapak)	36
Şekil 5.24. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak bölgesi (Kök)	37
Şekil 5.25. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde).....	37
Şekil 5.26. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak).....	38
Şekil 5.27. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)	38
Şekil 5.28. P355GH ana malzemesi için tane boyutu hesaplaması.....	40
Şekil 5.29. TIG ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması	40
Şekil 5.30. Örtülü elektrot ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması	41
Şekil 5.31. Gaz altı ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması	41
Şekil 5.32. Toz altı ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
cm/dk	Santimetre/dakika
Kj/mm	Kilojoule/mm
Mm	Milimetre
MPa	Mega Paskal
V	Volt
J	Joule
HV10	Vickers Sertliği, 10 kilogram kuvvet
°C	Santigrad derece
°C/s	Bir saniyede sıcaklıktaki değişim

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Dalgalı akım
DCEN	Doğrusal Akım Elektron Negatif
DCEP	Doğrusal Akım Elektron Pozitif
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
MT	Manyetik Test
MMA	Örtülü Elektrot Kaynak Yöntemi
TIG	Tungsten Inert Gas
UT	Ultrasonik Test
VT	Görsel muayene

1. GİRİŞ

Basınçlı kaplar, enerji üretimi, petrokimya, gıda işleme ve ilaç endüstrisi gibi çok sayıda endüstriyel uygulamada kritik bileşenlerdir. Bu sistemler genellikle yüksek sıcaklık ve iç basınç altında çalıştılarından, kullanılan malzemelerden üstün performans ve dayanıklılık beklenir. Böyle sistemlerin güvenilirliği, emniyeti ve uzun servis ömrü, esas olarak kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ile kaynaklı birleştirmelerin yapısal bütünlüğüne bağlıdır. Kaynak işlemi sırasında ısıdan etkilenen bölgesi (ITAB) ve kaynak metali mikro yapısal değişimlere uğramaktadır; bu da önemli mikro yapısal dönüşümlere yol açar. Bu dönüşümler, malzemenin sertlik, dayanım ve tokluk özelliklerini doğrudan etkileyerek uzun ömürlü servis performansını belirler [1-3].

Basınçlı kap imalatında yaygın olarak kullanılan çeliklerden biri olan P355GH, EN 10028-2 standardına uygun şekilde üretilmektedir. Bu çelik, 355 MPa'nın üzerindeki akma dayanımı, iyi kaynaklanabilirliği ve yüksek sıcaklıklarda mekanik kararlılığı nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, kaynak işlemi sonrasında ortaya çıkan faz dönüşümleri, tane büyümesi, sertlik değişimleri ve mekanik özelliklerdeki farklılıklar hâlen araştırılmaya devam eden konulardır [4-9].

Literatürdeki birçok çalışma, kaynak parametrelerinin akım şiddeti, ilerleme hızı, koruyucu gaz tipi gibi mikro yapı ve mekanik özellikler üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur [10-17]. Bununla birlikte, P355GH çeliği özelinde farklı kaynak yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi ve ITAB karakterizasyonu konusundaki kapsamlı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu durum, söz konusu malzeme için kaynak prosedürlerinin optimizasyonunu zorlaştıran önemli bir bilimsel boşluk oluşturmaktadır [18-23,].

Bu tez çalışması, P355GH çeliğinin farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi sonrasında meydana gelen mikro yapısal değişim ve mekanik davranışları ayrıntılı biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Faz dönüşümleri, tane boyutu, sertlik dağılımı ve mekanik dayanım analiz edilerek, basınçlı kap üretiminde kaynaklı birleşimlerin güvenilirliğini ve performansını artırmaya yönelik optimum kaynak parametreleri önerilecektir. Bu çalışma sonucunda literatürde eksik olan ITAB karakterizasyonu ve mekanik test verileri tamamlanacaktır.

2. MALZEME SEÇİMİ

Deney için basınçlı kap çeliği, yüksek sıcaklık ve basınç uygulamaları için yaygın olarak kullanılan bir kalite olan P355GH'dir. P355GH çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1'de ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. [24,35, 36].

Çizelge 2.1. EN 10028-2'ye göre P355GH çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Element	%C	%Si	%Mn	%P	%S
Ağırlıkça %	0,10 – 0,22	≤ 0,60	1,10 – 1,70	maks. 0,025	maks. 0,01

Çizelge 2.2. EN 10028-2'ye göre P355GH çeliğinin mekanik özellikleri

min. Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Çentik Darbe Enerjisi (J)
355	510-650	20-21	27

P355GH, yüksek sıcaklık özelliklerine sahip manganlı-düşük karbonlu, kaliteli bir çeliktir ve bu da onu basınçlı kap uygulamalarında kullanıma uygun hale getirir. Kimyasal bileşimi, optimum mekanik özelliklerin ve yüksek sıcaklıktaki ortamlara karşı direncin sağlanması için dikkatle kontrol edilir. Düşük karbon içeriği sayesinde, kaynaklanabilirlik ve tokluğu korurken istenen mukavemeti elde etmek için belirli bir aralıktaki tutulur. Ek olarak, kaynak sonrası kırılganlık ve gevrekliğe neden olan fosfor ve kükürt seviyeleri de düşük tutulur. Yapıda bulunan silisyum ile çelik içerisinde bulunan oksijeni bağlayarak döküm ve daha sonra kaynak işlemleri sırasında akışkanlığı sağlar. Alaşım elementleri krom, molibden, nikel ve bakır, çeliğin korozyon direncini ve yüksek sıcaklık özelliklerini arttırmak için düşük miktarlarda bulunur (<%1) [25-30, 47].

Mekanik özellikler açısından P355GH, minimum 355 MPa akma dayanımı sergileyerek iç basınç yüklerine dayanacak yeterli mukavemeti sağlar. Çekme dayanımı akma dayanımının yaklaşık 2 katı olup (510-650 MPa) olası bir basınç artışında patlama gibi iş kaza riskini azaltır. Ek olarak çelik en az %20 uzama ile iyi bir süneklilik sergiler; bu da kırılmadan önce plastik olarak deforme olma kabiliyetini gösterir [31-39, 12].

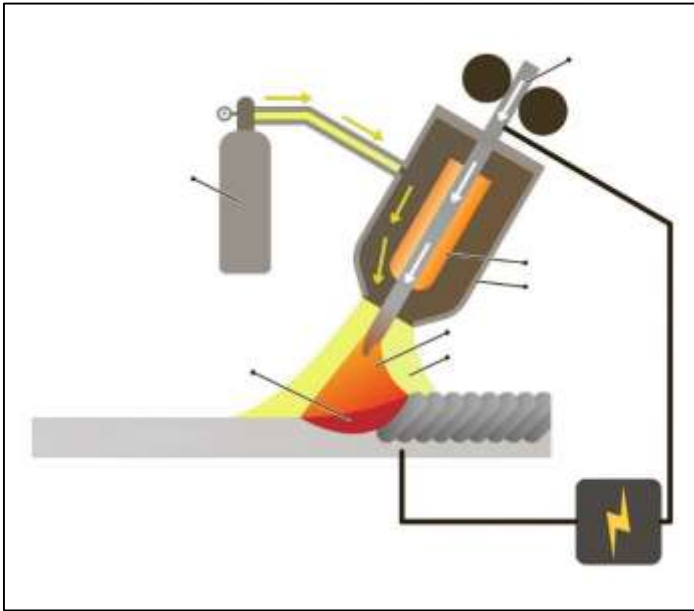
Çentikli Charpy darbe testi sonuçları, oda sıcaklığında minimum 34 Joule darbe enerjisi ile çeliğin ani yüklenme koşullarında kırılincaya kadar depoladığı enerjidir. Bu özellik, değişken basınç altında (1-50 bar) malzemenin hasara uğramadan çalışmasını sağlar.



3. KAYNAK YÖNTEMLERİ

3.1. Gaz Altı Kaynak Yöntemi (MIG-MAG)

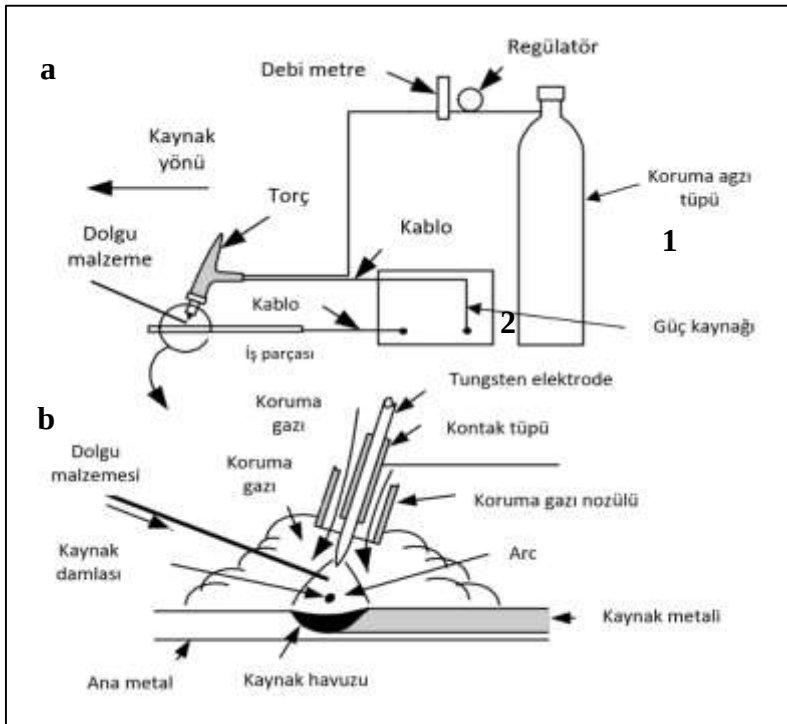
Gaz altı ark kaynağında, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi sürekli beslenen bir dolgu malzemesi ile ana malzeme arasında 3500-6000°C arasında oluşan bir ark sıcaklığı meydana gelmektedir. Bu ark sıcaklığında hem dolgu metali hem de ana malzemeyi erimekte ve kaynak metalini oluşturmaktadır. Koruyucu gazların kullanılmasındaki temel amaç; sıvı haldeki kaynak havuzunu atmosferik ortamlardan korumak, katılaşılan kaynak havuzunda meydana gelebilecek gözenek, metal-metal birleşikleri gibi istenmeyen birleşiklerin oluşmasını engellemek, ark’ın kararlı bir şekilde oluşmasını sağlamak ve bu sayede sıçrantıların oluşmasını azaltmak ve kaynak penetrasyonunu aynı zamanda da kaynak genişliğini sağlamaktır. Demirdışı metallerde Helyum, Argon gibi asal gazlar kullanılırken, çeliklerde karışım gazı (aktif gaz CO₂ ve asal gaz) kullanılmaktadır. Demir dışı malzemelerde DCEN veya AC akım türü kullanılırken, çelik malzemelerde DCEP kullanılır. [39-45,64].



Şekil 3.1. Gaz-metal ark kaynağı [63]

3.2. Tungsten Inert Gaz Ark Kaynağı Yöntemi

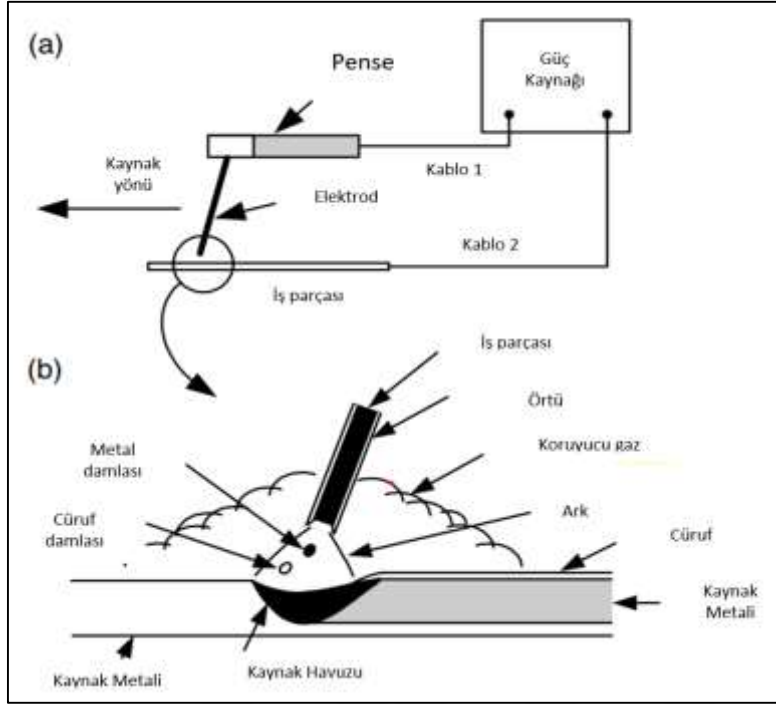
Tungsten Inert Gaz kaynağı (TIG), Şekil 3.2’de gösterildiği gibi kaynak torçunda bulunan Tungsten iğnenin dolgu malzemesini ve ana malzemeyi eritip birbiriyle birleştiren bir işlemdir. TIG kaynak yöntemi gaz altı ve örtülü elektrot ark kaynağına göre daha kontrollü bir kaynak yöntemidir. Daha kontrollü olmasının sebebi dolgu malzemesinin genellikle el ile beslenmesidir. Günümüzde Orbital TIG kaynak yöntemi de mevcuttur. Gaz altında olduğu gibi kaynak havuzu bu yöntemde de koruyucu gaz altında korunmaktadır. Kaynatılacak parçaya göre DCEN, DCEP ve AC kullanılmaktadır. DCEN genellikle çelik gruplarında kullanılırken, AC ve DCEP demir dışı metaller ve paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılır. AC ve DCEN’nin demir dışı ve paslanmaz çeliklerde kullanılmasının sebebi metallerin yüzeyinde bulunan demir oksit tabakasının yüksek erime sıcaklığına sahip olmasıdır. Ark kaynak sıcaklığı yaklaşık 11000°C ye çıkmaktadır. Örneğin; alüminyum yaklaşık 660°C erime noktasına sahip iken, alüminyum oksit (Al_2O_3) yaklaşık 2200°C’de erir. Bu da ana malzemenin yüzeyinde oluşan kaplama haricindeki bölgede; malzemenin orta kısımları sıvı halde iken yüzeyin hala katı halde kaldığını gösterir. AC ve DCEN akımlar, metal dışı malzemelerin yüzeyinin daha çok ısınmasına yardımcı olan kutuplama şekilleridir. [9, 46-49].



Şekil 3.2. Gaz-tungsten ark kaynağı, a) Genel süreç, b) Kaynak alanı [64]

3.3. Örtülü Elektrot Ark Kaynak Yöntemi

Örtülü elektrot ark kaynağı, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, metal çubuk örtülü bir elektrot ile ana malzeme oluşturulan bir ark, metalleri erime sıcaklığına getirerek eriten ve birleştiren bir işlemdir. Genellikle elektrot kaynağı olarak adlandırılır. Kaynak pensesi, bir kaynak kablosu aracılığıyla güç kaynağının bir terminaline bağlanır ve iş parçası, ikinci bir kablo aracılığıyla güç kaynağının diğer terminaline bağlanır (Şekil 3.3a). Örtülü elektrotun çekirdeği, yani çekirdek teli, elektrik akımını ark'a iletir ve bağlantı için dolgu metali sağlar. Elektrik teması için çekirdek telin üst 1,5 cm'lik kısmı çıplaktır ve elektrot tutucu tarafından tutulur. Elektrot tutucusu esas olarak kaynakçının güvenli bir şekilde tutması için elektriksel olarak yalıtılmış bir dış kabuğu olan metal bir kelepçedir. Arkın ısısı, hem çekirdek telin hem de elektrot ucundaki kaplamanın damlacıklar halinde erimesine neden olur (Şekil 3.3b). Erimiş metal kaynak havuzunda toplanır ve kaynak metali halinde katılır. Öte yandan, daha hafif erimiş örtü kaynak havuzun yüzeyinde yüzer ve kaynak metalinin tepesinde bir cüruf tabakası halinde katılır. Örtüde bulunan bazik, selülozik, rutil ve demir-oksit yapıları birleşiklerden dolayı elektrotlar 4'e ayrılır. Bazik örtülerin içeriğinde bulunan kalsiyum karbonat, magnezyum karbonat, kalsiyum florit gibi bazik karakterizasyona sahip birleşiklerden dolayı bu elektrot tipi bu şekilde isimlendirilmiştir. Selülozik elektrot ise bir hidrokarbondan (selüloz ve organik birleşikler) oluşmaktadır. Rutil elektrotun içeriğinde sadece titanyum oksit bulunmaktadır. Diğer cüruf yapıcı birleşikler olmadığı için bu da onu bazik elektroda göre daha düşük mukavemete sahip yapmaktadır. Demir oksit elektrotu örtünün içerisinde demir oksit, silis ve mangan bulunmaktadır. Bu dört örtünün genel özellikleri sıçrantıları, kaynak havuzunda çözünmüş cüruf, oksijen gibi yabancı maddelerin oluşumunu engellemek ve aynı zamanda kaynak havuzunu sıcaklığını korunmasına yardımcı olur [50-58].



Şekil 3.3. Örtülü metal ark kaynağı, a) Genel süreç, b) Kaynak alanı [64]

3.4. Toz altı Kaynak Yöntemi

Toz altı ark kaynak yönteminde ark sürekli beslenen elektrot ile ana malzeme arasında oluşmaktadır. Toz altında kullanılan granül tozlar kaynak kalitesini doğrudan etkilemektedir; granül tanesi görece olarak büyük olursa kaynak havuzunda bulunan gazlar katılaşırken tanelerin arasından rahatça çıkarken kaynak dikişinin yüzey kalitesi daha kötü olacaktır. Granül toz tanesi küçüldükçe kaynak havuzunda gaz sıkışma olasılığı yüksek olurken yüzey kalitesi büyük taneliye göre daha pürüzsüz çıkacaktır. Granül tozlar aynı zamanda kaynak dikişini düşük miktarda alaşımla yaparak kaynaklı birleştirmenin tokluğunu artırmaktadır. Toz altı yöntemi ortalama 80 cm/dk kaynak hızı ile diğer kaynak yöntemlerine göre çok hızlı bir yöntemdir. Ayrıca yarı otomatik kaynak yöntemi olduğu için tandem yöntemi ile de kaynak yapılabilir. Tandem yöntemi uygulanırken akım türlerine dikkat edilmeli aksi takdirde ark üflemesi gerçekleşecektir. Ark üflemesi, elektrik akımının kendisi ile indüklediği manyetik alan arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak elektromanyetik (Lorentz) kuvvetten kaynaklanır. Bu yanlış uygulama hem sağlıklı bir arkin oluşmamasına hem de kaynak havuzunun kontrol edilememesine neden olacaktır. Dolayısıyla sağlıklı bir kaynağın oluşmamasına neden olacaktır [59, 61, 63].

4. TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

4.1. Görsel Muayene

Görsel muayene çok eski çağlardan beri bilinen ve uygulanan basit bir yöntemdir. Bugünün ihtiyaçlarını karşılamak üzere çok karmaşık ve kapsamlı görsel muayene teknikleri geliştirilmiştir. Görsel muayenenin en büyük avantajı diğerlerine göre çok ucuz bir yöntem olması ve çok hızlı bir şekilde sonuç alınabilmesidir. Diğer tahribatsız muayene yöntemleri uygulaması sırasında görsel muayeneye başvurulur. Örnek olarak RT, PT ve MT uygulamalarında muayene sırasında oluşan süreksizler göz ile tespit edilerek incelenir ve yorumlanır. Gerekli olması durumunda büyüteç, ayna, mastar gibi yardımcı aletler kullanılır.

Görsel inceleme, kaynaklı dikişindeki dış kusurları tespit etmek için kullanılan temel bir yöntemdir. Öncelikle yüzey süreksizliklerinin tespit edilmesinde bu yöntem en etkili yöntemdir. Bununla birlikte, kaynak yüzeyinin ve çevresindeki alanların dikkatli bir şekilde incelenmesi yoluyla denetçiler bazen iç kusurların varlığına işaret eden belirtileri tespit edebilirler [18].

