

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SA 387 GRADE 91 MALZEMENİN ÇOK PASOLU
ALIN KAYNAĞINDA FARKLI ÖN ISI
SICAKLIKLARININ KALINTI GERİLMELERE
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Cihan ÇELİK

**Mayıs, 2023
İZMİR**

**SA 387 GRADE 91 MALZEMENİN ÇOK PASOLU
ALIN KAYNAĞINDA FARKLI ÖN ISI
SICAKLIKLARININ KALINTI GERİLMELERE
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Cihan ÇELİK

Mayıs, 2023

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Cihan ÇELİK tarafından **Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN** yönetiminde hazırlanan “**SA 387 GRADE 91 MALZEMENİN ÇOK PASOLU ALIN KAYNAĞINDA FARKLI ÖN ISI SICAKLIKLARININ KALINTI GERİLMELERE VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ.**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN

Danışman

Prof. Dr. Osman ÇULHA

Doç. Dr. Necmiye Funda AK AZEM

(Juri Üyesi)

(Juri Üyesi)

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Başta çok kıymetli eşim Merve Yoldaş ÇELİK ve oğlum Muhammed Kerem Alp ÇELİK'e bu süreçte yaptıkları fedakarlıklardan dolayı, yol gösterici olarak benden desteğini esirgemeyen tez danışman hocam Dr. Bahadır UYULGAN'a ve kendilerinden ders aldığım çok kıymetli hocalarıma, desteklerinden dolayı Can AKYÜZ, Ulaş EVCI, Emre ŞANLI ve Özgür KÖKSAL'a, tahribatsız test imkanlarından yararlanmamı sağlayan Alfaform Endüstriyel Denetim ve Belgelendirme kuruluşuna, tahribatlı test imkanlarından yararlanmamı sağlayan TüvNord Aliğa Tahribatlı Testler Laboratuvarına teşekkür ederim.

Cihan ÇELİK

SA 387 GRADE 91 MALZEMENİN ÇOK PASOLU ALIN KAYNAĞINDA FARKLI ÖN ISI SICAKLIKLARININ KALINTI GERİLMELERE VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZ

Bu tezin amacı nükleer santral, termik santral ve rafineri ekipmanlarında kullanılan, yüksek sıcaklıkta yüksek basınca dayanıklı ve bu şartlarda yüksek korozyon dayancına sahip ASTM SA 387 Grade 91 Tip 2 çelik plaka numunelerine farklı ön ısı sıcaklıkları uygulayarak, ark kaynağı yöntemi ile çok pasolu alın kaynağı yapılması ve ön ısı sıcaklığı farkının 9Cr-1Mo içerikli yüksek sıcaklık ve yüksek basınç çeliğinin kaynağında oluşturduğu kalıntı gerilmelerin mekanik özelliklere ve mikroyapı değişimlerine etkisinin incelenmesidir.

Süperkritik, ultra süper kritik termik santrallerin, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan buhar kazanlarının ve nükleer santrallerin kurulumunda modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliği yüksek sıcaklıkta yüksek basınca dayanıklı olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir malzeme olup bu malzemelerin kaynağı için binlerce saatlik ön ısı uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda modifiye edilmiş 9Cr-1Mo içeriğine sahip ASTM SA 387 Grade 91 Tip 2 çelik malzemesinin kaynağında optimum ön ısı sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmış olup, bu sayede daha iyi kaynak özellikleri elde edilmesi ve fazla ön ısı uygulamasının önüne geçilerek daha az enerji sarfiyatı ile maliyetlerin azaltılması, kaynak sürelerinin azaltılarak iş yapım hızının artırılması ve daha az ısıtma işlemi neticesinde daha az enerji sarfiyatı ile karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, 16mm kalınlığındaki ASTM SA 387 Grade 91 Tip 2 çelik plaka numunelerine 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı sıcaklıkları uygulanarak gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) yöntemi ile çok pasolu alın kaynakları yapılmıştır. Farklı ön ısı sıcaklıkları neticesinde meydana gelen farklı soğuma hızları ile oluşan kalıntı gerilmelerin, gerilim giderme ısıtma işlemi (PWHT) sonrasında giderilemeden kalan kısımlarının bıraktığı etki tahribatsız ve tahribatlı muayene yöntemleri ile incelenerek, kalıntı gerilmeler, mekanik özellikler ve mikro yapı arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler : Ön ısı, PWHT, kalıntı gerilme, GTAW, mekanik özellikler

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF VARIOUS
PREHEAT TEMPERATURES ON RESIDUAL STRESSES AND
MECHANICAL PROPERTIES IN MULTI-PASS BUTT WELDING OF SA
387 GRADE 91 MATERIAL**

ABSTRACT

The aim of this thesis is to perform multi-pass butt welding by arc welding method by applying different preheat temperatures to ASTM SA 387 Grade 91 Type 2 steel plate samples used in nuclear power plant, thermal power plant and refinery equipment, resistant to high pressure at high temperature and having high corrosion resistance under these conditions. and the effect of residual stresses created at the source of high temperature and high pressure steel with 9Cr-1Mo content on mechanical properties and microstructure changes.

Modified 9Cr-1Mo steel is a widely used material in the construction of supercritical, ultra-supercritical thermal power plants, steam boilers operating under high temperature with pressure and nuclear power plants due to its resistance to high pressure at high temperatures, and thousands of hours of pre-heat applications are carried out for the welding of these materials. In line with the results obtained, it was aimed to determine the optimum preheat temperature in the welding of ASTM SA 387 Grade 91 Type 2 steel material with modified 9Cr-1Mo content. It is aimed to reduce the carbon footprint by reducing the welding time, increasing the speed of work and reducing the carbon footprint with less energy consumption as a result of less heating processes.

In this study, multi-pass butt welds were made by gas tungsten arc welding (GTAW) method by applying 150°C, 200°C and 250°C preheat temperatures to 16mm thick ASTM SA 387 Grade 91 Type 2 steel plate samples. The effects of residual stresses, which are formed by different cooling rates as a result of different preheat temperatures, and the parts that remain unremoved after stress relieving heat treatment are examined by non-destructive and destructive testing methods, and the relationship between residual stresses, mechanical properties and microstructure is examined.

Keywords: Preheating, PWHT, residual stress, GTAW, Mechanical Properties

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	i
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
BÖLÜM İKİ - TEORİK İNCELEME	4
2.1 Ana Malzeme	4
2.1.1 Ana Malzemenin Karbon Eşdeğerliği (CE) ve Kaynaklanabilirliğinin Değerlendirilmesi.....	6
2.1.2 Ana Malzemenin Alaşım Elementleri Açısından Değerlendirilmesi	7
2.1.2.1 Fosfor ve Kükürt İçeriği.....	7
2.1.2.2 Krom İçeriği.....	8
2.1.2.3 Nikel ve Mangan İçeriği.....	8
2.1.2.4 Molibden İçeriği.....	9
2.1.2.5 Vanadyum ve Niyobyum İçeriği.....	9
2.1.3 SA387 91 Sınıfı Tip 2 Malzemenin Mekanik Özellikleri Açısından İncelenmesi	10
2.1.3.1 Çekme ve Akma Dayancı	10
2.1.3.2 Sertlik ve Sertleştirilebilirlik	12
2.1.3.3 Tokluk.....	14

2.1.3.4 Sürünme Dayancı.....	14
2.1.3.5 Darbe Dayancı Açısından Değerlendirilmesi.....	14
2.1.4 Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon Dayanımı.....	15
2.2 Kaynak İşleminde Faz Dönüşümleri	15
2.2.1 Martenzitik Dönüşüm	16
2.3 Kaynak Sarf Malzemeleri.....	18
2.3.1 Dolgu Teli	18
2.3.2 Koruma Gazı.....	19
2.4 Kaynak Uygulaması Hakkında Genel Bilgiler	20
2.4.1 Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemi (GTAW)	21
2.4.1.1 GTAW Kaynağının Gaz Altı Kaynağı ile Kıyaslanması.....	21
2.4.1.2 GTAW Kaynağının Elektrik Ark Kaynağı ile Kıyaslanması	22
2.4.1.3 GTAW Kaynağının Toz Altı Ark Kaynağı ile Kıyaslanması	22
2.4.2 Kaynak İşleminde Isı Girdisi	23
2.4.3 Isı Tesiri Altında Kalan Bölge.....	24
2.4.4 Kalıntı Gerilmeler	25
2.5 Ön Isı ve Gerilim Giderme Tavlaması	26
2.5.1 Kaynak Öncesi Ön Isı Uygulaması.....	26
2.5.2 Kaynak Sonrası Hidrojen Giderme Isıl İşlemi	27
2.5.3 Hidrojen Giderme Sonrası Soğuma	27
2.5.4 Kaynak Sonrası Gerilim Giderme Tavlaması (PWHT)	28
2.5.4.1 PWHT Isıtma Hızı	30
2.5.4.2 PWHT Soğutma Hızı.....	30
2.6 Tahribatsız Muayene	31
2.6.1 Görsel Muayene.....	31

2.6.1.1 Direkt Gözle Muayene	32
2.6.1.2 Endirekt (Uzaktan) Gözle Muayene	32
2.6.2. Sıvı Penetrant Testi	33
2.6.3 Radyografik Muayene	34
2.6.4 Faz Taramalı Ultrasonik Muayene (PAUT)	35
2.7 Tahribatlı Muayene	35
2.7.1 Makro Yapı İncelemesi	35
2.7.2 Vickers Mikro Sertlik Ölçümü	36
2.7.3 Mikroyapı İncelemesi	36
2.7.4 Üç Nokta Eğme Deneyi.....	36
2.7.5 Çekme Deneyi	37
BÖLÜM ÜÇ - UYGULAMA	39
3.1 Kaynak Öncesi Ön Hazırlık.....	39
3.1.1 Kaynak Ağızı Hazırlığı.....	39
3.1.2 Kaynak Ağızlarına Sıvı Penetrant Testi Uygulaması	40
3.2 Ön Isı ve Isıl İşlem Planı	41
3.2.1 Ön Isı Uygulaması.....	43
3.3.1 150°C Ön Isı Uygulaması	44
3.3.2 200°C Ön Isı Uygulaması	46
3.3.3 250°C Ön Isı Uygulaması	47
3.4 Kaynak Uygulaması	49
BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL ÇALIŞMA	51
4.1 Tahribatsız Muayene	51
4.1.1 Görsel Muayene.....	51
4.1.2 Sıvı Penetrant Testi	57
4.1.3 Rayografik Muayene.....	60

4.1.3.1 Rayografik Muayene Bulgularının Değerlendirilmesi.....	63
4.1.4 Faz Taramalı Ultrasonik Muayene (PAUT)	63
4.1.4.1 Hassasiyet Kalibrasyonu	64
4.1.4.2 Tarama Planı	64
4.1.4.3 PAUT Bulgularının Değerlendirilmesi	65
4.2 Tahribatlı Muayene	66
4.2.1 Makroyapı İncelemesi	66
4.2.2 Vickers Mikro Sertlik Ölçümü	69
4.2.3 Mikroyapı İncelemesi	75
4.2.4 Üç Nokta Eğme Deneyi.....	83
4.2.5 Çekme Testi	86
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLARIN YORUMLANMASI	95
KAYNAKLAR	98