Görsel muayene doğrudan ve dolaylı görsel muayene olarak ikiye ayrılır. Doğrudan görsel muayene operatörün gözlerinin muayene edilecek yüzeye en fazla 600 mm uzaklıkta olacak ve muayene edilecek yüzeye 30° den daha az olmayan bir açıyla yerleştirilebildiği durumlarda uygulanabilir. Muayene yapılan yüzeyin beyaz ışık ile aydınlatılması gerekir. Muayene edilen yüzeydeki minimum ışık şiddeti 1000 Lüks olmalıdır. Doğrudan görsel muayenede muayene edilecek yüzeye erişim sağlanamadığı durumlarda dolaylı görsel muayene uygulaması gerekir. Dolaylı görsel muayenede ayna, boroskop, fiberoskop, videoskop, kamera gibi yardımcı aletler kullanılabilir. Kullanılan bu aletler doğrudan görsel muayenedeki eşdeğer çözünürlük yeteneğine sahip olmalıdır [19].

4.2. Sıvı Penetrant Muayene

Sıvı Penetrant ile muayene yüzeye açık süreksizleri belirleyen yöntemdir. Bu yöntem boyalı bir sıvının kapiler olay nedeniyle yüzeydeki süreksizliklerin içine çekilmesi, yüzeye uygulanan başka bir maddenin süreksizlik içindeki sıvıyı yüzeye çekmesi esasına dayanır.

PT 19. yüzyılın ikinci yarısında demiryollarında rayların muayenesinde kullanıldığı bilinmektedir. O tarihlerde bu yöntem “yağ ve tebeşir tozu” adıyla anılmaktaydı. PT yöntemi 4 aşamalı olarak uygulanmaktadır; yüzey hazırlığı, penetrantın uygulanması, fazla penetrantın kaldırılması ve geliştiricinin uygulanması.

Yüzey hazırlığı başarılı bir muayenenin ilk adımıdır. Penetrantın yüzeydeki süreksizliklere girmesini önleyecek her şey yüzeyden kaldırılmalıdır. Başka bir ifade ile muayenenin uygulanacağı yüzey kir, yağ, gres, pas, hadde kabuğu, toz asitler gibi atıklardan temizlenmelidir. Penetrant test için birçok temizleme yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; solvent ile temizleme (yağ ve gresler için), deterjan ile temizleme (suda çözünebilen birleşikler için), su buharı ile temizleme (büyük organik birleşikler için), ultrasonik ile temizleme (inorganik ve organik birleşikler için), mekanik temizleme (çapak, talaş ve yüzeyi sıvayan birleşikler için).

Yüzeye uygulanan sıvı penetrant sadece yüzeydeki devamsızlıklara sızmakla kalmaz, aynı zamanda kapiler olayı sayesinde devamsızlıkların içine çekilir. Kapiler olay; sıvıların kılcal borular veya küçük gözenekli malzemeler içinde yerçekimine karşı yukarı doğru veya aşağı doğru hareket etmesidir. Bu olay, sıvının yüzey gerilimi, kohezyon ve adezyon kuvvetleri sayesinde gerçekleşir. Sıvı penetrant ile muayenede kullanılacak olan sıvı yüksek ıslatma yeteneğine ek olarak düşük viskoziteye ve yüzey gerilimine sahip olmalıdır. Aynı zamanda muayene yüzeyinde de kalabilmelidir. Sıvı penetrant çok hızlı kurumamalıdır aksi takdirde yüzeyde bulunan süreksizlere nüfuz edemeyecektir. İki çeşit sıvı penetrant boyalar kullanılmaktadır. Floresan ve renk kontrastlı boyalar. Sıvı penetrantın bekleme süresi 30 dakikayı geçmemelidir ve yüzey sıcaklığının 16 – 52°C aralığında olması gerekmektedir.

Fazla penetrant uygun bekleme süresinin sonunda muayene edilen parçanın üzerinde kalmış ve süreksizlerin dışında kalmış olan penetranttır. Bu işlemde penetrant ıslak olmalı

ama penetrant kuruduysa, yüzeydeki penetrantı temizleyip penetrant uygulamasını tekrar baştan yapmak gerekmektedir. Penetrant kaldırma yöntemleri su ile yıkama, sonradan emülsifiye edilen penetrant ve solvent ile temizlenebilen penetrantlardır. Su ile yıkanabilen penetrant onları su ile yıkanabilir yapan kendi emülsifiye edicilerini de içerirler. Penetrant ve emülsifiye edici bir aradadır. Sonradan emülsifiye edilen penetrantlar su ile kaldırılabilmek için ayrı bir emülsifiye ediciye ihtiyaç gösterir ve solvent ile kaldırılabilen penetrantlar ise bir solvent ile temizlenebilir.

Geliştiricinin uygulanması aşamasında muayene parçasının boyutuna bağlı olarak süreksizler ortaya çıkmaktadır. Kullanılan geliştiricinin ana maddesi yüksek derece emiciliğe sahip beyaz tozdur. Geliştirici muayene edilen parçaya uygulandığında, bu toz süreksizliklerin içerisindeki boya içeren penetrantı emerek yüzeye çıkartır ve boyanın toz içinde yayılarak süreksizliğin oluşmasını sağlar. Bu emme işlemi kapiler olay nedeniyle gerçekleşir ancak bu kez olay tersine çalışır. Penetrant geliştiricideki toz tarafından süreksizlik içinden dışarıya çekilir. Geliştirici, süreksizliklerin görünebilmesini kolaylaştırır. Geliştiricide oluşan boya lekeleri süreksizliklerin gerçek boyutlarına göre daha büyüktür.

4.3. Ultrasonik Muayene

Ultrasonik muayene, muayene edilen malzemeye insan kulağının duyamayacağı kadar yüksek frekansa sahip ses dalgaları göndererek, malzemedен yansıyan ses dalgaları yardımıyla, malzeme içindeki yansıtıcıların konumlarının ve boyutlarının belirlenmesi esasına dayanır. Malzemedeki şekil değişiklikleri, delikler, kanallar, malzemenin yüzeyleri veya malzeme içinde bulunan süreksizler ses dalgalarının yansımalarına neden olabilirler.

İnsan kulağının duyamadığı ses dalgalarının varlığının ne zaman farkına varıldığı tam olarak bilinmemektedir. Ancak literatür 1830 yılında Fransız fizikçi Felix Saavart'ın insan kulağının duyma kapasitesini belirlemek üzere yüksek frekanslı ses üretilmek için çalışmalar yaptığı bilinmektedir. Benzer çalışmalar 1883 yılında bir başka fizikçi, Francis Galton tarafından da yapılmıştır.

Ultrasonik Test (UT), özellikle basınçlı kaplar, boru hatları ve yapısal çerçeveler gibi kritik bileşenlerde kaynaklı bağlantıların iç bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılan yaygın

olarak uygulanan bir tahribatsız muayene (NDT) yöntemidir. UT'nin temel çalışma prensibi, kaynak bölgesindeki çatlaklar, boşluklar veya füzyon eksikliği gibi iç süreksizlikleri tespit etmek için yüksek frekanslı ses dalgalarının test malzemesi boyunca iletilmesine ve yansıtılmasına dayanır.

Süreç, piezoelektrik kristal ile donatılmış bir dönüştürücü tarafından tipik olarak 0,5-20 MHz aralığında ultrasonik dalgaların üretilmesiyle başlar. Bu kristale alternatif bir elektrik akımı uygulandığında, kristal titreşir ve mekanik ses dalgaları yayar. Bu ultrasonik darbeler, dalga yayılımını engelleyebilecek hava boşluklarını ortadan kaldırmaya yardımcı olan jel veya yağ gibi bir bağlantı ortamı kullanılarak test yüzeyine bağlanır.

Ultrasonik dalgalar kaynak boyunca ilerlerken, temel malzemeninkinden farklı akustik empedansa sahip herhangi bir süreksizlik; örneğin bir ekleme, gözeneklilik veya çatlak - dalga enerjisinin bir kısmını yüzeye doğru geri yansıtacaktır. Bu yansıyan sinyaller veya yankılar aynı dönüştürücü veya ayrı bir alıcı ünite tarafından alınır. Bu yankıların uçuş süresi ve genliği ölçülür ve tipik olarak iç kusurların varlığını ve yerini gösteren bir “A-tarama” sinyali olarak görüntülenir.

Yankıların geri dönmesi için geçen süre, reflektörün (kusurun) yüzeyden uzaklığı ile orantılıdır ve hassas derinlik tahminine olanak tanır. Sinyal genliğindeki değişimler de kusur boyutunu ve yönünü tahmin etmek için analiz edilebilir. Gelişmiş uygulamalarda, mikroyapıların iki ve üç boyutlu görüntülenmesini sağlamak için “B-tarama” ve “C-tarama” sunumları kullanılabilir.

Ultrasonik test, küçük kusurlara karşı yüksek hassasiyet, kalın malzemeler için derin penetrasyon kabiliyeti ve bileşene zarar vermeden gerçek zamanlı sonuçlar dahil olmak üzere kaynak muayenesi için önemli avantajlar sunar. Ayrıca, EN ISO 17640 ve ASME Bölüm V gibi uluslararası standartlara uygundur, bu da onu kritik üretim süreçlerinde kalite güvencesi için uygun hale getirir.

Sonuç olarak, ultrasonik test, kaynak kalite kontrolünde önemli bir araçtır ve gözle veya yüzey tabanlı muayene yöntemleriyle görülemeyen yüzey altı kusurlarının tespit edilmesini ve karakterize edilmesini sağlar. Etkinliği ve güvenilirliği, kaynaklı bileşenlerin yapısal sağlamlığının ve güvenliğinin sağlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunur.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme

P355GH, Avrupa standardı EN 10028-2 tarafından belirtilen ve yüksek sıcaklıkta hizmet için tasarlanmış bir çelik kalitesidir. Öncelikle basınçlı kapların ve kazanların imalatında kullanılır. Bu çelik, basınç altında yapısal bütünlüğü korumak için gerekli olan iyi kaynaklanabilirliği ve yüksek sıcaklıklara karşı yüksek direnci ile karakterize edilir. P355GH çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1'de verilmiştir. [25]

Çizelge 5.1. P355GH çeliğinin spektrometre analiz sonuçları [56]

Birleşenler	C	Mn	Si	P _(maks.)	S _(maks.)	Ni _(maks.)	
% ağırlığı	0,12 – 0,2	0,7 – 1,2	0,1 – 0,5	0,025	0,015	0,3	
Birleşenler	Cr _(maks.)	Mo _(maks.)	V _(maks.)	Nb _(maks.)	Ti _(maks.)	Al _(maks.)	Cu _(maks.)
% ağırlığı	0,3	0,08	0,02	0,02	0,03	0,02	0,3

Çeliğin mekanik özellikleri 355 MPa'lık minimum akma dayanımı ve 510 ila 650 MPa arasında değişen çekme dayanımına sahiptir. Bunun yanı sıra en az %22'lik bir uzama özelliğine sahiptir [25].

Çizelge 5.2, Çizelge 5.3, Çizelge 5.4'de deneylerde kullanılan dolgu malzemelerin kimyasal içerikleri belirtilmiştir. Kaynaklı bağlantılarda kullanılan dolgu malzemelerinin kimyasal bileşimleri, kaynak metalinin mekanik özelliklerini, sertlik dağılımını ve mikro yapısal gelişimini doğrudan etkileyen en kritik parametreler arasındadır [14]. Bu çalışmada kullanılan dolgu malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları ilgili standartlara uygun olup, kaynak metalinde istenen mukavemet ve tokluğun elde edilmesine katkıda bulunmaktadır:

Çizelge 5.2. AWS A5.1 E7018-1 H4 dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi [53]

Element	C	Mn	Si
% Ağırlık	0,07	1,1	0,5

Çizelge 5.3. AWS A5.18 ER70S-6 dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi [53]

Element	C	Mn	Si
% Ağırlık	0,07	1,5	0,85

Çizelge 5.4. AWS A5.23 EA2 dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi [53]

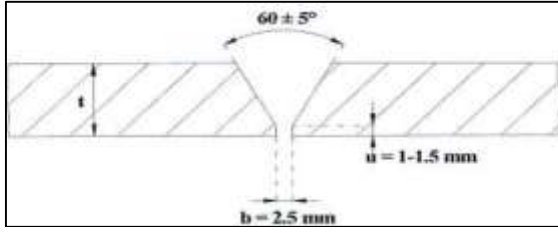
Element	C	Mn	Si	P _(maks.)	Mo
% Ağırlık	0,1	1,0	0,12	0,012	0,5

5.2. Numunelerin Hazırlanması

Deneysel çalışma planı, kaynak yöntem parametrelerinin karşılaştırılması ve mikro yapısal incelenmesi, kaynaklı bağlantıların kalitesini ve bütünlüğünü değerlendirmek için çok yönlü bir yaklaşım ve kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin ayrıntılı bir analizini sağlayan EN 13445 standartlarına uygun olarak hazırlanan numunelerle mekanik testler dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Kaynak yöntemlerinde kullanılan ticari elektrotlar, kaynak hızı, akım, voltaj ve elektrot boyutu dâhil olmak üzere farklı parametreler kullanılarak bir basınçlı kap çelik plakaları üzerinde gerçekleştirilmiştir (225x150x14 mm). Test numunelerinin kaynak ağzı hazırlığı Şekil 5.1'e göre yapılmıştır. Çalışma için seçilen dolgu malzemeleri AWS A5.1 E7018-1 H4, AWS ER70S-6, AWS A5.23: EA2 ve F8A(P)4EA3-A3 (Toz altında kullanılan tozun standard adı) olup, ana malzemenin nihai çekme mukavemetini karşılaştırmaya odaklanılmıştır [13]. Kaynak öncesinde plaka temizlenmiş ve yağdan arındırılmış, ardından oksit tabakasını ortadan kaldırmak için 20 dakika boyunca alkole daldırılmış, soğuk suyla durulanmış ve kurutulmuştur. Korumalı manuel metalik ark kaynağı çeşitli elektrotlar ve parametrelerle kullanılmıştır.

Tüm kaynak yöntemleri için her biri 225x150x14 mm ölçülerinde iki plaka kullanılmıştır ve her bir kaynak yöntemi için kaynak ağzı Şekil 5.1'deki gibi hazırlanmıştır. Başlangıçta, çift oluklu plakalar alın kaynağı için hizalanmış ve punta kaynaklarıyla sabitlenmiştir. Daha sonra plakalar, belirlenen kaynak parametrelerine göre TIG, örtülü elektrot, gaz altı ve toz altı kaynak yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı kaynaklanmıştır. Kaynaklanan P355GH plaka bağlantılarının bütünlüğünü doğrulamak için numunelere ultrasonik ve boya penetrant testi uygulanmıştır. Ayrıca, çeşitli büyütmelemlerde mikro yapısal inceleme gerçekleştirilmiştir. Numuneler, çekme mukavemeti, Charpy darbe dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikleri değerlendirmek için kaynaklı bağlantılar için EN 13445 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır.



Şekil 5.1. Test plakaları için hazırlanan kaynak ağzı şekli (t:14 mm).

Çizelge 5.5. Kaynak yöntemlerine bağlı olarak kaynak parametreleri

Aynak Yöntemleri	TIG	Örtülü Elektrot	Gaz Altı	Toz Altı
Elektrot seçimi [a]	AWS ER70S-6	AWS A5.1 E7018-1 H4	AWS ER70S-6	AWS A5.23: EA2 / F8A(P)4EA2-A2
Volt [b]	10 – 14 V	20 – 24 V	22 – 24 V	28 – 32 V
Amper [c]	70 – 154 A	100 – 135 A	160 – 180 A	450 – 550 A
Kaynak hızı [d]	1 – 3 cm/dk	3 - 7 cm/dk	10 -15 cm/dk	35 – 40 cm/dk
Elektrot/tel çapı [e]	2,4 mm	3,25 mm	1,6 mm	4 mm
Pasolar arası sıcaklık [f]	250°C	250°C	250°C	350°C
Termal verimlilik [g]	0,6	0,8	0,8	1
Isı girdisi [h]	2.52-2.58 Kj/mm	2.22-3.2 Kj/mm	1.037-1.267 Kj/mm	2.16-2.64 Kj/mm

Isı girdisinin kaynaklı malzemenin mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve çarpılma önemli ölçüde etkilediği EN normu olan EN 1011-1'e göre hesaplanmıştır [34, 45]. Bu nedenle, ısı girdisi sonuçlarına dayanarak, P355GH'nin karakterizasyonu mikro yapısal analiz, mekanik ve tahribatsız test sonuçları kullanılarak karşılaştırılmıştır.

5.3. Tahribatsız Muayene

Tahribatsız test numuneleri, yalnızca numune eklemi üzerinde çekme testi, darbe dayanımı ve sertlik dağılımı dahil olmak üzere ardışık tahribatsız testlerden olumlu sonuçlar elde edildikten sonra alınmıştır. Tüm kaynak işlemleri için tahribatsız testler gerçekleştirilmiş ve tahribatsız test ve bağlantı değerlendirmesi için seçilen standartlar üzerinde anlaşmaya varılmış ve Çizelge 5.6'da özetlenmiştir. Tahribatlı test numunelerinin toplanması EN ISO 15614-1'e [46] uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.6. Kaynak numune bağlantılarının tahribatsız test sonuçları

Numune	Muayene Tipi	Muayene Oranı
Tam penetrasyonlu alın kaynağı	Görsel muayene	100%
	Penetrant muayene	100%
	Ultrasonik muayene	100%

Başlangıçta, her bir numune eklemi görsel test (VT), sıvı penetrant testi (PT) ve ultrasonik test (UT) olmak üzere kapsamlı tahribatsız testlerden geçirilmiştir. Test kapsamına radyografik inceleme de dâhil edilerek EN ISO 15614-1 standardının gerekliliklerinin ötesine genişletilmiştir. Tüm testler kaynaktan 48 saat sonra gerçekleştirilmiş ve kaynaklı bağlantılar EN ISO 5817 standardında belirtildiği gibi Kalite Seviyesi B'ye göre değerlendirilmiştir [48].

Tüm NDT yöntemlerinde elde edilen tatmin edici sonuçlar, P355GH çelik kaynaklarının yapı bütünlüğünü ve güvenilirliğini doğrulamaktadır. Bu bulgular, yüksek sıcaklıklar altında iyi kaynaklanabilirlik ve mekanik performans da dahil olmak üzere çeliğin bilinen özellikleriyle tutarlıdır. Bu tür bir kalite güvencesi, malzeme hatasının yıkıcı sonuçlar doğurabileceği basınçlı kaplar için hayati önem taşımaktadır. [15, 24]

5.4. Mekanik Testler

5.4.1. Sertlik testi

Sertlik testi tipik olarak kaynak metali ve kaba taneli ısıdan etkilenen bölgede en yüksek sertlik değerleri ile Vickers olarak kaynak boyunca bir doğrusallık gösterir. Ana metal ve ince taneli ısıdan etkilenen bölge genellikle daha düşük sertlik değerleri sergiler [49, 62].

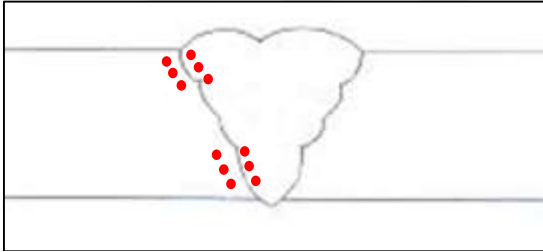
Kaynak metali ve kaba taneli ısıdan etkilenen bölgedeki artan sertlik, martensit ve beynit gibi daha sert fazların oluşumuna bağlanabilir. Özellikle martensitin varlığı sertliği artırır ancak tokluğu da azaltabilir. Buna karşılık, ince taneli ısıdan etkilenen bölge tane incilmesi ve daha sünek ferritik bir mikroyapı nedeniyle daha düşük sertlik gösterir [6, 41].