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Tam sertleşme ve %C içeriği arasındaki ilişki.....	13
Şekil 2.2 %C içeriği ile kalıntı östenit arasındaki ilişki	16
Şekil 2.3 Martenzit biçimselliğinin %C içeriğine bağlı oluşumu.	17
Şekil 2.4 HAZ'ın alt bölgelerinin şeması ve X10CrMoVNb9-1 (P91 tipi) çeliğin hesaplanan denge faz diyagramı ile ilişkisi	24
Şekil 2.5 ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials standardında şekil 8'de belirtilen dairesel kesitli tasla çizim	37
Şekil 2.6 Kaynak bölgesinden çıkartılacak olan boyuna çekme çubuklarının kesit görüntüsü.	38
Şekil 3.1 Plakaların şerit testere kullanılarak soğuk kesim yapıldığı esnada çekilmiş fotoğraf	39
Şekil 3.2 Kaynak ağzılarının EUMEGA freze ile açılması işlemi sırasında çekilmiş fotoğraf	39
Şekil 3.3 Kaynak ağzı detayları	40
Şekil 3.4 Kaynak ağzı yüzeylerinin kaynak işlemi öncesinde sıvı penetrant testi ile kontrolü.....	40
Şekil 3.5 150C ön ısı uygulanan numune 1 için kaynak ısıtma işlem planı	41
Şekil 3.6 200C ön ısı uygulanan numune 2 için kaynak ısıtma işlem planı	42
Şekil 3.7 250C ön ısı uygulanan numune 3 için kaynak ısıtma işlem planı	42
Şekil 3.8 Kaynak öncesi ve sırasında ısıtma ve sıcaklık kontrolünün sağlanması için kurulan ısıtma işlem düzenekleri.....	43
Şekil 3.9 Ön ısı ve ısıtma işlem için kullanılan Weldom 82 Kv 12 kanallı ısıtma işlem makinası.....	43
Şekil 3.10 150°C ön ısı kontrollü kaynatılan plakanın ısıtma işlem cihazı grafiğinden temsili kesiti.....	44
Şekil 3.11 150°C ön ısı kontrollü kaynağa başlamadan önce malzeme sıcaklığının 150°C ısı tebeşiri ile kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf	44
Şekil 3.12 150°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında 150°C ısı tebeşiri ile malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf	45

Şekil 3.13 150°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında lazerli sıcaklık ölçerle malzeme sıcaklığının kontrolleri sırasında çekilmiş fotoğraf.....	45
Şekil 3.14 200°C ön ısı kontrollü kaynatılan plakanın ısı işlem cihazı grafiğinden temsili kesit.	46
Şekil 3.15 200°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında 200°C ısı tebeşiri ile malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf.....	46
Şekil 3.16 200°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında lazerli sıcaklık ölçerle malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf.....	47
Şekil 3.17 250°C ön ısı kontrollü kaynatılan plakanın ısı işlem cihazı grafiğinden temsili kesiti	47
Şekil 3.18 250°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında 250C ısı tebeşiri ile malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf.....	48
Şekil 3.19 250°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında lazerli sıcaklık ölçerle malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf.....	48
Şekil 3.20 Kök koruma gazı için U profilden yapılan kanal ve ısı işlem cihazının termokupol yerleşimi.....	49
Şekil 3.21 Kaynak makinası amper doğrulaması sırasında çekilmiş fotoğraf	50
Şekil 3.22 Kaynak makinası voltaj doğrulaması sırasında çekilmiş fotoğraflar	50
Şekil 3.23 Kaynak işlemi sırasında kullanılan dolgu tellerinin kutuları üzerindeki marka standart bilgilerini gösteren etiketleri	50
Şekil 4.1 150°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmından çekilen fotoğraf	52
Şekil 4.2 150°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmında 200-225mm aralığında 1mm kaynak düşüklüğü.....	52
Şekil 4.3 150°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmından çekilen fotoğraf	52
Şekil 4.4 200°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmından çekilen fotoğraf	53
Şekil 4.5 200°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmından çekilen fotoğraf	53
Şekil 4.6 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 16-21mm aralığında kökte ergime noksanlığı	53

Şekil 4.7 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 160-162mm aralığında tel kesiği	54
Şekil 4.8 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 413-419mm aralığında yan cidar ergime noksanlığı	54
Şekil 4.9 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmından çekilen fotoğraf.....	54
Şekil 4.10 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmında 359-361mm ve 365-367mm aralığında tel kesiği.....	55
Şekil 4.11 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmından çekilen fotoğraf.....	55
Şekil 4.12 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 5-65mm aralığında kökte sarkma	55
Şekil 4.13 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 66-70mm aralığında yan cidar ergime noksanlığı	56
Şekil 4.14 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin 190-340mm arası kök bölgesi	56
Şekil 4.15 150°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep bölgesinin sıvı penetrant testi	57
Şekil 4.16 150°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök bölgesinin sıvı penetrant testi	58
Şekil 4.17 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep bölgesinin sıvı penetrant testi	58
Şekil 4.18 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök bölgesinin sıvı penetrant testi	58
Şekil 4.19 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 16-21mm aralığında ergime noksanlığının sıvı penetrant testi neticesinde belirtisi	59
Şekil 4.20 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 413-419mm aralığında ergime noksanlığının sıvı penetrant testi neticesinde belirtisi	59
Şekil 4.21 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep bölgesinin sıvı penetrant testi	60

Şekil 4.22 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök bölgesinin sıvı penetrant testi	60
Şekil 4.23 Sırasıyla 150C, 200C ve 250C ön ısı uygulanarak kaynatılan test numunelerine ait radyograflar	61
Şekil 4.24 250°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin 0-5cm aralığının radyograf görüntüsü	62
Şekil 4.25 250°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin 20-30cm aralığının radyograf görüntüsü.....	62
Şekil 4.26 TCG çizerken alt ve üst yüzeyin 5mm altında merkezi olacak şekilde 3mm çaplı yandan açılmış deliklerden yararlanılmıştır.....	64
Şekil 4.27 Faz taramalı ultrasonik muayene öncesinde hazırlanan tarama planı.....	64
Şekil 4.28 200°C ön ısı uygulanan numunede 412-419mm arası kökte yan cidar ergime noksanlığının faz taramalı ultrasonik muayenede (PAUT) görüntüsü	66
Şekil 4.29 Makro yapı incelemesi öncesi parlatılmış numuneler	67
Şekil 4.30 150°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede enine kesitin makroyapı incelemesi	67
Şekil 4.31 200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede enine kesitin makroyapı incelemesi	68
Şekil 4.32 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede enine kesitin makroyapı incelemesi	68
Şekil 4.33 Mikro sertlik ölçümlerinde kullanılan Check-Way/Hv10 mikro sertlik ölçüm cihazı.....	69
Şekil 4.34 Mikro sertlik sertlik ölçümlerinin konumlarını gösteren kesit çizimi	70
Şekil 4.35 150°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan plakada enine kesit üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin izlerin görüldüğü fotoğraf	70
Şekil 4.36 200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan plakada enine kesit üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin izlerin görüldüğü fotoğraf	70
Şekil 4.37 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan plakada enine kesit üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin izlerin görüldüğü fotoğraf	71
Şekil 4.38 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden ölçülen sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi	73

Şekil 4.39 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden ölçülen sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi	73
Şekil 4.40 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden ölçülen sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi	74
Şekil 4.41 Metalografik incelemelerde kullanılan LEICA DM 2700M metalografi mikroskobu	75
Şekil 4.42 Parlatma işleminde kullanılan POLY-TOP-DUO 1micron elmas çözeltisi	76
Şekil 4.43 Zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan impro PROPOL zımparalama ve parlatma makinası	76
Şekil 4.44 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 10X büyütme altında	77
Şekil 4.45 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 20X büyütme altında	77
Şekil 4.46 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 10X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü	78
Şekil 4.47 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 20X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü	78
Şekil 4.48 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 10X büyütme altında	79
Şekil 4.49 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 20X büyütme altında	79
Şekil 4.50 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 10X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü	80
Şekil 4.51 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 20X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü	80
Şekil 4.52 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 10X büyütme altında	81
Şekil 4.53 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 20X büyütme altında	81

Şekil 4.54 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 10X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü (10 saniye Vilellas's Reagent çözeltisi ile dağlanmışır).....	82
Şekil 4.55 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 20X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü	82
Şekil 4.56 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi görüntüsü	83
Şekil 4.57 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi görüntüsü	84
Şekil 4.58 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi görüntüsü	84
Şekil 4.59 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi sonucundaki görüntü	85
Şekil 4.60 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi sonucundaki görüntü	85
Şekil 4.61 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi sonucundaki görüntü	86
Şekil 4.62 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakada çekme çubuğu çıkartılması amacıyla şerit testerede kesilmesi için çizilen çizgiler görülmektedir	87
Şekil 4.63 Kaynak bölgesinden ve ITAB'dan çıkartılan çekme çubuklarının konumu görülmektedir	87
Şekil 4.64 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakada çıkartılan çubukların konumları görülmektedir	88
Şekil 4.65 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakada çıkartılan çubukların konumları görülmektedir	88
Şekil 4.66 ITAB bölgesinden 16mmx16mm olarak kesilen çubukların bor yağlı freze tezgahında 13mmx13mm şekline getirilmesi	89
Şekil 4.67 Bor yağlı torna tezgahında hazırlanan çekme çubuğunun radüs verilmesi işlemi sırasından bir görüntü	89
Şekil 4.68 Hazırlanan çekme çubuğunun çekme test cihazı dairesel numune tutucu çenesi ile görüntüsü	90

Şekil 4.69 150°C ön ısı uygulanarak kaynatılan test plakalarından çıkartılan numunelerin çekme deney grafikleri.....	90
Şekil 4.70 200°C ön ısı uygulanarak kaynatılan test plakalarından çıkartılan numunelerin çekme deney grafikleri.....	91
Şekil 4.71 250°C ön ısı uygulanarak kaynatılan test plakalarından çıkartılan numunelerin çekme deney grafikleri.....	91
Şekil 4.72 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin ana malzeme çekme deney sonuçlarının kıyaslanması.....	92
Şekil 4.73 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin ITAB çekme deney sonuçlarının kıyaslanması	92
Şekil 4.74 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin kaynaktan boyuna yönde çekme deney sonuçlarının kıyaslanması	93
Şekil 4.75 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin kaynaktan enine yönde çekme deney sonuçlarının kıyaslanması	93