Kaba taneli ısıdan etkilenen bölge ve ana malzeme arasındaki yüksek sertlik, hidrojen kaynaklı çatlamaya veya hizmette gevrek kırılmaya yatkınlığı gösterebilir.

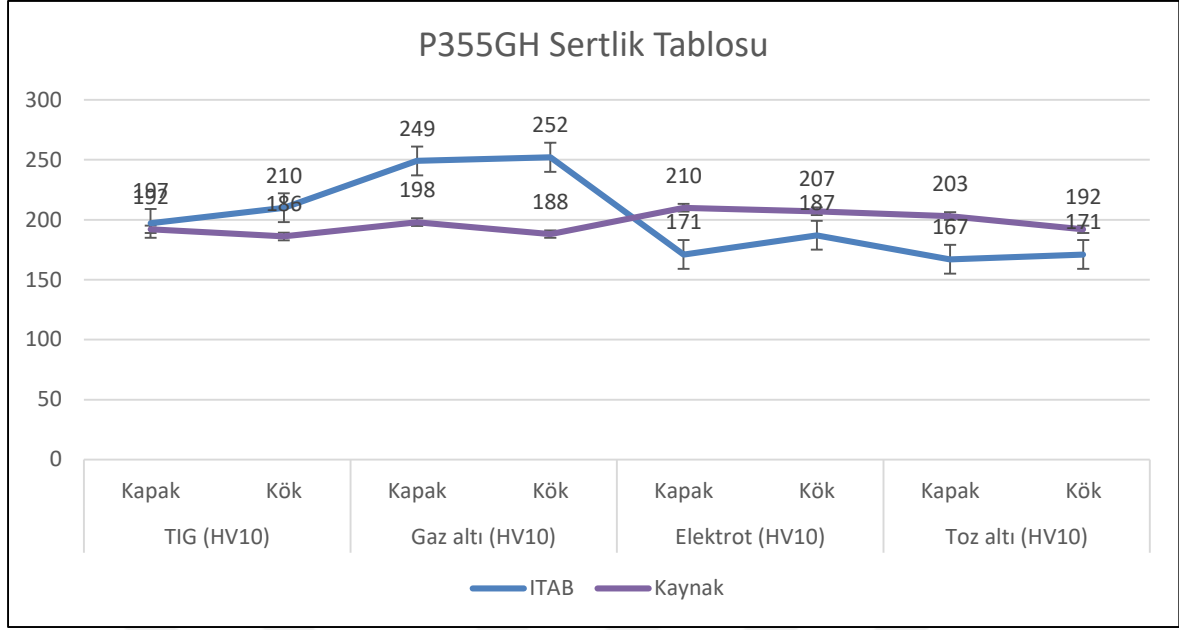
Şekil 5.3'de Toz altı kaynağının ITAB'da en düşük toplam sertlik değerlerini verdiğini göstermektedir. Bu, düşük ısı girdisini ve minimum mikroyapısal değişiklikleri gösterir. Örtülü elektrot, muhtemelen daha yüksek ısı girdisi ve daha yavaş soğuma nedeniyle toz altına kıyasla tüm bölgelerde orta derecede daha yüksek sertlik üretir. Gaz altı tüm

bölgelerde, özellikle ITAB'da en yüksek sertliği gösterir, bu da önemli termal etkiye ve muhtemelen daha sert mikro yapılara yol açan daha hızlı soğutma hızlarına işaret eder. TIG nispeten kaynak ve ITAB bölgelerinde, orta derece sertliğe sahiptir. Bunun nedeni, TIG daha yavaş kaynak hızına ve derin nüfuziyet ile bu sertlik değerini sağlamış olabilir. [60]

Gaz altı ve TIG kaynak yöntemleri ITAB sertliğinde ana malzemeye kıyasla bir yüksek değer gösterir, bu da termal döngüler nedeniyle tipiktir. Gaz altı, tüm bölgelerde en yüksek ve en dengeli sertliği verir, bu da gelişmiş mekanik mukavemeti gösterebilir, ancak kaynak sonrası kontrollü soğuma sağlanmaz ise daha fazla kırılganlık anlamına da gelebilir. Yüksek ısı girdili TIG kaynağı, süneklik ve hassas uygulamalar için faydalı olan en yumuşak kaynaklarla sonuçlanır. Toz altındaki kaynak metali, daha fazla alaşım elementi tutma veya katılaşma özelliklerine işaret eden en sert metaldir. Vickers sertlik ölçümü ile ısıdan etkilenen bölge ve kaynak bölgesi arasında karşılaştırılma yapılmış ve mikro yapı analizi yapılmıştır. Seçilen elektrot ve optimum kaynak parametreleri Çizelge 5.5'te listelenmiştir. Numunlerden alınan sertlik bölgeleri Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Ana Malzeme, ITAB ve Kaynak Metalinden alınan sertlik bölgeleri



Şekil 5.3. Ana Malzeme, ITAB ve Kaynak Metalinin sertlik sonuçları (HV10)

Çizelge 5.7. Numunelerin sertlik sonuçları (HV10)

Kaynak Yöntemi	Bölge	ITAB			Kaynak		
TIG (HV10)	Kapak	197	198	194	192	194	188
	Kök	210	208	206	186	203	206
Gaz altı (HV10)	Kapak	249	233	238	198	198	202
	Kök	252	248	236	188	191	189
Elektrot (HV10)	Kapak	171	176	187	210	207	202
	Kök	187	188	189	207	206	208
Toz altı (HV10)	Kapak	167	180	181	203	204	196
	Kök	171	180	169	192	190	195

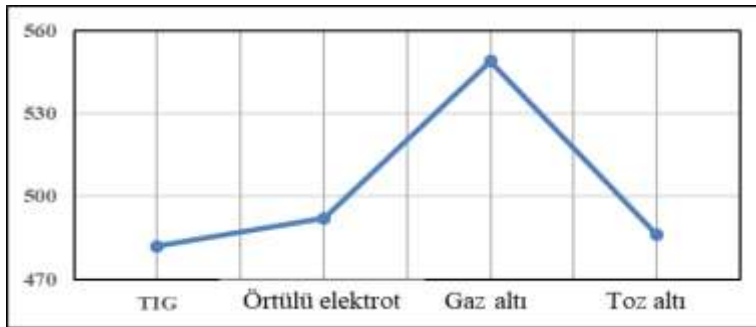
5.4.2. Çekme testi

Kaynaklı P355GH'nin çekme mukavemeti, kaynak kalitesine ve ısı girdisine bağlı olarak küçük farklılıklar gösterebilir. Çekme hatası tipik olarak ana metalde meydana gelir, bu da kaynak metali ve ITAB'ın ana malzemeden daha güçlü veya daha kırılgan olduğunu gösterir.

Kaynağın çekme mukavemeti ideal olarak ana malzeme ile aynı veya sahip olduğu değerden fazla olmalıdır. Ana malzemedeki hata, kaynak metali ve ITAB bölgeleri yeterli mukavemete sahip olduğundan uygun kaynak kalitesini gösterir. Bununla birlikte, ITAB

veya kaynak metalinde hata meydana gelirse, zayıf kaynak parametrelerini, aşırı ısı girişini veya istenmeyen mikro yapısal dönüşümleri gösterebilir.

Şekil 5.4, TIG'in dört yöntem arasında en düşük çekme noktasına sahip olduğunu göstermektedir. Bu, düşük ısı girdisi ve daha yavaş biriktirme oranları nedeniyle daha düşük sertliğe sahip olması, daha ince taneli malzemelerin kaynağı ile uyumludur. Muhtemelen daha yüksek ısı girdisinin daha fazla tane irileşmesine yol açması neden olmuştur. Gaz altı, Çizelge 5.7'de verilen en yüksek sertlik değerleriyle tutarlı olan en yüksek gerilme mukavemetini sağlar. Bu, tokluğun uygun şekilde dengelenmemesi durumunda daha güçlü ancak potansiyel olarak daha kırılgan bir kaynak olduğunu göstermektedir. Gaz altı kaynak metalinin daha sert ancak daha kırılgan olduğunu veya iç kusurların veya artık gerilmelerin çekme mukavemetini etkilediğini gösterebilir. Gaz altı her iki sertlikte de gözlemlendiği için bu açıktır. Daha sert mikro yapılar genellikle deformasyona daha iyi direnç göstererek çekme mukavemetini artırdığı için bu beklenen bir durumdur. TIG ve toz altı, sertlik profillerinde aynı olmasına rağmen (TIG en yumuşak, toz altı kaynak metalinde en sert), her ikisi de benzer çekme noktası ile sonuçlanır, bu da sertliğin tek başına çekme performansını tanımlamadığını gösterir, kaynak bütünlüğü, füzyon kalitesi ve artık gerilmeler de önemli roller oynar. En iyi mekanik mukavemeti sunuyor gibi görünmektedir, ancak darbe tokluğu veya süneklik için daha fazla değerlendirme yapılması gerekebilir. Numunelerin çekme noktası ve % uzama sonuçları Çizelge 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Ana Malzeme, ITAB ve Kaynak Metalinin çekme testi değerleri

Çizelge 5.8. Numunelerin çekme ve uzama sonuçları

Kaynak Yöntemleri	TIG	Örtülü Eektrot	Gaz Altı	Toz Altı
Çekme Dayanımı (MPa)	482 ± 1,00	492 ± 9,60	549 ± 6,24	486 ± 7,21
% Uzama	27,6 ± 2,08	23,7 ± 0,57	18,7 ± 0,57	23 ± 2,00

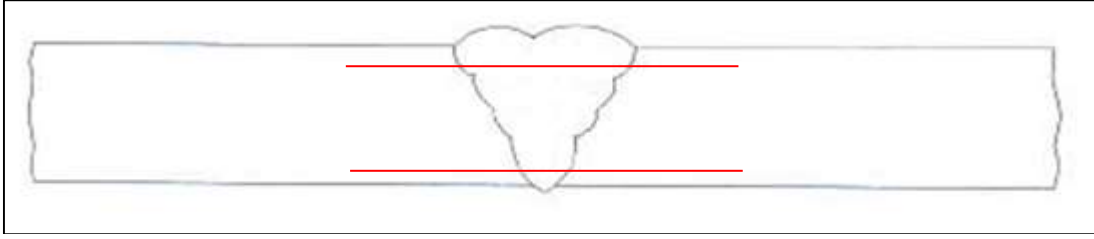
5.4.3. Charpy darbe testi

Charpy V-çentik darbe testi sonuçları genellikle ITAB'da, özellikle de tane irileşmesi nedeniyle kaba taneli ısıdan etkilenen bölgede toklukta bir azalma olduğunu gösterir. Ana metal genellikle en yüksek tokluğu gösterir ve bunu ince taneli ITAB takip eder.

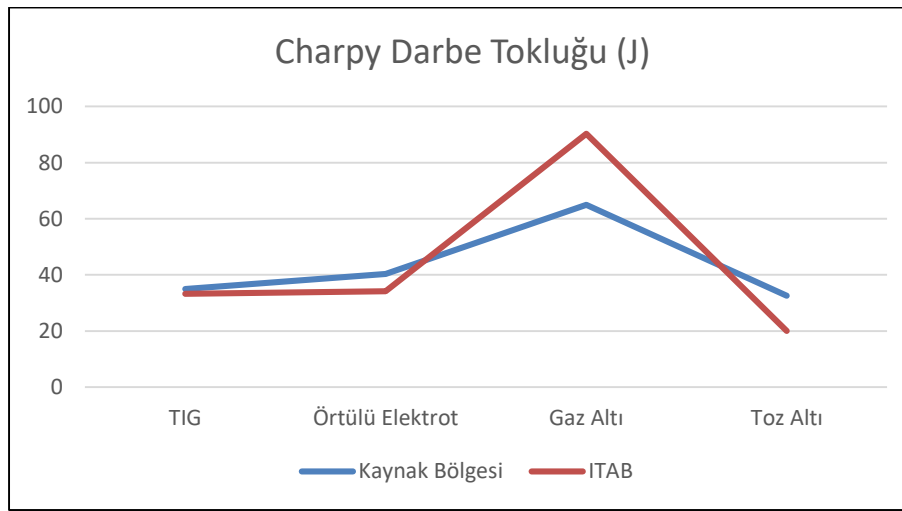
ITAB'ın, özellikle de kaba taneli ısıdan etkilenen bölgenin tokluğu, dinamik veya darbeli yükleme altında kaynağın performansı için kritik öneme sahiptir. Kaba taneli ısıdan etkilenen bölgede tokluğun azalması yaygın bir sorundur ve tane yapısını iyileştirmeyi ve artık gerilmeleri azaltmayı amaçlayan kaynak sonrası ısıtma işlemleri (PWHT) yoluyla hafifletilebilir. İnce taneli ITAB tipik olarak daha yüksek tokluğu korur ve bu da kaynak parçasının genel performansı için faydalıdır.

Şekil 5.6, TIG'in en yüksek ısı girdisine sahip olduğunu, daha ince tane yapılarına ve daha fazla süneklığe yol açtığını, ancak aynı zamanda sınırlı füzyon derinliğine sahip olduğunu göstermektedir. Her iki bölge için benzer ve düşük darbe değerleri, nispeten düzgün ancak sert olmayan bir mikroyapıya işaret etmektedir. Örtülü elektrot her iki bölgede de en yüksek darbe tokluğunu sergilemektedir. Bu, iyi tokluğa ve enerji emilimine sahip iyi dengelenmiş bir kaynak anlamına gelir, basınçlı ekipman gibi çatlak yayılmasına karşı direnç gerektiren uygulamalar için idealdir. Gaz altı, en yüksek sertliğe ve çekme noktasına sahip olmasına rağmen, yalnızca orta düzeyde darbe tokluğu gösterir. Yüksek mukavemet, ancak muhtemelen daha sert ve daha kırılgan fazlar nedeniyle bir miktar azaltılmış süneklilik ve enerji emilimi. Toz altı, özellikle ITAB'da en düşük darbe tokluğunu göstermektedir. Bu, iri taneli bir ITAB veya yüksek ısı girdisi ve daha yavaş soğuma hızları nedeniyle kırılgan fazların varlığına işaret etmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda kırılgan kırılmaya daha yatkın olabilir. Örtülü elektrot en iyi darbe performansını sunar, bu da onu tokluğun çok önemli olduğu yapısal uygulamalar için uygun hale getirir. Gaz altı yüksek mukavemetli bir seçenektir, ancak orta düzeyde tokluğa sahiptir. Mukavemet açısından kritik bileşenler için iyi bir seçimdir, muhtemelen dinamik veya darbe yüklü yapılar için daha az uygundur. Toz altı, yüksek kaynak metali sertliğine rağmen, özellikle ITAB'da zayıf tokluğa sahiptir. TIG hem mukavemet hem de tokluk açısından düşüktür, bu da ağır veya yüksek darbeli hizmet için değil, hassas kaynak veya ince kesitler için uygun olduğunu gösterir. Çizelge 5.9, kaynakların 20°C'deki Charpy darbe testi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.5 charpy darbe testi için

alınan numunelerin bölgesini göstermektedir.



Şekil 5.5. Charpy darbe testi için alınan numunelerin bölgeleri



Şekil 5.6. Farklı kaynak yöntemleri ile üretilen numunelerin Charpy darbe testi sonuçları (Joule)

Çizelge 5.9. Numunelerin 20°C'deki Charpy darbe testi sonuçları (Joule)

Kaynak Yöntemi	Kaynak Bölgesi (Kapak)	Kaynak Bölgesi (Kök)	ITAB (Kapak)	ITAB (Kök)	Ana Malzeme
TIG	35 ± 2,00	34 ± 5,54	33,3 ± 1,57	31 ± 7,21	34 J
Örtülü Elektrot	40,36 ± 15,85	44,54 ± 7,31	34,19 ± 8,74	35 ± 6,15	
Gaz Altı	65,00 ± 9,00	77,4 ± 5,27	90,3 ± 0,57	140,44 ± 7,41	
Toz Altı	32,6 ± 3,05	30,61 ± 1,99	20 ± 0,00	27,77 ± 8,50	

5.4.4. Kaynak parametrelerinin etkisi

Isı girdisi, kaynağın nihai mikro yapısını ve mekanik özelliklerini belirlemede çok önemli bir rol oynar. Yüksek ısı girdisi ITAB'da tane büyümesini teşvik eder ve tokluğu azaltan martensit gibi istenmeyen fazların oluşumuna yol açabilir. Daha düşük ısı girdisi daha ince

mikro yapılara neden olabilir, ancak kaynakta eksik füzyon veya zayıf penetrasyonla sonuçlanabilir. [50, 61]

Çizelge 5.10. Kaynak parametreleri

Kaynak yöntemleri	TIG	Örtülü Elektrot	Gaz Altı	Toz Altı
Volt [b]	10 – 14 V	20 – 24 V	22 – 24 V	28 – 32 V
Akım [c]	70 – 154 A	100 – 135 A	160 – 180 A	450 – 550 A
Kaynak hızı [d]	1 – 3 cm/dk	3 – 7 cm/dk	10 – 15 cm/dk	35 – 40 cm/dk
Termal verimlilik [g]	0,6	0,8	0,8	1

Isı girdisini hesaplamak için Denklem 1 kullanılır [14]

$$Isı\ girdisi = \frac{Volt \times Akım \times Termal\ verimlilik \times 60}{Kaynak\ hızı \times 1000} \quad (5.1)$$

Çizelge 5.11. Farklı kaynak yöntemleri için hesaplanan ısı girdisi

Kaynak yöntemi	TIG	Örtülü Elektrot	Gaz Altı	Toz Altı
Isı girdisi (Kj/mm) [h]	2,52-2,58	2,22-3,20	1,03-1,26	2,16-2,64

TIG için ısı girdisi aralığı oldukça dardır (2,52-2,58 kJ/mm) ve bu da tutarlı bir süreç kontrolüne işaret etmektedir. Bu nispeten ılımlı ısı girdisi, TIG'in hassasiyeti ve daha ince malzemelerde yüksek kaliteli, hatasız kaynaklar üretme kabiliyeti ile uyumludur. Detaylı çalışma veya kök paso kaynağı gerektiğinde P355GH için uygundur. Örtülü elektrot için en geniş aralık (2,22-3,20 kJ/mm), operatörün becerisine, elektrot tipine ve akım ayarlarına bağlı olarak potansiyel değişkenliği gösterir. Daha yüksek uç (3,20 kJ/mm) ITAB'da tane irileşmesi riskini doğurabilir ve bu da uygun şekilde kontrol edilmezse mekanik özellikleri etkileyebilir. Örtülü elektrot, esnekliği nedeniyle saha çalışmalarında sıklıkla kullanılır ancak P355GH üzerinde kaliteli sonuçlar için dikkatli parametre kontrolü gerektirir. Gaz altı için bu yöntem en düşük ısı girdisini (1,03-1,26 kJ/mm) gösterir. Düşük ısı girdisi ITAB boyutunu azaltır ve çarpılmayı en aza indirir, bu da basınçlı kap uygulamalarında tokluğu korumak ve artık gerilmeleri sınırlamak için faydalıdır. Gaz altı genellikle otomatik veya yarı otomatik prosesler için tercih edilir. Toz altı için, orta ila yüksek bir aralık (2,16-2,64 kJ/mm) sunar, tipik olarak derin nüfuziyetli kalın kesitlerin kaynağı için kullanılır. Isı girdisi TIG'e yakındır, ancak toz altı büyük, sürekli kaynaklar için çok daha verimlidir.