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1 Çelik üreticisi tarafından hazırlanan TS EN 10204 3.1 malzeme sertifikası üzerinde belirtilen döküm şarjından alınan numune üzerinden yapılmış olan kimyasal analiz sonuçları.....	4
Tablo 2. 2 Çelik üreticisi tarafından hazırlanan EN 10204 3.1 malzeme sertifikası üzerinde belirtilen nihai üründen alınan numune üzerinden yapılmış olan çekme testi sonuçları	4
Tablo 2. 3 Cr-Mo içeriğine göre yüksek sıcaklık çeliği sınıflandırması. (SA 387 Specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum).....	5
Tablo 2. 4 Çeliğin kaynaklanabilirliği ve ön ısı uygulaması için CE aralığı	7
Tablo 2. 5 ASTM SA 387 de grade 91 sınıfı malzemeler için maksimum fosfor ve kükürt içerikleri	8
Tablo 2. 6 ASME BPVC Sec II Part D Tablo 1A'dan alınan ASTM SA-387 sınıfı Cr-Mo çelik plaka sınıflarının minimum çekme ve akma değeri gereksinimleri	10
Tablo 2. 7 ASME BPVC Sec II Part D Tablo 1A'dan alınan ASTM SA-387 sınıfı Cr-Mo çelik plaka sınıflarının izin verilebilir maksimum tasarımsal stres değerleri.....	11
Tablo 2. 8 AWS A5.28 ER90S-B9 / 5.28M ER62S-B9, UNS Numarası S50482 olan elektrot ve kaynak tellerinin kimyasal kompozisyon gereklilikleri. (Aralık olarak verilmeyen değerler maksimum değerleri ifade etmektedir).....	19
Tablo 2. 9 AWS A5.28 ER90S-B9 / 5.28M ER62S-B9, UNS Numarası S50482 olan elektrot ve kaynak tellerinin çekme testi gereklilikleri	19
Tablo 2. 10 Yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin enerji ileten ortama göre sınıflandırması (Parantez içerisinde kaynak yöntemlerinin Amerikan sistemine göre kısaltmaları yazılmıştır).....	20
Tablo 2. 11 EN 1011-1 Standardında belirtilen kaynak yöntemine göre ısıl verimlilik katsayıları	23
Tablo 2. 12 Penetrant ürün ailesi sınıflandırması (EN ISO 3452-1 Penetrant Testi standardı baz alınarak hazırlanmıştır).....	34

Tablo 4. 1 PWHT sonrası gerçekleştirilen görsel muayene sırasında kep ve kök taraflarında tespit edilen süreksizlikler.....	51
Tablo 4. 2 Radyografik muayene sırasında ki çekim parametreleri.....	61
Tablo 4. 3 Görsel muayene (VT), sıvı penetrant testi (PT) ile faz taramalı ultrasonik muayene (PAUT) kontrolleri sonuçlarının karşılaştırılması	65
Tablo 4. 4 Test numunelerinden şekil 4.33’de ki gibi enine kesit alınarak 3 sıra halinde ölçülen sertlik değerleri	72
Tablo 4. 5 Çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme dayanımları, akma dayanımları ve % uzamalar	94



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Son yıllarda her ne kadar yenilenebilir enerji üretimine talep artmış olsa da fosil yakıtlar kullanarak elektrik üreten termik santrallerden ve nükleer enerji ile elektrik üreten nükleer santrallerden üretilen elektrik, elektrik üretiminin çok büyük kısmını oluşturmaktadır. Aynı zamanda motorlu taşıtlar için elektrikle çalışan tasarımların henüz yeteri kadar gelişmemiş olması, petrokimya ürünlerinin alternatifsiz olması ve petrokimya endüstrisinin hammaddesi olan naftanın ham petrolden rafineri süreçleri neticesinde elde edilebiliyor olması nedeniyle rafineri ve petrokimya tesisleri de önemini korumaktadır.

Günümüzün en büyük küresel sorunu olan nükleer atıklar ve karbon ayak izinin azaltılması için sürekli olarak üretim süreçlerinin geliştirilmesi amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Verimliliğin artırılması için yapılan yeni tasarımlar daha yüksek sıcaklıklara ve basınçlara dayanıklı olan nitelikli malzeme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda verimliliğin artırılmasının bir diğer yöntemi olan maliyetleri azaltmak amacıyla büyük tesislerin yapımı aşamasında harcanan enerji miktarlarının azaltılması konusunda sürekli olarak araştırmalar devam etmektedir.

Verimliliğin artırılması amacıyla nükleer atıkların, fosil atıkların ve karbon ayak izinin azaltılması için konvansiyonel enerji santralleri yerine süper kritik, ultra süper kritik enerji santrallerinin, nükleer santrallerin ve daha verimli rafineri ve petrokimya tesislerinin geliştirilmesi konusundaki çalışmalar sürekli devam etmektedir. Bu durum sürekli olarak daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda çalışabilen malzemelere ihtiyacın artmasını ortaya çıkartmakta olup bu doğrultuda malzeme geliştirilmesi üzerine çalışmalar giderek hız kazanmaktadır.

Son 50 yılda, kömür yakıtlı termik santraller 540°C buhar sıcaklığında ve 16,5 MPa buhar basıncında normal verimliliği %35 HHV [Higher Heating Value] olan kritik altı

bir santralden, 593°C üzerinde sıcaklıklarda, 24,8 MPa üzerinde buhar basıncında %42'ye varan verimde çalışabilen ultrasüperkritik (USC) santrallere evrilmiştir. Şu anda ABD, Avrupa ve Japonya'da buhar sıcaklığı ve basıncını artırarak USC santrallerinin verimini %45 üzerine çıkarmak için çalışmalar sürmektedir; bu parametreler, gelişmiş ultrasüperkritik (AUSC) teknolojinin göstergesidir. Daha yüksek verimli USC enerji santralleri için alaşım geliştirme çabaları, mevcut sürünme mukavemeti arttırılmış ferritik (CSEF: creep strength enhanced ferritic) alaşımlarının optimizasyonuna ve geleneksel krom-molibden (Cr-Mo) çeliklerinin modifikasyonuna odaklanmıştır. Bu alaşımlar, mükemmel yüksek sıcaklık sürünme mukavemetine ve mükemmel fiziksel ve korozyon özelliklerine sahiptir. (David, Siefert et al. 2013)

Sürünme Dayanımı Geliştirilmiş Ferritik (CSEF) çelikler (ASTM Sınıfları P91, P92, P122), %9 ila %12 arasında Cr, az miktarda Mo, V, Nb ve değişen W, Co, B, N ve Ni ilaveleri içeren yüksek alaşımlı çeliklerdir. Mükemmel sürünme özellikleri nedeniyle CSEF çelikleri, süper kritik buhar parametreleriyle modern fosil enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. (Alexandrov, Wang et al. 2011)

Santraller, rafineriler ve petrokimya tesisleri gibi büyük ölçekli enerji yatırımları boru ve plaka malzemelerinden kaynaklı birleştirme ile yapılmaktadır. Bu gibi büyük projelerde milyonlarca saat kaynak işlemi yapılmakta olup ciddi bir enerji sarfıyatı söz konusudur. Daha verimli üretim amacıyla yapılan tasarımların gereksinim duyduğu yüksek sıcaklıkta yüksek basınca dayanabilen malzemeler içerisinden kaynaklanabilirliği olan ve maliyeti alternatif malzemelere göre daha uygun olan Cr-Mo alaşımlı çeliklerin bu ihtiyaç doğrultusunda geliştirilmesi ve kaynak işleminin iyileştirilmesi çalışmaları endüstrinin ihtiyaçları doğrultusunda sürekli olarak devam etmektedir.