Özetle, gaz altı en düşük ısı girdisini sunar, bu da özellikle tokluk söz konusu olduğunda P355GH'deki metalürjik dönüşümleri kontrol etmek için faydalıdır. Örtülü elektrot en yüksek ısı girdisi üst sınırını sağlar ve aşırı yumuşama veya tane büyümesi gibi olumsuz etkilerden kaçınmak için dikkatle yönetilmelidir. TIG ve toz altı kaynaklarının her ikisi de istikrarlı ve ılımlı ısı giriş değerleri sunarak yüksek kaynak kalitesinin gerekli olduğu kritik basınçlı kap uygulamaları için uygun hale getirir.

Daha kalın kesitlerde yaygın olan daha hızlı soğutma hızları, martensit veya beynit gibi daha sert fazların oluşumuna yol açar. Daha yavaş soğuma hızları daha yumuşak ferritik yapıların oluşumuna izin verir, ancak daha düşük sertlik ve mukavemete yol açabilir. Kaynakta ısı girişi ve soğuma hızı arasındaki ilişki ters yönlüdür; yani ısı girişi arttıkça soğuma hızı görece olarak azalır ve bunun tersi de geçerlidir. Bu ilişki, kaynaklı bağlantının nihai mikro yapısını ve mekanik özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Malzemeye daha fazla ısı verilerek kaynağın ve çevresindeki ITAB sıcaklığı artırılır. İlave ısı daha geniş bir alana yayılır ve dağılması daha uzun sürer. Bu daha yavaş soğuma ferrit, perlit veya beynit gibi daha yumuşak ve sert olma eğiliminde olan daha kaba mikro yapıların oluşmasına izin verir. Kaynağa daha az ısı verilir, yani malzeme daha çabuk soğur. Hızlı soğuma martensit veya asiküler ferrit gibi daha sert, daha kırılğan fazların oluşumuna yol açabilir. Düşük ısı girdili gaz altı, ITAB'da yüksek soğuma hızları ve artan sertlik ile sonuçlanabilir [18].

800-500°C'de soğutma hızı (kaynak metalürjisi için önemlidir) Denklem 2 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir [19]. Burada soğutma hızıdır (°C/s), k : termal difüzyon katsayısı (P355GH için, çelikler için tipik olarak yaklaşık 10.6 mm²/s), T : ilgi noktasındaki en yüksek sıcaklık (mm), T_0 : başlangıç plaka sıcaklığı ve Q : ısı girdisi (kJ/mm).

$$\text{Soğuma hızı} = k \times \frac{(T - T_0)}{Q} \quad (5.2)$$

Çizelge 5.12. Farklı kaynak yöntemlerinin soğutma hızı

Kaynak Yöntemleri	TIG	Örtülü Elektrot	Gaz Altı	Toz Altı
Soğuma Hızı [°C/s]	4,11 – 4,21	3,31 – 4,77	8,41 – 10,29	4,02 – 4,91

Toz altı genellikle yüksek ısı girdisi nedeniyle en düşük soğutma oranına sahipken, gaz altı daha düşük enerji girdisi nedeniyle en yüksek soğutma oranına sahiptir.

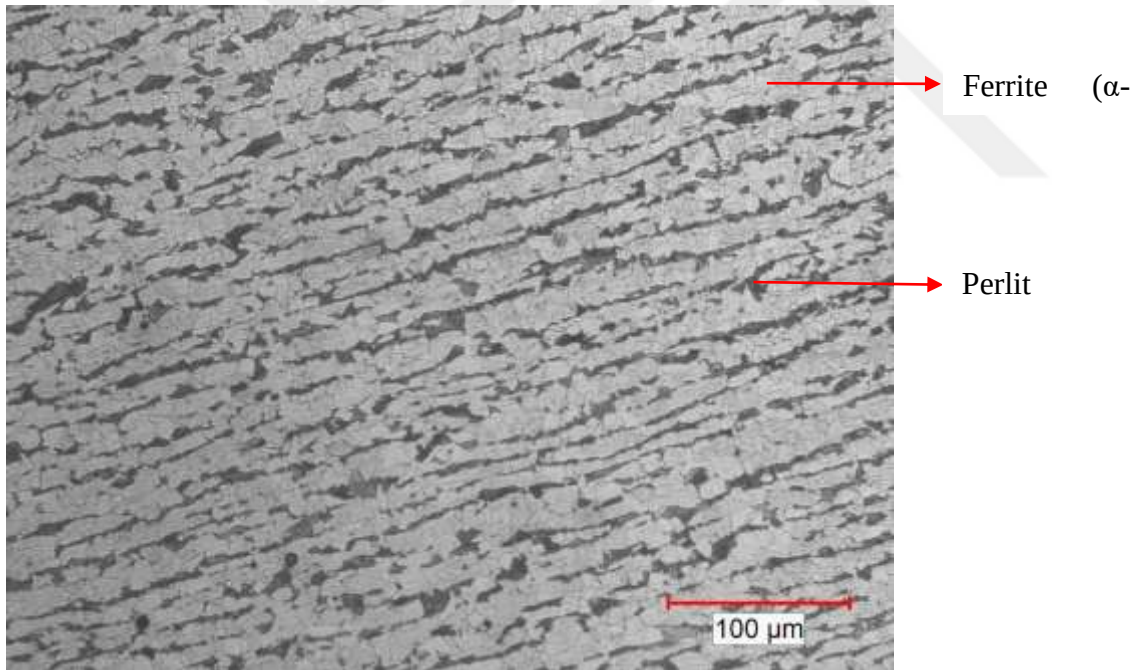
Gaz altı, yöntemler arasında en yüksek soğuma hızını göstermektedir (8,41-10,29 °C/s). Bunun nedeni muhtemelen gaz altı için tipik olan yüksek ısı girdisi ve hızlı kaynak hızıdır, bu da ısının daha hızlı dağılmasına yol açar. Daha yüksek soğutma hızları daha sert mikro yapılara (örn. beyrit veya martensit) yol açarak mukavemeti artırabilir ancak kontrol edilmezse tokluğu azaltabilir [58]. Örtülü elektrot ve toz altı kaynak yöntemi için, toz altı biraz daha tutarlı olmakla birlikte (4,02-4,91 °C/s) orta düzeyde soğuma hızları vardır. Bu yöntemler tipik olarak daha kontrollü bir ısı girdisi üreterek dengeli bir soğumaya yol açar. Bu, P355GH'de arzu edilen mikro yapıların (ferrit-perlit) elde edilmesi için faydalıdır ve hem tokluğu hem de mukavemeti artırır. TIG için dar ve düşük bir soğutma hızı aralığı (4,11-4,21 °C/s) vardır, bu da kaynak sırasında kararlı termal koşullara işaret eder. TIG'in hassasiyeti ve daha düşük ısı girdisi termal şoktan kaçınmaya yardımcı olur ve özellikle mikroyapı üzerinde ince kontrol gerektiğinde kaynak kalitesi için avantajlıdır. [37, 59]

Özetle gaz altı, kırılma fazlara yol açabilecek yüksek soğuma hızı nedeniyle tokluk söz konusuysa P355GH için dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. TIG ve toz altı, boyutsal kararlılık ve mekanik özellik tutarlılığı gerektiren uygulamalar için uygundur. Örtülü elektrot çok yönlülük ve orta düzeyde termal etki sunarak dengeli bir seçimdir.

5.4.5. Mikro yapı analizi

P355GH gibi basınçlı kap çeliklerinin mikro yapısı, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşulları altında mekanik performanslarının ve hizmet güvenilirliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. P355GH, EN ISO 10028-2 standardında tanımlanan, kazanlarda ve basınçlı kaplarda yaygın olarak kullanılan alaşımsız bir çelik kalitesidir. Mikro yapısı tipik olarak kontrollü termomekanik haddeme veya normalizasyon ısı işlemi ile elde edilen bir ferritik (α -Fe)- perlitik (Fe_3C) matrisinden oluşur. Yumuşak ve sünek olan ferrit iyi şekillendirilebilirlik ve tokluk sağlarken, perlit mukavemet ve aşınma direncine katkıda bulunur. Bu iki faz arasındaki denge, özellikle düşük sıcaklıklarda yeterli akma dayanımı (≥ 355 MPa), yüksek çekme dayanımı ve iyi darbe tokluğu sağlar. Sınırlı ve homojen bir mikro yapı, aksi takdirde çalışma sırasında kırılma kırılmaya veya yorulma arızasına yol açabilecek lokalize stres konsantrasyonlarını en aza indirmek için gereklidir. Bu nedenle, P355GH çeliğinin mikro yapısal özellikleri, zorlu hizmet ortamlarında uzun vadeli dayanıklılık, kaynaklanabilirlik ve güvenlik sağlamada temel öneme sahiptir.

Şekil 5.7’de gösterilen mikroyapı, %5 Nital çözeltisi kullanılarak dağlanmış ve optik mikroskop altında gözlemlenmiş P355GH basınçlı kap çeliğine karşılık gelmektedir. Normalize edilmiş P355GH çeliğinin genel iç yapısını göstermekte olup, ağırlıklı olarak ferritik (α -Fe)- perlitik (Fe_3C) bir yapı ortaya koymaktadır. Bantlı yapıda siyah renk ile hizalanan bölgeler perlit kolonilerini temsil ederken, daha açık alanlar eş eksenli ferrit tanelerine karşılık gelir. Perlit bantları uzamıştır, bu da termomekanik haddeleme kaynaklı deformasyon dokusuna işaret eder. Termomekanik haddeleme, yüksek sıcaklıklarda kontrollü deformasyonu ve ardından kontrollü soğutmayı içerir, bu da tane yapısını sınırlandırır, mukavemeti artırır ve ek ısı işleme gerek kalmadan tokluğu geliştirir. Bu süreç, tanelerin düzleştiği ve haddeleme yönünde hizalandığı görüntüde görülen uzatılmış ferrit-pearlit morfolojisine katkıda bulunur. Basınçlı kap uygulamalarında kullanılan P355GH çeliği, istenilen mukavemet ve sünekliğin uygun bir kombinasyonunu bantlı ferritik (Fe)- perlitik (Fe_3C) mikroyapı ile sağlamaktadır.

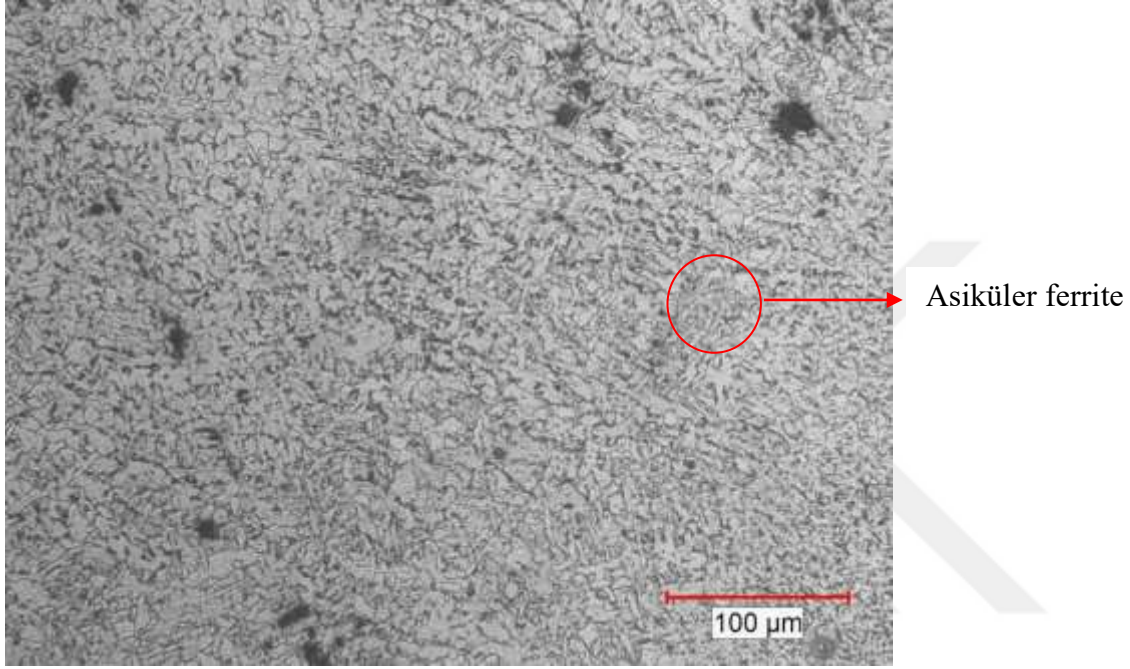


Şekil 5.7. Normalize edilmiş P355GH çeliğinin genel iç yapısı, siyah bölge Perlit, açık bölgeler Ferrit.

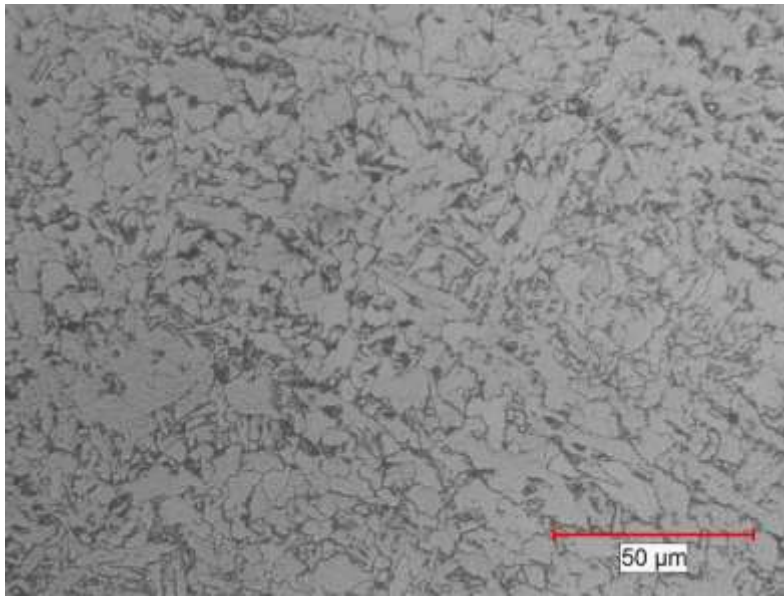
TIG Mikroyapı analizi

Tungsten Inert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin mikro yapısal değerlendirmesi, kaynak parametrelerinin mikro yapısal evrim ve sonuçta ortaya çıkan mekanik özellikler üzerindeki etkileri hakkında kritik bilgiler ortaya koymaktadır. TIG

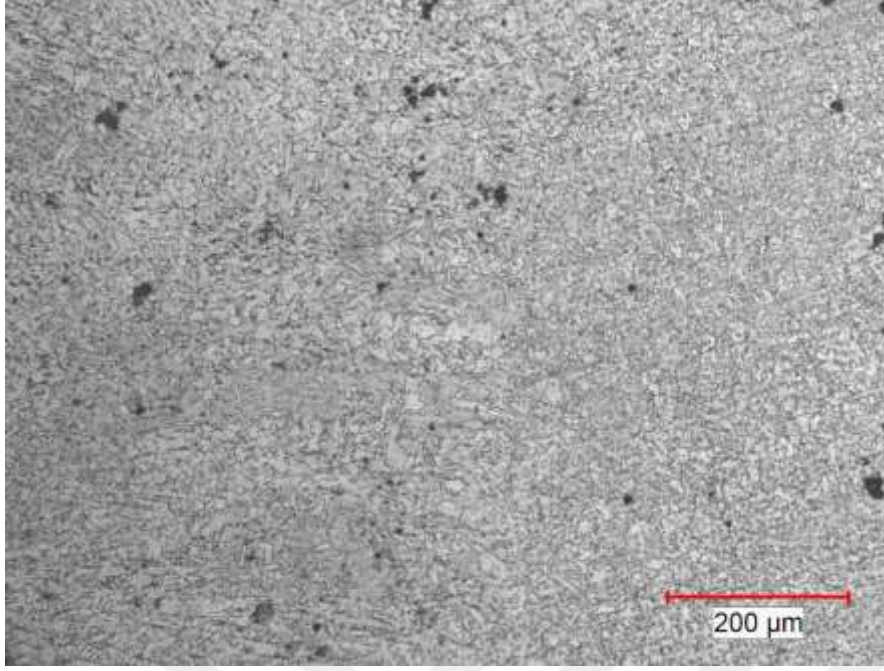
kaynağı, 2,52-2,58 kJ/mm arasında değişen bir ısı girdisi ve 4,11 – 4,21 °C/s soğutma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8 ve 5.9 kaynak metaline ait ve Şekil 5.11 ve 5.12 ITAB’a ait mikroyapılar, %5 Nital ile dağlanmış ve optik mikroskop altında gözlemlenmiş olup, kaynak metali, ısıdan etkilenen bölge ve ana metal bölgeleri boyunca farklı özellikler sergilemektedir. Şekil 5.10 ise kaynak ve ITAB geçiş bölgesini göstermektedir.



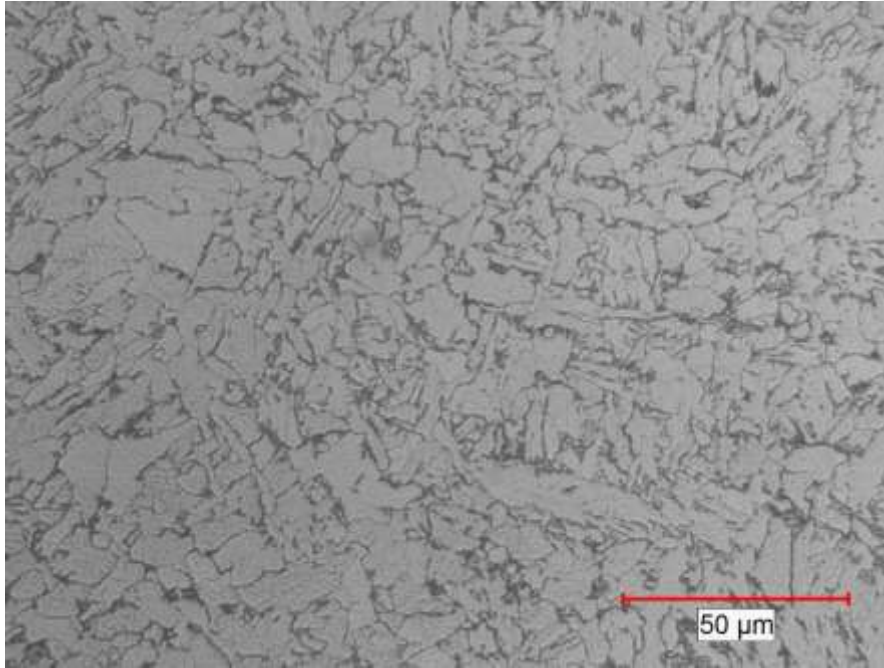
Şekil 5.8. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kapak)



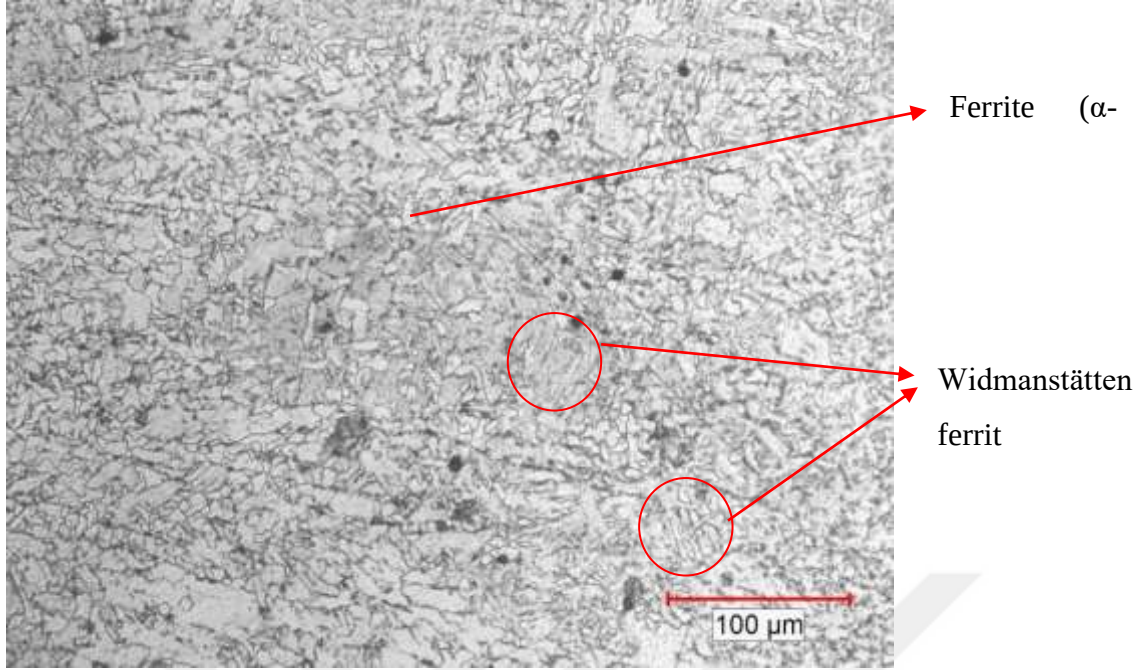
Şekil 5.9. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kök)



Şekil 5.10. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde)



Şekil 5.11. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak)



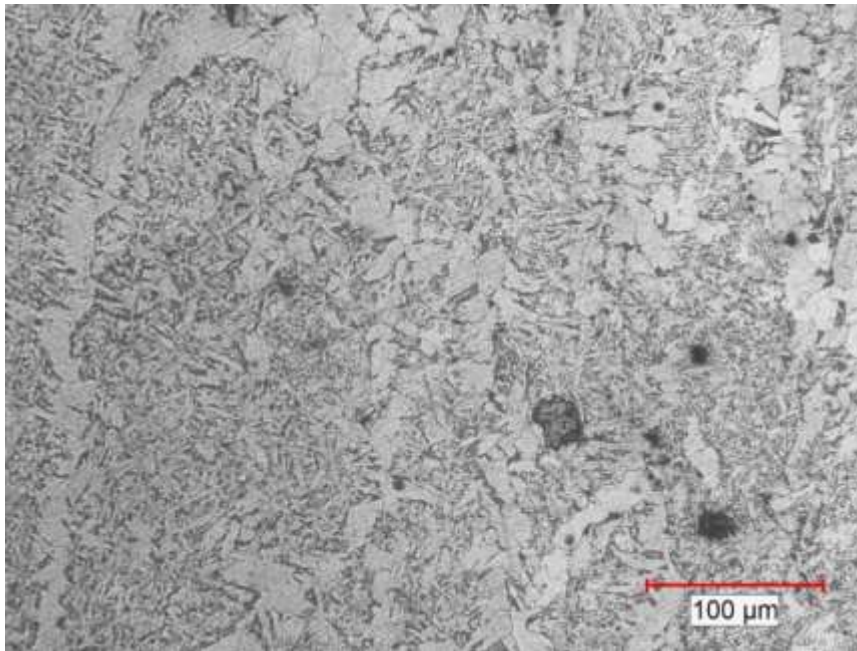
Şekil 5.12. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)

Şekil 5.12 ağırlıklı olarak tane sınırı ferriti ve beynitik bileşenlerin bir karışımı ile ince asiküler ferritten oluşur. Bu morfoloji, denge dışı fazların oluşumunu teşvik eden ve aşırı gevrekleşme olmadan gelişmiş mekanik mukavemete yol açan ılımlı soğutma hızlarından kaynaklanmaktadır. Kaynak metali ortalama 194 HV10 sertlik ve 549 MPa çekme dayanımı sergileyerek ana metale kıyasla güçlendirilmiş bir füzyon bölgesine işaret etmektedir. Bununla birlikte, kaynak metalinin 34 J'de kaydedilen Charpy darbe tokluğu, muhtemelen füzyon bölgesine özgü lokalize mikroyapısal homojensizlikler ve artık gerilme konsantrasyonları nedeniyle ITAB'ından daha düşüktür.

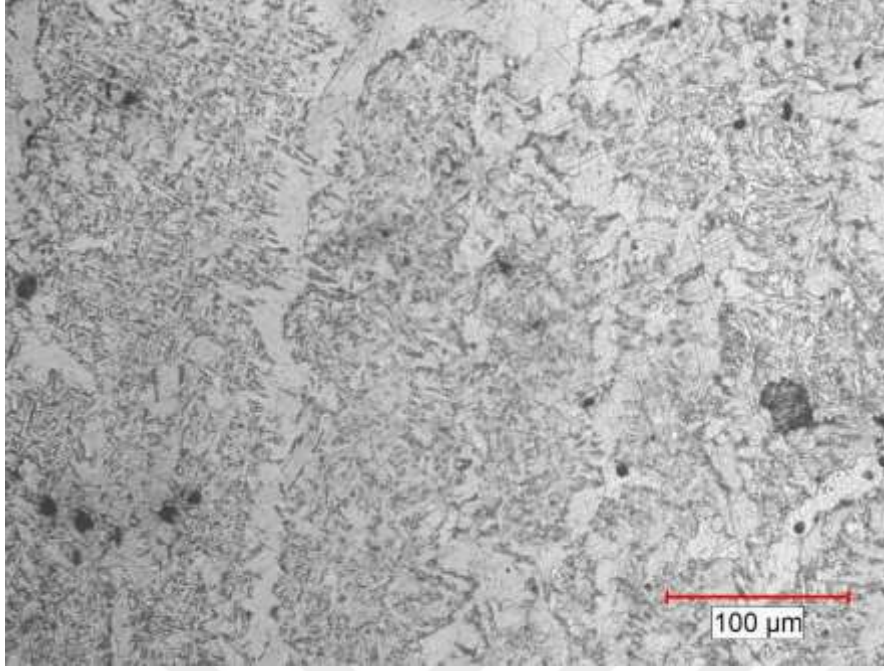
ITAB, poligonal ferrit ve kısmen dönüşmüş Widmanstätten ferritten oluşan bir geçiş mikro yapısı göstermektedir. Kontrollü ısı girdisi nedeniyle tane irileşmesi şiddetli olmasada, bu bölge tokluk azalmasına karşı biraz daha hassas kalmaktadır. Charpy V-çentik darbe enerjisi değerleri kaynak metali için 34 J ve ITAB için 31 J olup, mikro yapısal heterojenlik nedeniyle ITAB'da hafif bir düşüş olsa da her iki bölgenin de kabul edilebilir tokluğu koruduğunu göstermektedir.

Örtülü elektrot mikroyapı analizi

Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin mikroyapısal karakterizasyonu, kaynaklı bağlantının yapısal bütünlüğü ve mekanik performansı hakkında kritik bilgiler ortaya koymaktadır. Kaynak metal bölgesi (Şekil 5.13 ve 5.14), %5 Nital ile dağlanmış, asiküler ferrit, Widmanstätten ferrit ve tane sınırı ferritinin karmaşık bir karışımını göstermektedir. İnce, iğne benzeri asiküler ferrit kaynak metaline hakimdir ve 3,31-4,77 °C/s aralığında uygun bir soğuma hızına ve 2,22 ile 3,2 kJ/mm arasında ılımlı bir ısı girdisine işaret eder. Bu asiküler morfoloji, çatlama direnci ile bilinen ince taneli bir mikro yapı sağlayarak kaynağın mekanik mukavemetine ve darbe tokluğuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Karakteristik paralel çıtlar halinde düzenlenmiş Widmanstätten ferrit, ferrit taneleriyle kesişen ve daha yavaş yerel soğuma bölgelerinde oluşan, ek mukavemete katkıda bulunan ancak aşırı sürekli olması durumunda tokluğu potansiyel olarak biraz azaltan görülebilir. Eşit dağılımlı tane sınırı ferritinin varlığı ve önemli gözeneklilik veya kaba dendritik özelliklerin olmaması, kontrollü katılaşma ve sağlam kaynak kalitesini göstermektedir. Kaynak metalindeki ortalama sertlik ortalama 206 HV10'a ulaşarak hem ana malzemeden hem de ITAB'dan (183 HV10) daha yüksektir ve ölçülen 492 MPa çekme mukavemeti ve ortalama 38,52 J Charpy darbe tokluğu ile iyi bir korelasyon göstermektedir.

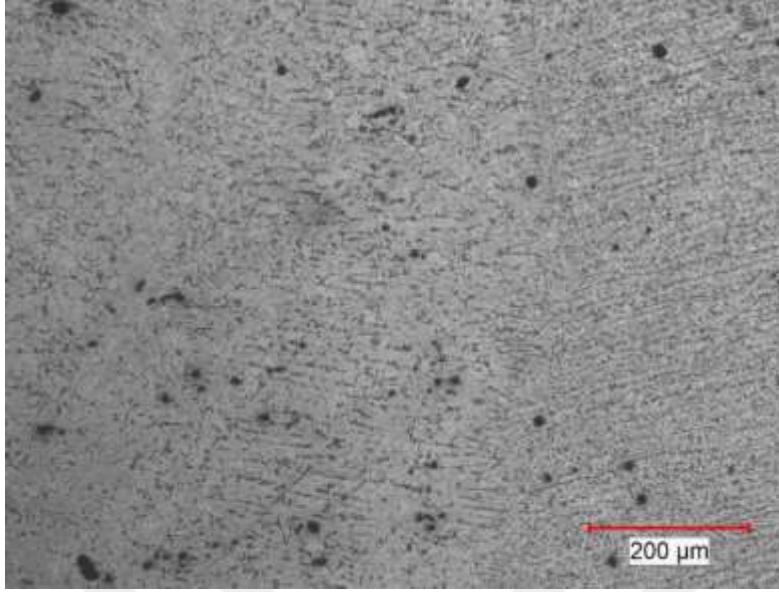


Şekil 5.13. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metal (Kapak)

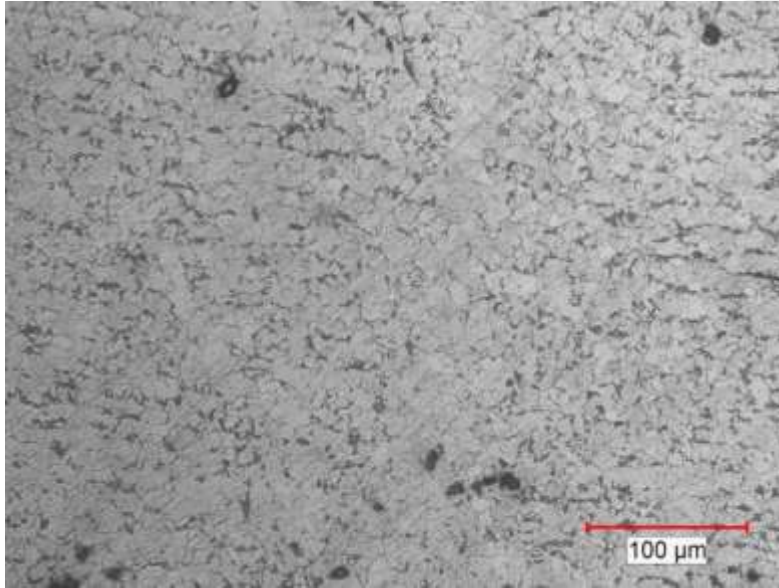


Şekil 5.14. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kök)

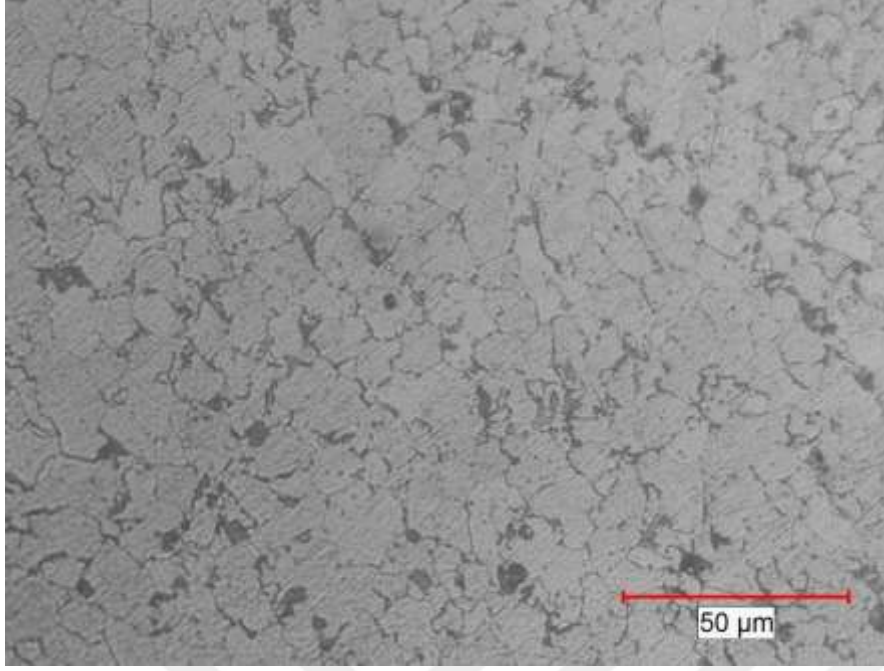
Isıdan etkilenen bölge (Şekil 5.15) ana metal ile füzyon hattı arasında bir geçiş bölgesi göstermektedir. Kısmen dönüşmüş ferritik taneler içerir. Mikro yapı, örtülü elektrot kaynağı sırasında ITAB'daki termal gradyanların mevcut ferritik yapının korunduğunu göstermektedir. Füzyon hattının yakınında bir miktar kabalaşmaya rağmen ITAB, 38,52 J J'lık nispeten yüksek Charpy darbe değeri ve 183 HV10'luk yüksek sertlik ile kanıtlandığı üzere minimum tane büyümesi ile rafine bir yapıyı korumaktadır. Bu değerler, uygulanan termal döngü altında ITAB'ın mekanik sağlamlığını doğrulamaktadır. Kaynak metali ve ITAB birlikte (Şekil 16 ve 17), EN 10028-2 standartlarına göre basınçlı kap uygulamaları için uygun, mükemmel mukavemet-tokluk sinerjisine sahip iyi optimize edilmiş bir mikro yapı sergilemektedir.



Şekil 5.15. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde)



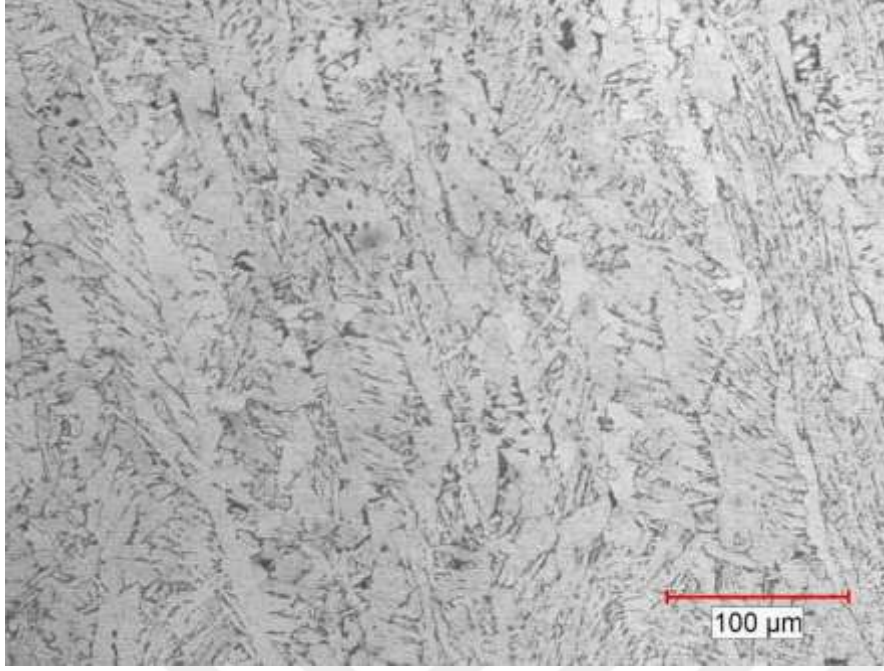
Şekil 5.16. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak)



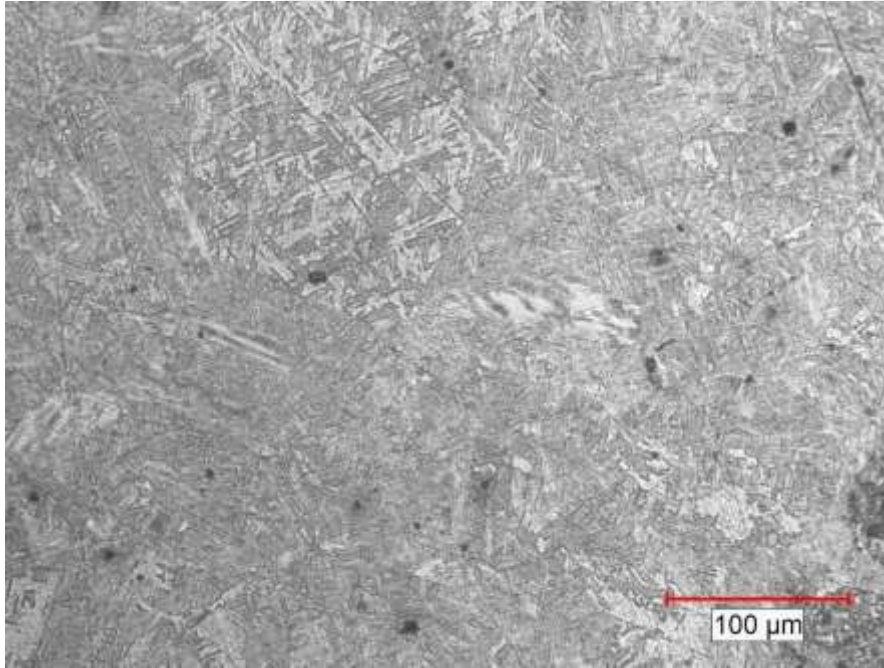
Şekil 5.17. Örtülü elektrot kaynak (MMA) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)

Gaz altı mikroyapı analizi

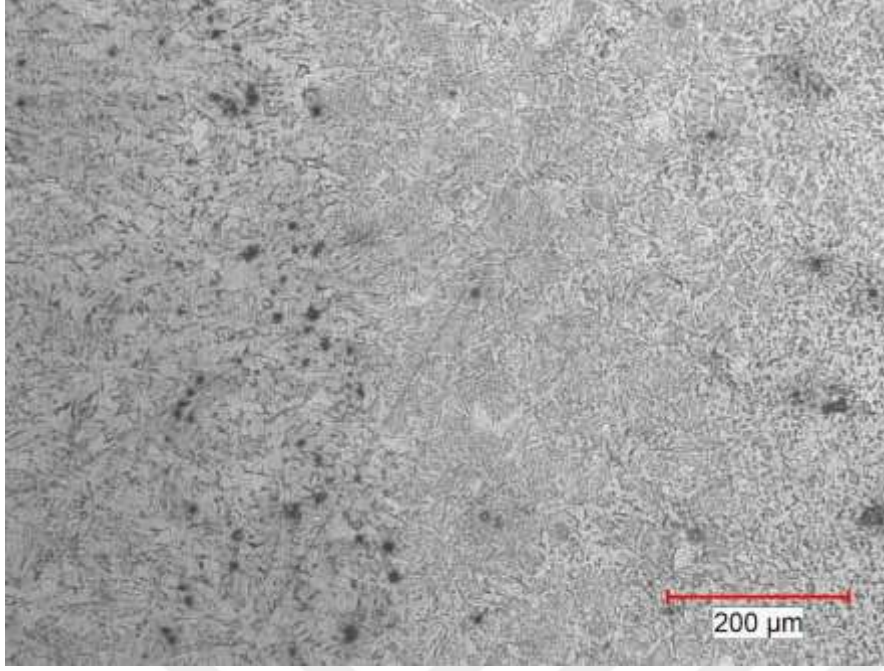
Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin mikro yapısal analizi, bu kaynak tekniğiyle ilişkili nispeten düşük ısı girdisi (1,03-1,26 kJ/mm) ve yüksek soğutma hızından (8,41-10,26 °C/s) doğrudan etkilenen önemli özellikleri ortaya koymaktadır. Kaynak metali bölgesi (Şekil 5.18 ve 5.19), %5 Nital ile kazınmış olup, esas olarak ince asiküler ferrit ve Widmanstätten ferritten oluşmakta ve oldukça yönlü, çita benzeri bir morfolojide düzenlenmiştir. Yüksek soğutma hızının teşvik ettiği hızlı katılaşma, tane irileşmesini engeller ve hem mukavemeti hem de tokluğu artıran asiküler ferrit gibi denge dışı dönüşüm ürünlerinin oluşumunu teşvik eder. Kaynak metali ortalama 194 HV10 sertlik ve 549 MPa çekme dayanımı sergileyerek ITAB'da (ortalama 242 HV10) kıyasla güçlendirilmiş bir füzyon bölgesine işaret etmektedir. Bununla birlikte, kaynak metalinin ortalama 71,2 J'de kaydedilen Charpy darbe tokluğu, muhtemelen füzyon bölgesine özgü lokalize mikro yapısal homojensizlikler ve artık gerilme konsantrasyonları nedeniyle ITAB'inkinden daha düşüktür.