Kaynak işlemi sırasında soğuma hızına bağlı olarak meydana gelen faz dönüşümleri ve hacimsel büzölmeler nedeniyle ana malzeme ve kaynak dolgu malzemesinde kalıntı gerilmelerin ve faz dönüşümlerinin meydana geldiği bilinmektedir. Kalıntı gerilmelerin ve istenilmeyen faz dönüşümlerinin oluşumu kaynak ve ısıdan etkilenen bölgede darbe dayancısı, sürünme dayancısı, yorulma dayancısı gibi mekanik özellikleri

düşürmesi ve sert fazları meydana getirerek çatlak oluşumuna neden olduğundan dolayı istenilmemektedir.

Kaynak işleminde malzeme cinsi, malzeme kalınlığı, kaynak yöntemi, kaynak sarf malzemeleri ve kaynak parametreleri (volt, amper, paso sıralaması) sabit tutulduğunda ön ısı sıcaklığı değişimi ile soğuma hızı değişmektedir. Endüstriyel uygulamalarda Cr-Mo içeren yüksek sıcaklıkta yüksek basınç ve korozyona dayanıklı çeliklerin kaynak işlemi sırasında kalıntı gerilme oluşumu ve istenilmeyen faz dönüşümleri neticesinde çatlak hasarları yaygın görülen bir problemdir. Çatlak hassasiyeti olan bu malzemelerde soğuma hızını azaltarak, kalıntı gerilme ve istenilmeyen faz dönüşümlerinin oluşumunu sınırlandırmak suretiyle çatlak oluşumunu engellemek için ön ısı uygulanması yapılmaktadır.

BÖLÜM İKİ TEORİK İNCELEME

2.1 Ana Malzeme

Kaynak işleminde birleştirilecek olan malzemelere ana malzeme denilmektedir. Bu çalışma kapsamında alın kaynağı yöntemi ile birleştirilecek olan ana malzeme ASTM SA 387 91 Sınıfı Tip 2 olup kimyasal ve fiziksel özellikleri imalatçı tarafından hazırlanan TS EN 10204 3.1 malzeme sertifikasından alınarak aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 2. 1 Çelik üreticisi tarafından hazırlanan TS EN 10204 3.1 malzeme sertifikası üzerinde belirtilen döküm şarjından alınan numune üzerinden yapılmış olan kimyasal analiz sonuçları

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu
0,09	0,30	0,47	0,019	0,001	0,033	0,004	0,05

Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	B	Zr
8,43	0,26	0,91	0,19	0,002	0,07	0,0002	0,001

Tablo 2. 2 Çelik üreticisi tarafından hazırlanan EN 10204 3.1 malzeme sertifikası üzerinde belirtilen nihai üründen alınan numune üzerinden yapılmış olan çekme testi sonuçları

Akma Dayanımı (Rp 0,2) N/mm2	Çekme Dayanımı (Rm) N/mm2	Uzamana %
613	748	40

İmalatçı tarafından hazırlanan TS EN 10204 3.1 malzeme sertifikasında plakanın elektrikli üretim yöntemleri ile üretildiği, tam söndürülmüş ve ince taneli yapıda olduğu belirtilmektedir. Ayrıca üretim aşamasında uygulanan ısıtma işlemi hakkında 1050°C de 1 saat normalizasyon yapıldığı akabinde havada soğutulmuş malzeme sıcaklığının 780°C ye kadar indirildiği ve bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilerek temperleme işlemi uygulandığı ve ardından havada soğutulduğu belirtilmektedir.

ASME Section II A1 içerisinde bulunan ASTM SA 387 spesifikasyonu yüksek sıcaklıkta çalışması için tasarlanmış kaynaklı kazanlar ve basınçlı kaplar için krom-molibden alaşımlı çelik levhaları kapsamaktadır. Bu spesifikasyon kapsamında aşağıdaki malzeme sınıfları belirtilmektedir.

Tablo 2. 3 Cr-Mo içeriğine göre yüksek sıcaklık çeliği sınıflandırması. (SA 387 Specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum)

Malzeme Sınıfı	Nominal Krom İçeriği, (%)	Nominal Molibden İçeriği, (%)
2	0,50	0,50
12	1,00	0,50
11	1,25	0,50
22	2,25	1,00
21	3,00	1,00
5	5,00	0,50
9	9,00	1,00
91	9,00	1,00

ASTM SA 387’de yukarıdaki tabloda belirtilen Cr-Mo çelikleri için 91 sınıfı malzeme dışındaki malzeme sınıflarının çekme dayanımına göre birinci ve ikinci sınıf diye tanımlandığı fakat 91 sınıfı malzemelerin yüksek çekme mukavemetinde olup sadece ikinci sınıf olarak tanımlandığı ve 91 sınıfı malzemelerde sürünme dayanımının artırılması için daha sınırlı bir bileşim oluşturularak tip 1 ve tip 2 şeklinde iki tipten oluştuğu belirtilmektedir.

API Technical Report 938-B’de 91 sınıfı malzemelerin ısı iletkenliğinin 304 sınıfı paslanmaz malzemelere göre daha iyi olduğu ve aynı zamanda ısı genleşmesinin de daha az olduğu belirtilmektedir. Bu iki özellik sayesinde yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlarda ısınmadan kaynaklı boyut değişimleri nedeniyle yaşanabilecek sorunlar 304 sınıfı paslanmaz çelik malzemelere göre çok daha az olduğu anlaşılmaktadır.

ASTM SA 387 Grade 91 Class 2 malzeme Amerikan malzeme sınıflandırmasında ASME Sec IX içerisinde P numarası 15E şeklinde tanımlanırken, Avrupa

standartlarında ISO 15608 standardına göre 6.4 grubunda tariflenmektedir. Genel olarak %10,5'e kadar krom içeren çelikler düşük alaşımlı çelik olarak tariflenmektedir.

API TR 938-B'de 2¼Cr-1Mo (malzeme sınıfı 22) çeliği ile 9Cr-1Mo-V (malzeme sınıfı 91) çeliğinin derin sertleştirilebilirliği kıyaslanmış olup 22 sınıfı malzemenin yüzeyinde sertlik 38 HRC iken 12,7mm derinlikte 32 HRC değerlerine indiği fakat 91 sınıfı malzemenin yüzey sertliği 39HRC iken bu sertlik değerini 101,6mm derinliğe kadar muhafaza ettiği belirtilmektedir. Bu deneysel çalışma neticesinde 91 sınıfı malzemelerin derin sertleştirilebildiği görülmektedir.

ASTM SA 387'de belirtilen çeliklere tungsten ilave edilerek elde edilen 23, 911, 92, 122 sınıfı çelikler de ASTM SA 1017 (specification for pressure vessel plates, alloy-steel, chromium-molybdenum-tungsten) içerisinde tariflenmektedir.

2.1.1 Ana Malzemenin Karbon Eşdeğerliği (CE) ve Kaynaklanabilirliğinin Değerlendirilmesi

Kaynaklanabilirlik için en önemli kriter karbon eşdeğerliğidir. Karbon eşdeğerliğinin artması ile sertlik artar ve kaynaklanabilirlik özelliği azalır. Çünkü sertleşebilen çeliklerde kaynak yapılırken ısı girdisi ve akabinde hızlı soğuma sırasında sertlik artışı nedeniyle çatlak oluşumu meydana gelebilmektedir. Amerikan Kaynak Cemiyeti (AWS) tarafından belirlenen karbon eşdeğerliği formülüne göre karbon eşdeğerliğine etkin bir şekilde etki eden elementler karbon, mangan, krom, silisyum, molibden, vanadyum, bakır ve nikeldir. Kaynaklanabilirlik açısından genel görüş 0,40 karbon eşdeğerliğine kadar herhangi bir problem yaşanmadığı, bu değer üzerinde CE değeri için çatlak oluşumunu engellemek amacıyla ön ısı uygulaması gerektiğidir.

Amerikan Kaynak Cemiyeti (AWS) tarafından belirlenen karbon eşdeğerliği formülü (AWS D1.1 2020 Structural Welding - Steel, p:354).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (2.1)$$

Karbon eşdeğerliği hesabı olarak ASM Handbook, Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering, sayfa 242’de de hidrojen çatlağı (soğuk çatlak) hassasiyeti olan karbon ve alaşımlı çeliklerde karbon eşdeğerliği hesabı olarak aynı formül verilmektedir.

Bu formüle göre deneylerde kullanılacak olan malzemenin CE değeri 2,11 olarak çıkmaktadır. Bu değer kaynaklanabilirlik açısından çok yüksek olup kaynağından önce ana malzemeye ön ısı uygulanması zorunludur.

Tablo 2. 4 Çeliğin kaynaklanabilirliği ve ön ısı uygulaması için CE aralığı (Alhassan, 2021)

Karbon Eşdeğerliği (CE)	Kaynaklanabilirlik	Ön Isı
0,35’e kadar	Mükemmel	Gerekmez
0,36 - 0,40	Çok İyi	Önerilir
0,41 – 0,45	İyi	Gerekli
0,46 – 0,50	Orta	Gerekli
0,51 ve üzeri	Zayıf	Gerekli

2.1.2 Ana Malzemenin Alaşım Elementleri Açısından Değerlendirilmesi

2.1.2.1 Fosfor ve Kükürt İçeriği

Kükürt ve fosforun çeliği kırılgan hale getirmesi nedeniyle çeliğin tokluğunu ve sünekliğini önemli ölçüde azalttığı bilinmektedir. Demir ile kükürt demir sülfür (FeS) bileşiği oluşturur ve FeS’in ergime noktası 1194°C dir ([https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(II\)_sulfide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(II)_sulfide)). Demir ile fosfor demir fosfür (Fe₂P ve Fe₃P) bileşiği oluşturur ve bu demir fosfürün ergime aralığı 1050-1100°C dir (<https://en.wikipedia.org/wiki/Ferrophosphorus>). Hem kükürt hem de fosforun demir ile oluşturdukları bileşiklerin ergime noktaları demirin ergime sıcaklığına oranla oldukça düşük olmasından dolayı çelik alaşımlarında katılaşma sırasında bu iki bileşikte sıcak yırtılmaya neden olduğu için kaynaklı birleştirmelerde istenilmemektedir ve çelik içerisindeki miktarı sınırlandırılmaktadır.

Tablo 2. 5 ASTM SA 387 de grade 91 sınıfı malzemeler için maksimum fosfor ve kükürt içerikleri

Element	ASTM SA 387	Ocak Analizi (maksimum)	Nihai Ürün Analizi (maksimum)
P	91 Type 1	0,020	0,025
	91 Type 2	0,020	0,020
S	91 Type 1	0,010	0,012
	91 Type 2	0,005	0,005

SA 387 Grade 91 sınıfı malzemeler ticari olarak Tip 2 olarak üretilmektedir.