Şekil 5.18. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kapak)

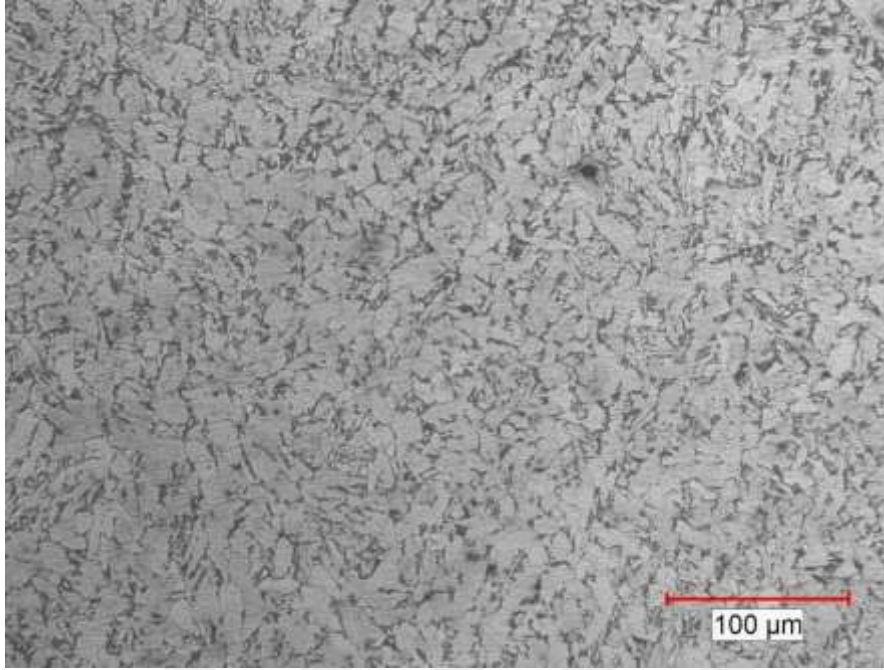


Şekil 5.19. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali (Kök)

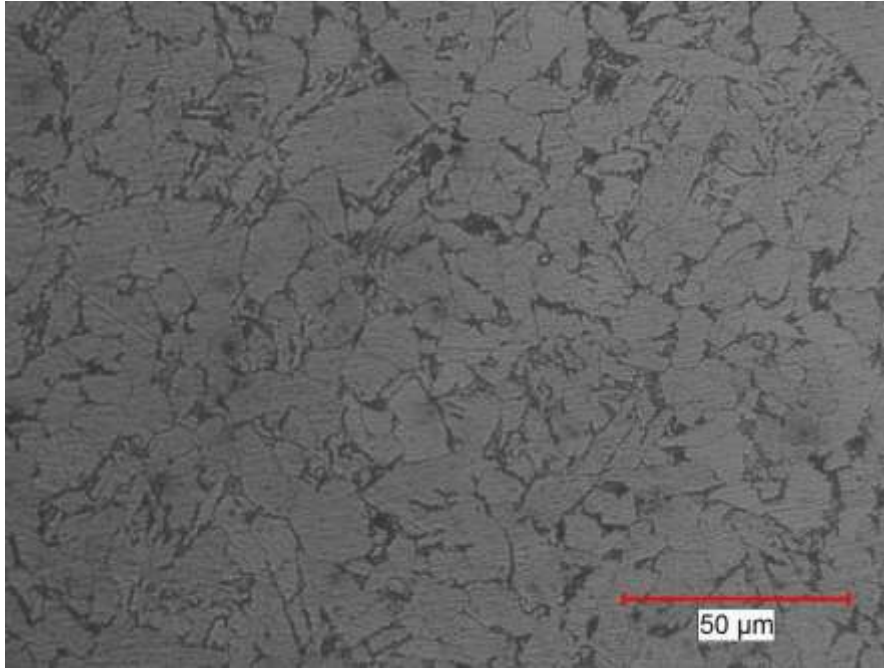


Şekil 5.20. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde)

ITAB'da (Şekil 5.21 ve 5.22), mikro yapı ana metalin ferrit-perlitinden az miktarda Widmanstätten ferriti içeren rafine poligonal ferrit matrise geçiş yapar. Bu bölgedeki termal döngü ve soğuma üzerine dönüşüme neden olarak ince taneli yapıların oluşmasına yol açmıştır. ITAB, ortalama 242.6 HV10'luk artan bir sertlik ve 115.37 J'lik bir Charpy darbe enerjisi sergileyerek kırılma kırılmaya karşı iyi bir direnç gösterir. ITAB'da kaynak metaline göre artan tokluk, daha ince ve daha homojen mikro yapısına ve azaltılmış artık gerilme profiline bağlanabilir. Genel olarak, burada kullanılan GMAW işlem parametreleri, özellikle EN 10028-2 standartlarına uygun basınçlı kap uygulamaları için uygun olan mükemmel bir mukavemet ve kabul edilebilir tokluk kombinasyonuna sahip kaynaklı bir bağlantı üretmiştir. Kaynak ve ITAB boyunca rafine edilmiş tane yapısı, servisle ilgili arıza riskini en aza indirirken üstün mekanik performansa katkıda bulunur.



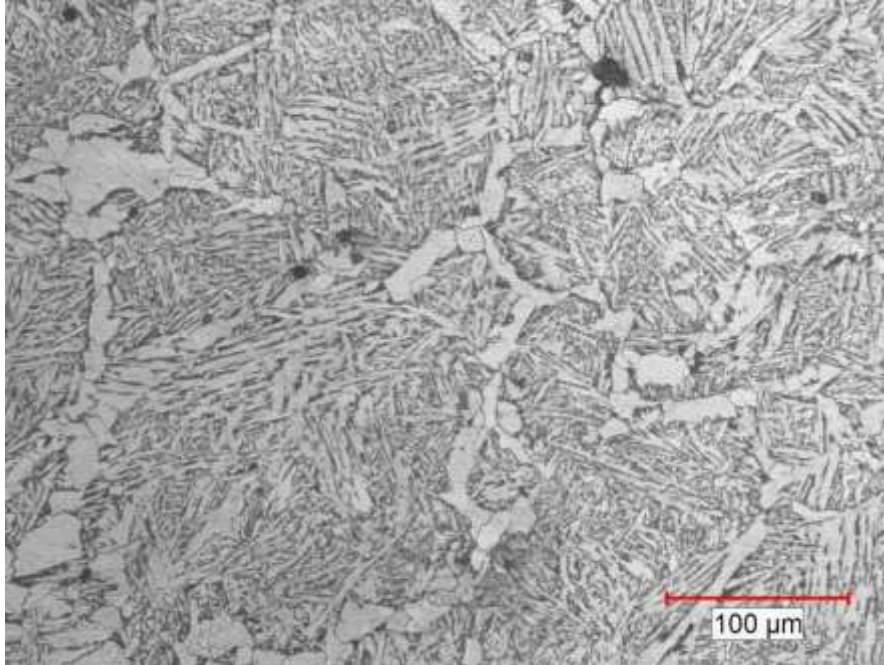
Şekil 5.21. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak)



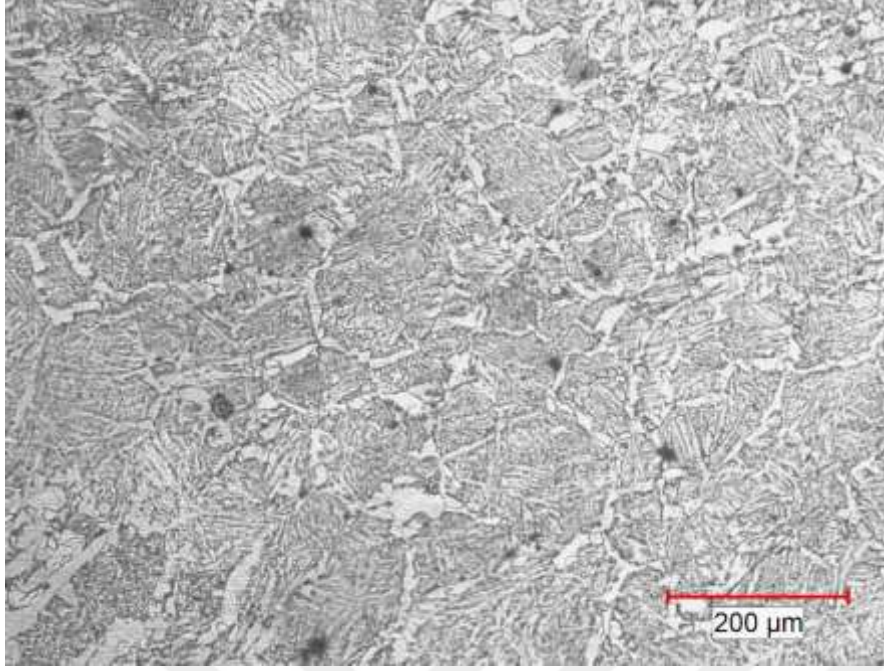
Şekil 5.22. Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemiyle kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)

Tozaltı mikroyapı analizi

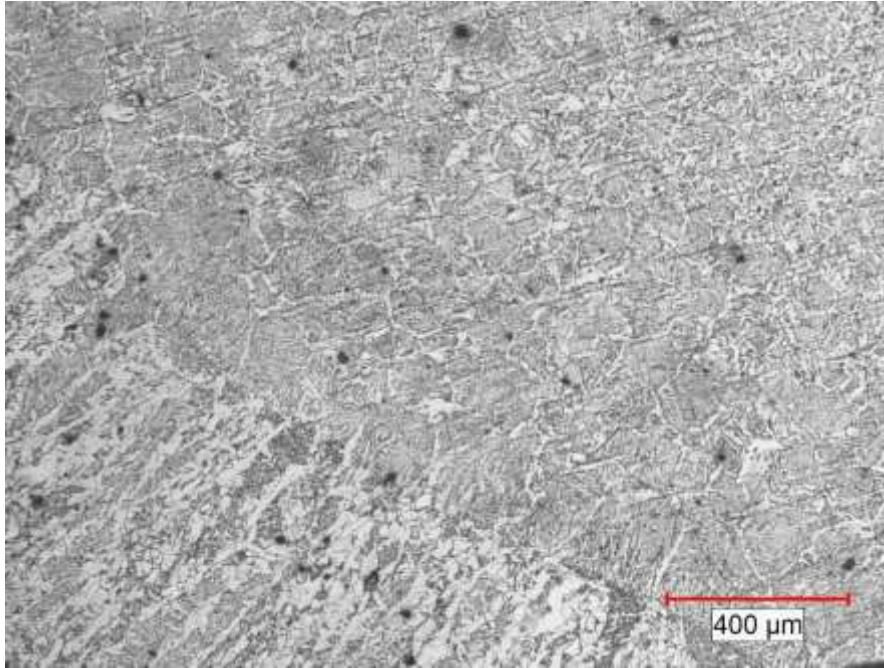
Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin mikro yapısal incelemesi, orta soğutma hızı ($4.02 - 4.91 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$) ve nispeten yüksek ısı girdisi ($2.16-2.64 \text{ kJ/mm}$) nedeniyle hem kaynak metalinde hem de ısıdan etkilenen bölgede belirgin dönüşümler olduğunu ortaya koymaktadır. Kaynak metalı bölgesi (Şekil 5.23 ve Şekil 5.24), %5 Nital aşındırma işleminden sonra optik mikroskop altında gözlemlenmiş olup, ağırlıklı olarak Widmanstätten ferrit, asiküler ferrit ve tane sınırı ferritinin lokalize alanlarının bir karışımını içermektedir. Widmanstätten ferritinin paralel ve tüy benzeri desenleri, yüksek soğutma hızlarında östenitin katı hal dönüşümünü gösterirken, asiküler ferrit, tokluğu ve mukavemeti artıran ince birbirine kenetlenmiş iğneler olarak sunulur. Bu kaynak bölgesi, ana malzemeden önemli ölçüde daha yüksek olan ortalama $196,6 \text{ HV}_{10}$ sertlik ve 486 MPa çekme mukavemeti sergilemiştir. Bununla birlikte, kaynak metalinin Charpy darbe tokluğu $31,60 \text{ J}$ olarak ölçülmüştür, bu da ince mikro yapıya rağmen, yönlü Widmanstätten yapılarının ve olası inklüzyonların veya segregasyon bölgelerinin varlığının çentik tokluğunun azalmasına katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 5.23. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak bölgesi (Kapak)



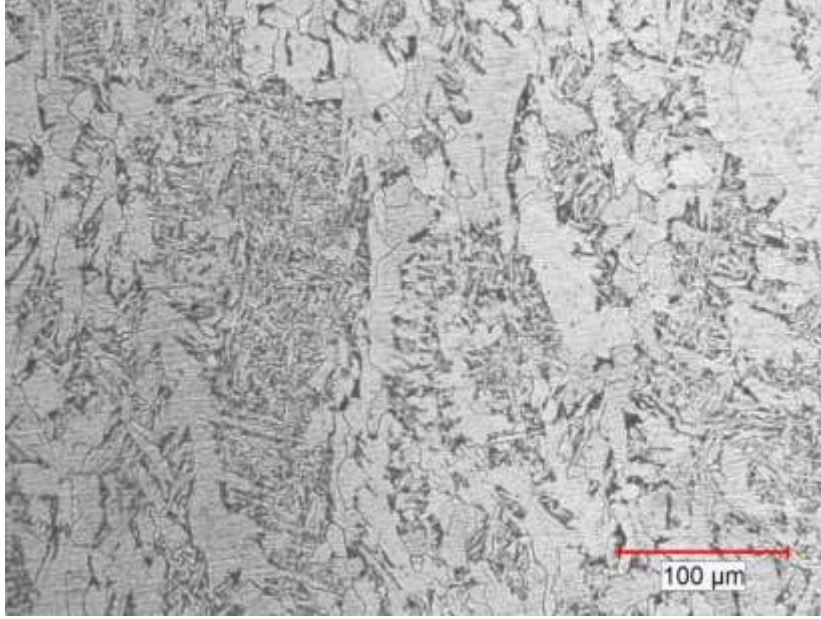
Şekil 5.24. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak bölgesi (Kök)



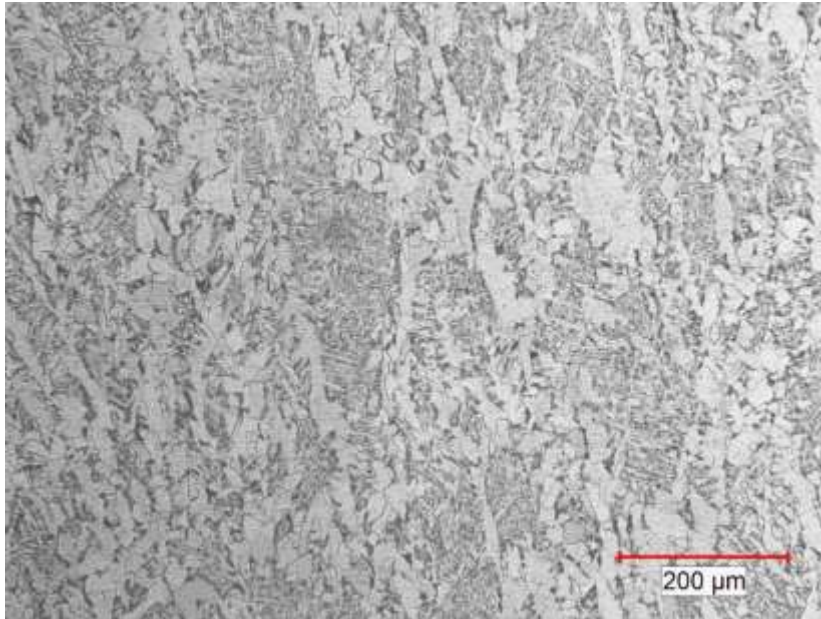
Şekil 5.25. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölge (Gövde)

ITAB (Şekil 5.26 ve 5.27), karışık poligonal ferrit, Widmanstätten ferrit ve tek tük beynitik bölgelerle karakterize edilen kısmi tane irileşmesi ve dönüşümünün kanıtlarını göstermektedir. Aşındırma kontrastı ve füzyon hattı yakınındaki kaba ferrit çıtalrı, östenitleşme sıcaklığına yakın termal maruziyeti ve ardından orta derecede soğutmayı

yansıtmaktadır. Bu bölge ana metalden daha yüksek olan 174,3 HV10 sertliğe sahiptir, ancak Charpy tokluğu 20 J'de önemli ölçüde daha düşüktür, bu da muhtemelen daha iri tane yapılarından veya sürekli ferrit ağlarının oluşumundan kaynaklanan gevrekleşmeye işaret eder. ITAB'daki bu tür gevrekleşme, servis yükleri altında çatlak direncini tehlikeye atabileceğinden, basınçlı kap çelikleri için kritik bir sorundur.



Şekil 5.26. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kapak)



Şekil 5.27. Tozaltı Ark Kaynağı (SAW) işlemi ile kaynaklanmış P355GH çeliğinin ısı tesiri altındaki bölge (Kök)

5.4.6. Tane boyutu analizi

Tane boyutu, EN 10028-2 gibi standartlar tarafından yönetilen P355GH gibi basınçlı kap çeliklerinde kritik bir mikroyapısal parametredir. P355GH, yüksek sıcaklıklarda çalışan kazanların ve basınçlı kapların imalatında yaygın olarak kullanılan alaşımsız ferritik bir çeliktir. Mikro yapısı tipik olarak ferrit-pearlit matrisinden oluşur ve burada ferritin tane boyutu mekanik performansı önemli ölçüde etkiler. Daha ince tane boyutları, iç basınç ve termal döngüye maruz kalan bileşenler için gerekli olan akma dayanımını, tokluğu ve kırılma kırılmaya karşı direnci artırır. Tersine, iri taneler, özellikle kaynaklı bağlantıların ısıdan etkilenen bölgelerinde (HAZ) darbe tokluğunun azalmasına yol açarak çatlak başlangıcı ve yayılmasına duyarlılığı artırabilir.

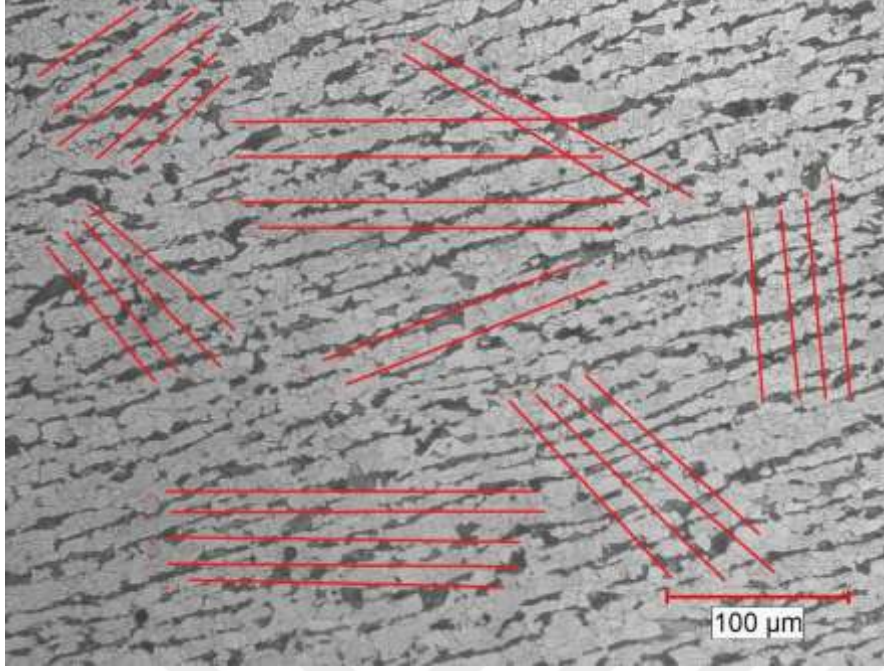
P355GH çeliğindeki tane boyutu genellikle ASTM E112'ye uygun olarak ölçülür; bu, çizgisel kesişme yöntemi de dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar kullanılarak ortalama tane boyutunun belirlenmesine yönelik standart bir test yöntemidir. Bu doğrusal yöntemde, bir dizi test çizgisi mikrograf üzerine bindirilir (tipik olarak 100× büyütme altında) ve birim uzunluk başına tane sınırı kesişme sayısı sayılır. Ortalama çizgisel kesişme uzunluğu ($\bar{l}$) hesaplanır ve formül kullanılarak ASTM tane boyutu sayısı (G) elde edilir:

$$\bar{l} = \frac{L_T}{P \times M} \quad (5.3)$$

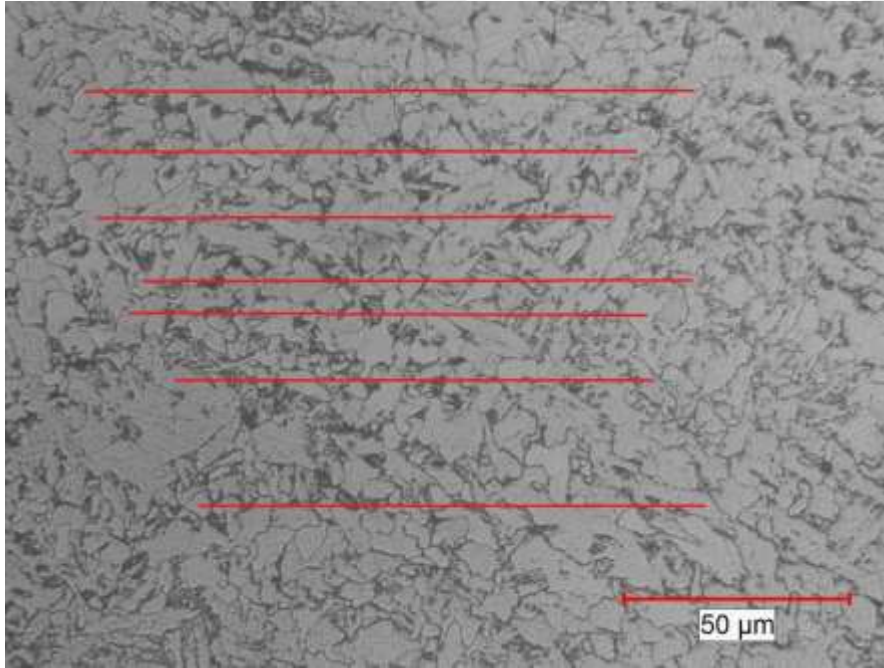
$$G = -6,6457 \log \bar{l} - 3,298 \quad (5.4)$$

Burada $\bar{l}$ ortalama çizgi uzunluğu (μm), L_T : Toplam çizgi uzunluğu (μm), P: Kesişen tane sınırı sayısı ve M: Büyütme.

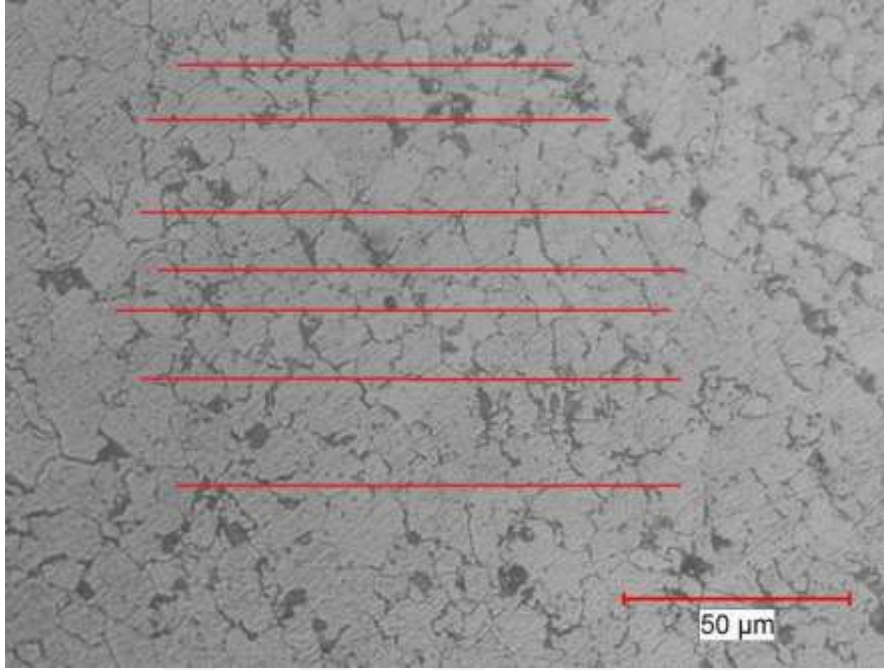
Bu yöntem, tane inceliğini ölçmek için istatistiksel olarak güvenilir ve tekrarlanabilir bir yol sağlar. Basınçlı kap uygulamaları için, P355GH çelikleri tipik olarak yaklaşık 32 ila 8 mikrometre aralığında tane çaplarına karşılık gelen 5 ila 9 arasında ASTM tane boyutu sayıları sergiler. Bu nedenle, kontrollü termomekanik işleme veya normalizasyon yoluyla ince ve düzgün tane yapısının korunması, basınçlı kap hizmetinde hem mekanik özellik gereksinimlerini hem de güvenlik standartlarını karşılamak için gereklidir.



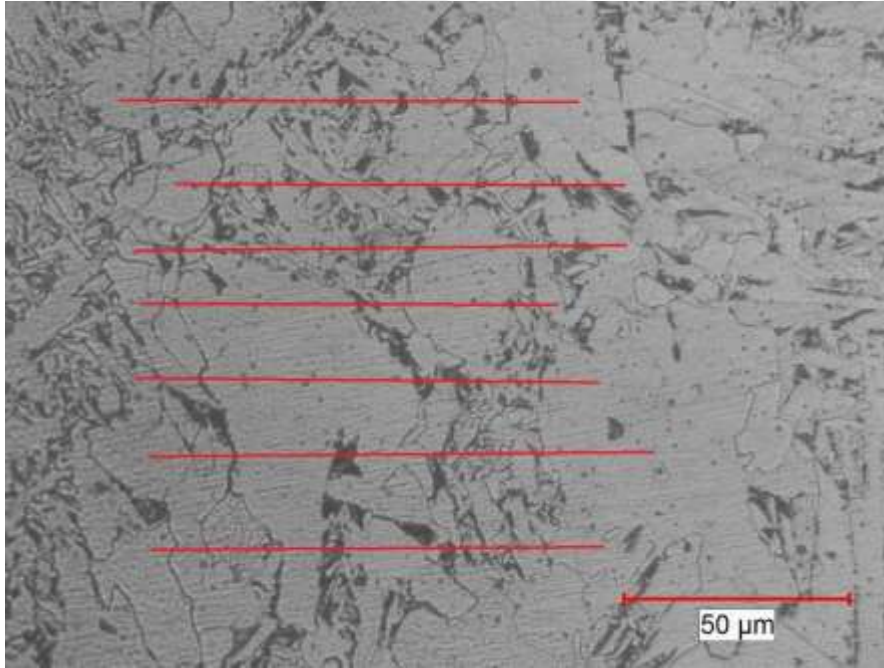
Şekil 5.28. P355GH ana malzemesi için tane boyutu hesaplaması



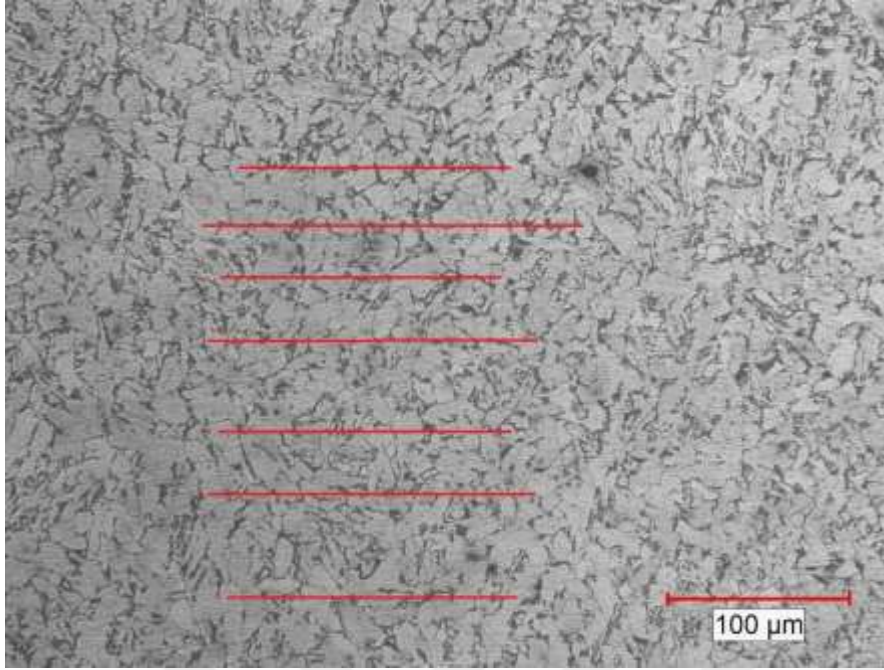
Şekil 5.29. TIG ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması



Şekil 5.30. Örtülü elektrot ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması



Şekil 5.31. Gaz altı ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması



Şekil 5.32. Toz altı ile kaynatılan P355GH çeliğinin ITAB bölgesi için tane boyutu hesaplaması

Çizelge 5.13. ITAB Tane boyutu ile Isı girdisi karşılaştırılması

	P355GH	TIG	Örtülü Elektrot	Gaz Altı	Toz Altı
Isı girdisi (KJ/mm)	-	2,52-2,58	2,22-3,2	1,03-1,26	2,16-2,64
ITAB tane boyutu (µm)	4,7	9,72	12,96	5,84	24,6
ITAB charpy darbe tokluğu (J)	-	33,3 ± 1,57	102,58 ± 26,24	90,3 ± 0,57	20 ± 0,00
Çekme dayanımı (MPa)	min 355	482 ± 1,00	492 ± 9,60	549 ± 6,24	486 ± 7,21
% Uzama		27,6 ± 2,08	23,7 ± 0,57	18,7 ± 0,57	23 ± 2,00
Sertlik (HV10)	163 ¹	166,5 ² 181,3 ³	183,8 ² 191,6 ³	203,3 ² 201,7 ³	174,3 ² 204,5 ³

¹ Ana malzeme ortalama sertlik değeri

² Isı tesiri altındaki bölge

³ Kaynak metali

P355GH çeliğinin farklı kaynak yöntemleri altında incelenen mikro yapı verilerine göre, ısı girdisi ile ITAB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) tane boyutu arasında doğrudan bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir. Temel olarak, kaynak işlemi sırasında uygulanan ısı girdisi arttıkça, ITAB bölgesindeki ferrit ve perlit tanelerinin büyüme eğilimi artmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda tanelerin yeniden kristalleşme ve büyüme fırsatı bulmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, Toz Altı Kaynağı (SAW) yöntemi 2,16–2,64 kJ/mm

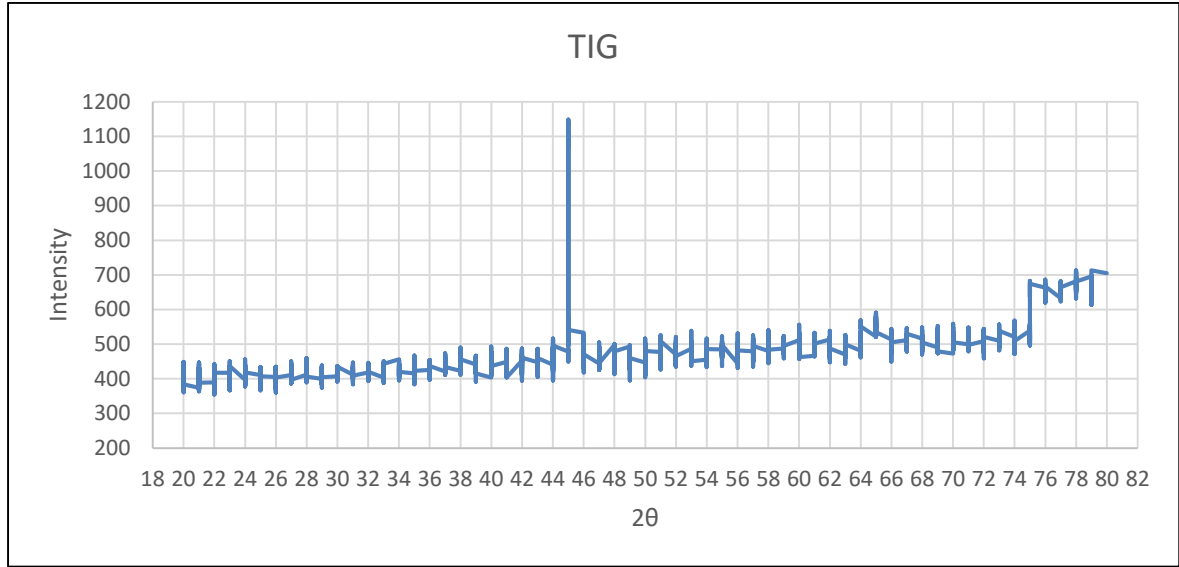
aralığında yüksek bir ısı girdisine sahiptir ve buna karşılık gelen ITAB tane boyutu 24,6 μm ile en büyük değeri göstermektedir. Benzer şekilde, TIG ve Örtülü Elektrot kaynak yöntemlerinde de ısı girdisi orta-yüksek seviyededir (sırasıyla 2,52–2,58 ve 2,22–3,2 kJ/mm) ve ITAB’da belirgin tane büyümleri (9,72 μm ve 12,96 μm) gözlemlenmiştir. Buna karşın Gaz Altı Kaynağı (GMAW) yöntemi düşük ısı girdisiyle (1,03–1,26 kJ/mm) çalışmakta olup, ITAB’da sadece 5,84 μm ortalama tane boyutuna ulaşmıştır. Bu, ince taneli yapının korunmasını sağlayarak, kaynak bölgesinin darbe tokluğu ve çatlak direnci gibi mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Genel olarak, ITAB’da oluşan tane büyümesi, malzemenin kaynak sonrası kırılabilirliğini artırabilir ve bu bölgeyi yapının en zayıf noktası haline getirebilir. Bu nedenle, özellikle basınçlı kap çelikleri gibi güvenliğin kritik olduğu uygulamalarda, uygun kaynak yöntemi ve optimum ısı girdisi seçimi büyük önem taşımaktadır.

5.4.7. XRD Analizi

X-ışını kırınımı (XRD - X-Ray Diffraction), kristal yapı malzemelerdeki atomik düzlemlerin düzenini ve yapısal özelliklerini incelemek için kullanılan önemli bir analiz yöntemidir. XRD analizi sayesinde, bir malzemenin hangi fazlardan oluştuğu, kristal yapısı, kafes parametreleri, kristallit boyutu ve kalıntı gerilmeler gibi önemli yapısal bilgiler elde edilebilir. Kaynak işlemleri sonrası mikro yapıda oluşabilecek yeni fazlar veya doku (texture) değişimleri bu yöntemle kolayca tespit edilebilir. Bu nedenle, özellikle basınçlı kap çeliklerinde olduğu gibi kritik mühendislik uygulamalarında XRD analizi büyük önem taşır.

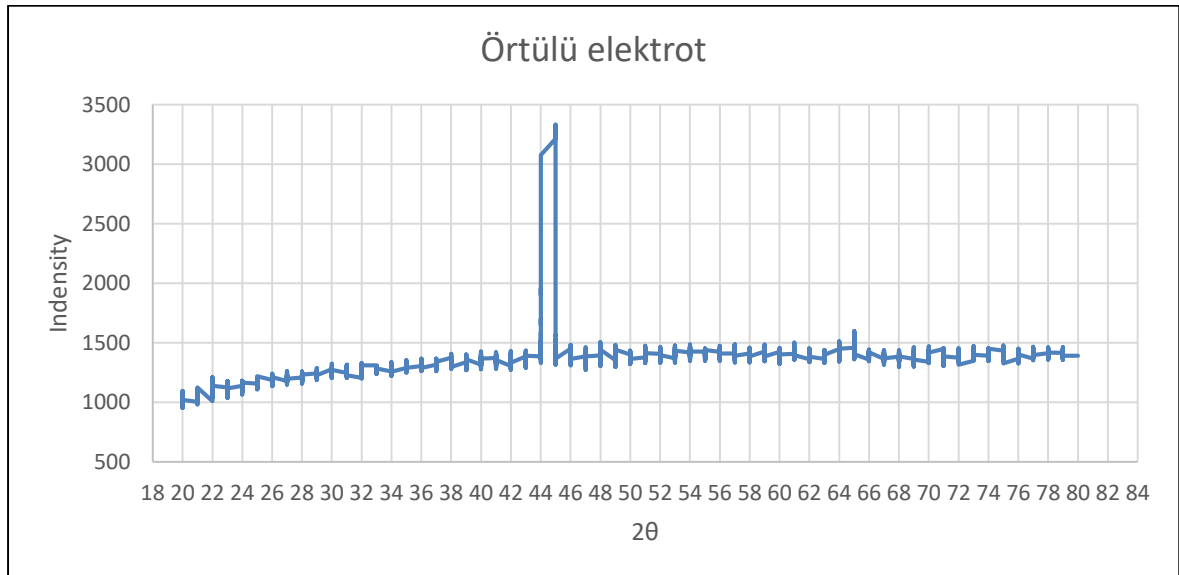
Bu çalışmada, P355GH çeliğine uygulanan dört farklı kaynak yöntemine (TIG, Örtülü Elektrot, Gaz Altı- GMAW ve Toz Altı- SAW) ait XRD desenleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tüm grafiklerde yatay eksen 2θ (derece), dikey eksen ise şiddet (intensity) olup, fazların kristal düzlemleri üzerinden kırınım yapıları elde edilmiştir.

Çizelge 5.14’de elde edilen desen, düşük şiddette ancak keskin bir pik göstermektedir. Bu durum, düşük ısı girdisinin neden olduğu mikro yapısal homojenlik ve düşük doku etkisiyle ilişkilendirilebilir. Pik yüksekliği nispeten düşük olsa da temel ferrit fazına karşılık gelen (110) düzlemi etrafında belirgin bir kırınım gözlemlenmiştir.



Çizelge 5.33. TIG XRD tarama sonucu

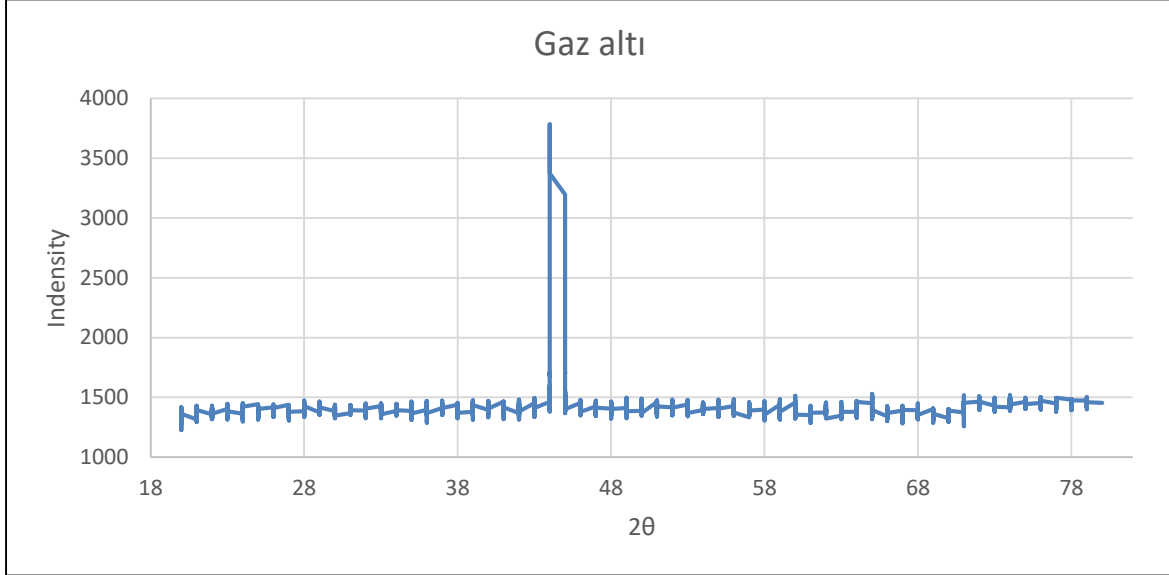
Çizelge 5.15’de XRD piki yaklaşık 47° 2θ açısında maksimum yoğunlukla ortaya çıkmıştır. Pik şiddeti oldukça yüksektir, bu da kristal yapının belirgin ve homojen olduğunu gösterir. Bu durum, gaz altı kaynağının düşük ısı girdisi ile hızlı soğuma sağlaması ve kristal yapının daha düzenli kalmasına olanak tanınmasıyla açıklanabilir.



Çizelge 5.34. Örtülü elektrot XRD tarama sonucu

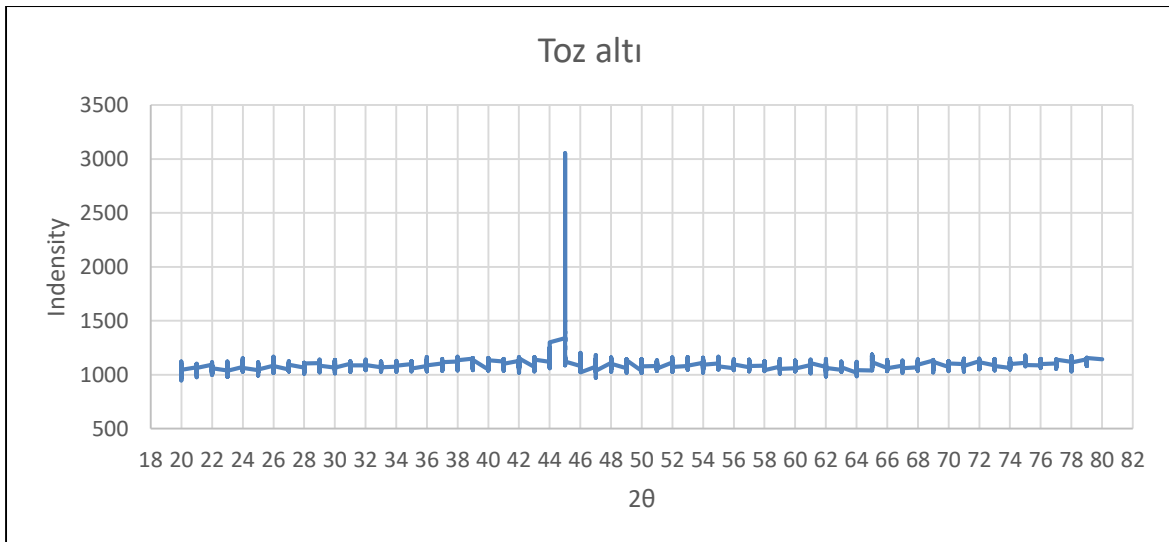
Çizelge 5.16’de gözlemlenen XRD deseninde ana faz pikinin şiddeti yüksek, ancak taban çizgisi belirgin şekilde genişlemiştir. Bu, yapının bazı bölgelerinde iç gerilmeler veya kristal bozulmaları olabileceğini ve kaynak sırasındaki termal dalgalanmalardan kaynaklı

küçük miktarda faz ayrışması veya tane yönelmesi (texture) oluşabileceğini göstermektedir.



Çizelge 5.35. Gaz altı XRD tarama sonucu

Çizelge 5.17’de XRD deseninde de yaklaşık olarak 45–47° 2θ civarında ana ferrit piki yoğun şekilde görülmektedir. Ancak örtülü elektrot ve gaz altı kaynaklarına göre pik genişliği daha düşüktür. Bu durum, SAW yönteminde yüksek ısı girdisi nedeniyle tanelerin büyümesi ve daha düzenli yönelme ile kristal yapının baskın bir düzlem üzerinde geliştiğini işaret edebilir



Çizelge 5.36. Toz altı XRD tarama sonucu



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, kaynağın basınçlı kap uygulamalarında yaygın olarak kullanılan P355GH çeliğinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini anlamaktır. Kaynak, basınçlı ekipman imalatında kritik bir süreçtir ve yanlış kontrol, güvenlik, güç ve dayanıklılığı tehlikeye atan kusurlara yol açabilir. Kaynak metalini, ITAB ve ana metali karakterize ederek, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşulları altında kaynak kalitesini ve yapısal bütünlüğün sağlanması hedeflenmektedir.

Bu kapsamda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Örtülü elektrot kaynaklı P355GH çeliğinin kaynak metalinde tokluğu ve çatlama direncini artıran uygun bir asiküler ferrit bakımından zengin mikro yapı sergilemesi, ITAB'ın ise uygun şekilde kontrol edilmezse tokluğu azaltabilecek tane irileşmesi göstermesidir. Bu durum, kaynak parametrelerinin ve dolgu maddesi seçiminin kaynağın performans açısından kritik bölgeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- ITAB'da tane büyümesi ve kaynak metalinde asiküler ferrit oluşumu gibi mikro yapısal dönüşümlere yol açan örtülü elektrot işleminin getirdiği termal döngüler. P355GH'nin ve seçilen dolgu metalinin kimyasal bileşimi, belirli fazların çekirdeklenmesini ve büyümesini etkilemiştir. Aşırı perlit veya beynit oluşumunu önleyecek kadar hızlı olan ve kaynak bölgesinde asiküler ferrit gibi daha ince yapıları teşvik eden kaynak sonrası soğutma hızları.
- Bu çalışmada, P355GH basınçlı kap çeliğinin farklı kaynak yöntemleri (TIG, Örtülü Elektrot, Gaz Altı ve Toz Altı) altında ITAB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) mikroyapı değişimleri ve mekanik davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, ısı girdisi, ITAB tane boyutu ve darbe tokluğu arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.
- En düşük ısı girdisine sahip olan Gaz Altı Kaynağı (1,03–1,26 kJ/mm) yöntemi, en küçük ITAB tane boyutu (5,84 μm) ile birlikte en ITAB'da yüksek darbe tokluğu (ortalama 115.37 J) değerine ulaşmıştır. Bu durum, düşük ısı girdisinin daha hızlı soğuma sağlayarak ince taneli bir yapının oluşumunu desteklediğini ve böylece darbe dayanımını artırdığını göstermektedir. Öte yandan, Toz Altı Kaynağı yöntemi görece

yüksek ısı girdisi (2,16–2,64 kJ/mm) nedeniyle en büyük ITAB tane boyutunu (24,6 μm) oluşturmuş ve buna bağlı olarak ITAB'da en düşük darbe tokluğu (ortalama 23.88 J) değerine sahip olmuştur.

- TIG ve Örtülü Elektrot yöntemlerinde ise ITAB tane boyutları sırasıyla 9,72 μm ve 12,96 μm olarak ölçülmüş; darbe toklukları ise sırasıyla ortalama 32.15 J ve 34.59 J olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, darbe tokluğunun yalnızca tane büyüklüğüne değil, aynı zamanda kaynak prosesiyle oluşan mikro yapının homojenliğine ve kalıntı gerilmelere bağlı olduğunu göstermektedir.
- Isı girdisinin artması ITAB bölgesinde tane büyümesine neden olmakta, bu da malzemenin tokluk özelliğini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, kaynaklı imalatlarda, özellikle basınçlı kap gibi emniyetin kritik olduğu uygulamalarda, ısı girdisinin kontrolü ve uygun kaynak yönteminin seçimi büyük önem taşımaktadır.
- Tüm kaynak yöntemleri sonrası P355GH çeliğinde baskın fazın α -demir (ferrit) olduğu doğrulanmıştır. Ancak piklerin yoğunluğu, genişliği ve netliği, farklı kaynak yöntemlerinin kristal yapıya olan etkilerini açıkça yansıtmaktadır. Düşük ısı girdisiyle çalışan TIG ve GMAW yöntemleri, daha homojen ve düşük gerilme içeren yapılar üretmiş, yüksek ısı girdisiyle çalışan SAW ve MMA yöntemleri ise daha fazla doku yönlenmesi ve iç gerilme göstergeleri sergilemiştir. Bu bağlamda, XRD analizi, kaynak sonrası faz analizinin yanı sıra, mikro yapı homojenliği ve gerilme durumunun izlenmesinde de etkili bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın yenilikçi tarafı, gerçek kaynak mikro yapılarının (metalografi altında gözlemlenen) mekanik performans bölgeleri ile ilişkilendirilmesi, özellikle kaynak metalindeki asiküler ferrit oluşumunun darbe direncini nasıl artırdığını ve termal girdi kontrolünün ITAB'daki tane irileşmesini nasıl yönetebileceğini göstermesidir.

KAYNAKLAR

1. Oak Ridge National Laboratory. (24-28 Mayıs 2025). *Characterization of the U.S. industrial/commercial boiler population*. Energy and Environmental Analysis. Arlington, Virginia.
2. Teir, S. (2003). *Steam boiler technology: The basics of steam generation* (2nd Ed.). Helsinki University of Technology.
3. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268–289.
4. Ganapathy, V. (2015). *Steam generators and waste heat boilers for process and plant engineers* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press, Taylor Francis Group.
5. Turner, W. C. (2009). *Energy Management Handbook* (7th ed.). London: Taylor & Francis Ltd.
6. Evans, G.M. (1980). Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld-metal deposits. *Welding Journal*, 59(3), 67–75.
7. American Welding Society. (1980). *Welding handbook*, vol. 3 (7th ed.). Miami, FL: American Welding Society, 170–238.
8. Mendez, P. F., Eagar, T. W. (2001). Welding processes for aeronautics. *Advanced Materials and Processes*, 159, 39–43.
9. American Welding Society. (1976). *Welding handbook*, vol. 1 (7th ed.). Miami, FL: American Welding Society, 2–32.
10. American Welding Society. (1998). Welding Workbook, – Data Sheet 212a. American Welding Society. *Welding Journal*, 65.
11. American Welding Society. (1978). *Welding handbook*, vol. 2 (7th ed.). Miami, FL: American Welding Society, 78–112; 296–330.
12. Lyttle, K.A. (1993). In *ASM Handbook*, Vol. 6. (5th ed.). Materials Park, OH: ASM International, 64.
13. Schwartz, M. M. (1979). *Metals joining manual*. (4th ed.). New York: McGraw-Hill, 2,(1).3–40.
14. Lesnewich, A. (1978). In *weldability of steels* (3rd ed.), ed. by R. D. Stout W. D. Doty. New York: Welding Research Council, 5.
15. Gibbs, F. E. (1980). Ceramic backing for all-position GMA welding 5083 aluminum-alloy. *Welding Journal*, 59(12), 23–30.

16. American Welding Society. (2000). Fact sheet—Choosing shielding for GMA welding. *Welding Journal*, 79, 18.
17. Jones, L.A., Eagar, T.W., Lang, J.H. (1998). Images of a steel electrode in Ar-2% O₂ shielding during constant current gas metal arc welding. *Welding Journal*, 77, 135–141.
18. Blackman, S. Dorling, D.V. (2000). Technology advancements push pipeline welding productivity. *Welding Journal*, 79(8), 39–44.
19. Cary, H.B. (1979). *Modern welding technology*. (2th ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 143.
20. Arata, Y. (1984). Development of ultra high energy density heat sources and their application to heat processing. *Transactions*, 13(1), 121–145.
21. Farrell, W.J. (1962). The Use of Electron Beam to Fabricate Structural Members, Creative Manufacturing Seminars, *ASTME Paper SP*, 63-208.
22. Blakeley, P.J., Sanderson, A. (1984). The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding. *Welding Journal*, 63(1), 42–49.
23. Bliedtner, J., Heyse, T., Jahn, D., Michel, G., Müller, H., Wolff, D. (2001). Advances in diode lasers increase weld penetration. *Welding Journal*, 80(6), 47–51.
24. Xie, J., Kar, A. (1999). Laser welding of thin sheet steel with surface oxidation. *Welding Journal*, 78(10), 343–348.
25. Mazumder, J. (1993). In *ASM handbook*, vol. 6. (1th ed.). Materials Park, OH: ASM International, 874.
26. Rockstroh, T.J., Mazumder, J. (1987). Spectroscopic studies of plasma during cw laser materials interaction. *Journal of Applied Physics*, 61(3), 917–923.
27. Seaman, F. (1977). A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(10), 1039-1051.
28. Hyatt, C.V., Magee, K. H., Porter, J. F., Merchant, V. E., Matthews, J. R. (2001). Laser-assisted gas metal arc welding of 25-mm-thick HY-80 plate. *Welding Journal*, 80(7), 163–172.
29. Albright, C.E., Eastman, J., Lempert, W. (2001). Low-power lasers assist arc welding. *Welding Journal*, 80(4), 55–58.
30. Ushio, M., Matsuda, F., Sadek, A. A. (1993). *International Trends in Welding Science and Technology*. (3th Ed), Materials Park, OH: ASM International, 408.
31. Port, R.D. (1990). *Materials for pressure vessel and piping systems*. (4th Ed), Materials Park, OH: ASM International.

32. Güzey, B.N., İrsel, G. (2023). Investigation of mechanical and microstructural properties in joining dissimilar P355GH and stainless 316L steels by TIG welding process. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 205, 104965.
33. Parzych, S., Dziurka, R. (2018). *Influence of post weld heat treatment for weld joint of P355GH*. MATEC Web of Conferences, Poland, 247.
34. European Committee for Standardization (CEN). (2017). *EN 10028-2:2017 – Flat products made of steels for pressure purposes – Part 2: Non-alloy and alloy steels with specified elevated temperature properties*. Brussels: CEN.
35. European Committee for Standardization (CEN). (2006). *EN 10021:2006 – General rules for the designation of steels*. Brussels: CEN.
36. Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. (10th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
37. Kou, S. (2003). *Welding metallurgy*. (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
38. Buchanan, R.M., Sherrington, J.R. (2002). *Welding of pressure vessel steels*. In Proceedings of the 9th International Conference on Pressure Vessel and Piping Technology. New York: ASME.
39. Müller, H., Neubauer, G. (2016). Weldability of P355GH steel and its mechanical properties post-welding. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(5), 505–512.
40. Cao, Y., Li, Z., Lu, Y. (2014). Effect of welding parameters on the mechanical properties and microstructure of P355GH steel joints by GMAW. *Materials Science and Engineering: A*, 619, 174–182.
41. Jain, P., Ghosh, S. (2012). Effect of heat-affected zone on the mechanical properties of pressure vessel steels. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 134(4), 041302.
42. Kobayashi, T., Saito, T. (2001). The influence of post-weld heat treatment on the properties of welded joints of pressure vessel steels. *Materials Science and Engineering: A*, 315, 57–64.
43. Oates, W.A., Kessler, M.M. (2006). Characterization of welded joints in P355GH pressure vessel steel. *Welding Journal*, 85(3), 51–58.
44. European Committee for Standardization (CEN). (2009). *EN 1011-1:2009 – Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 1: General guidance for arc welding*. Brussels: CEN.
45. International Organization for Standardization (ISO). (2017). *ISO 15614-1:2017 – Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 1: Arc and gas welding of steels and nickel and nickel alloys*. Geneva: ISO.

46. Parzych, S., Dziurka, R. (2018). *Influence of post weld heat treatment for weld joint. of P355GH*. MATEC Web of Conferences, 247, 00038.
47. International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 5817:2014 – Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium, and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections*. Geneva: ISO.
48. Bjelić, M., Kovanda, K., Kolařík, L., Kolaříková, M., Vukićević, M., Radičević, B. (2017). *Numerical simulation of hardness distribution at the HAZ of P355GH steel*. IX International Conference “Heavy Machinery – HM 2017”, B7-B12.
49. ASTM International. (2013). *ASTM E112 – Standard test methods for determining average grain size*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
50. Voestalpine Böhler Welding. (2025). *Filler material catalogue*. Böhler Welding. Düsseldorf, 52-65.
51. Smith, J., Brown, A. (2015). *Welding metallurgy: heat transfer and cooling rate calculations*, (2nd ed). Cham: Springer
52. European Committee for Standardization (CEN). (2011). *EN ISO 9015-1:2011 – Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing — Part 1: Hardness test on arc welded joints*. Brussels: CEN.
53. International Organization for Standardization (ISO). (2012). *EN ISO 9016:2012 – Destructive tests on welds in metallic materials – Impact tests – Test specimen location, notch orientation and examination*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
54. International Organization for Standardization (ISO). (2022). *EN ISO 4136:2022 – Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
55. European Committee for Standardization (CEN). (2004). *EN 10025 – Hot rolled products of structural steels*. Brussels: CEN.
56. International Organization for Standardization (ISO). (2004). *EN ISO 15609-1:2004 – Specification and qualification of welding procedures – Welding procedure specification – Part 1: Arc welding*. Geneva: ISO.
57. Lippold, J.C. (2014). *Welding metallurgy and weldability*. (3th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
58. Senthilkumar, G., Ramakrishnan, R. (2021). Design of optimal parameter for solid-state welding of EN 10028-P355GH steel using gray incidence reinforced response surface methodology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(3), 2613–2628.

59. Bjelić, M., Kovanda, K., Kolařík, L., Kolaříková, M., Vukićević, M., Radičević, B. (2017). *Numerical simulation of hardness distribution at HAZ of P355GH steel*. Conference Proceedings, University of Kragujevac, B.7–B.12.
60. Rasinac, M., Bjelic, M., Miodragovic, M., Peric, J. (2022). *Analytical modeling of hardness in the heat affected zone during welding plates made of steel P355GH by GMAW*. Proceedings of the Conference, Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts. Belgrade, 214-222.
61. Internet: Grill, J. (2024). MIG vs Stick Welding – The Main Differences. Basic for MIG Welding. URL: <https://weldguru.com/mig-vs-stick-welding/> Son Erişim tarihi: 20.01.2025.
62. Internet: China Maching. (n.d.). Discover the secrets of Argon Arc Welding. URL: <https://china-maching.com/discover-the-secrets-of-argon-arc-welding/> Son Erişim Tarihi: 06.02.2025.
63. Internet: Soldagem MIG/MAG – Características e aplicações. URL: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>, Son Erişim Tarihi: 02.06.2025.
64. Kaya, Y., Kahraman, N. (2013). An investigation into the explosive welding/cladding of Grade A ship steel/AISI 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 52, 367–372.





Gazili olmak ayrıcalıktır