2.1.2.2 Krom İçeriği

Krom karbür çökeltileri oluşturarak çeliğin sertliğini arttırmakta ve buna bağlı olarak da çekme dayancını arttırmaktadır. Bu özelliği nedeniyle krom çeliğin yüksek sıcaklıkta yüksek basınç altında dayanımını arttırmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleşen işlemler için üretilen ekipmanlarda ve bu ürünlerin taşındığı borulamalarda bu nedenle krom içerikli çelikler kullanılmaktadır. Ayrıca kromun çeliğin sünekliğini azalttığı da genel olarak bilinmektedir.

2.1.2.3 Nikel ve Mangan İçeriği

API 938-B’de paylaşılan grafik incelendiğinde nikel ve mangan içeriğinin artışı ile AC₁ dönüşüm çizgisinin düşük sıcaklığa doğru hareket ettiği görülmektedir. PWHT sıcaklığının AC₁’in altında kalması gerektiği için API 938-B’de Ni + Mn içeriğinin maksimum %1,5 olarak sınırlandırıldığı ve kaynak sertliğinin sınırlandırıldığı bazı özel proseslerde bu değerin %1,3 ile sınırlandırıldığı belirtilmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemede Ni + Mn içeriği %0,73’tür.

AWS A528’de Mn ve Ni alaşım elementlerinin toplamının Ac₁ sıcaklığını düşürdüğü ve bu nedenle ER90S-B9 kaynak dolgu teli için Mn ve Ni toplamının %

1,50 den az veya eşit olacak şekilde sınırlandırıldığı ve bu şekilde kaynak sonrası gerilim giderme tavlamasında kısmi dönüşümün önüne geçildiği belirtilmektedir.

2.1.2.4 Molibden İçeriği

AWS Guide to Weldability Carbon and Low Alloy Steels’de karbon ve düşük alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin etkisinin tariflendiği tablo 2.7’de Molibdenin (Mo) güçlü sertleştirici ve sürünme dayancını arttırıcı özelliği belirtilmektedir.

Ayrıca molibden ilavesinin yüksek sıcaklık korozyonuna dayancı arttırdığı ve kaynaklanabilirliği olumlu etkilediği de bilinmektedir.

2.1.2.5 Vanadyum ve Niyobyum İçeriği

Vanadyum ve Niyobyumun kuvvetli karbür çökeltisi oluşturarak çeliğin mekanik özelliklerini yükselttiği bilinmektedir. 91 sınıfı çeliklerde modifikasyon amacıyla kullanılmakta olup yüksek sıcaklıkta sürünme dayancını arttırmaktadır.

API 938B’de normalleştirme ve tavlama ısı işlemi sonrası M23C6 karbürler ve vanadyum/kolombiyum açısından zengin karbo-nitrür çökeltileri ile tavllanmış bir martenzit yapısı olduğu ve bu çökeltilerin sürünme kırılma mukavemetini iyileştirdiği belirtilmektedir.

AWS A5.28’de ER90S-B9 kaynak dolgu teli için Niobium (Columbium) miktarı % 0.02 – % 0.10 aralığında olması gerektiği belirtilmektedir.

AWS Guide to Weldability Carbon and Low Alloy Steels’de karbon ve düşük alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin etkisinin tariflendiği tablo 2.7’de Niyobyum (Nb) ilavesinin mikro alaşım olarak güçlü sertleştirme özelliği olduğu, Vanadyum (V) mikro alaşımının çok güçlü sertleştirme özelliği olduğu belirtilmektedir.

2.1.3 SA387 91 Sınıfı Tip 2 Malzemenin Mekanik Özellikleri Açısından İncelenmesi

2.1.3.1 Çekme ve Akma Dayancı

ASME BPVC Sec II Part D’de ASTM SA-387 sınıfı Cr-Mo içerikli çelikler için verilen mekanik özellikler karşılaştırıldığında Grade 91 çelik plaka malzemesinin çekme dayancı için minimum 585 MPa, akma dayancı için minimum 415 MPa olacağı belirtilmektedir.

Tablo 2. 6 ASME BPVC Sec II Part D Tablo 1A’dan alınan ASTM SA-387 sınıfı Cr-Mo çelik plaka sınıflarının minimum çekme ve akma değeri gereksinimleri

Sınıf	Nominal Kompozisyon	P-Numarası	Minimum Tensile Strength (MPa)	Minimum Yield Strength (MPa)
11	1 1/4 Cr - 1/2 Mo-Si	4	415	240
22	2 1/4 Cr - 1 Mo	5A	415	205
5	5 Cr - 1/2 Mo	5B	415	205
91 Type 1 $t \leq 75\text{mm}$	9 Cr - 1 Mo - V	15 E	585	415
91 Type 1 $t > 75\text{mm}$	9 Cr - 1 Mo - V	15 E	585	415
91 Type 2	9 Cr - 1 Mo - V	15 E	585	415

Tablo 2. 7 ASME BPVC Sec II Part D Tablo 1A'dan alınan ASTM SA-387 sınıfı Cr-Mo çelik plaka sınıflarının izin verilebilir maksimum tasarımsal stres değerleri

Grade	Çalışma Sıcaklığına (°C) göre Tasarımsal Olarak İzin Verilebilir Maksimum Stres (S, Mpa) Değeri																					
	40	65	100	125	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
11	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	116	114	101	72,9	51,7	36,5	25,2	17,6	12,4	8,08
22	118	118	118	116	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	100	80,9	64	47,7	34,5	23,5	15,5	9,39
5	118	118	118	116	114	114	113	112	111	109	107	104	100	96,1	81,4	61,7	46,4	34,7	25,8	18	11,5	6,68
91 Type1 t≤75mm	168	168	168	168	168	167	166	164	163	161	157	153	147	141	134	126	117	98,5	75,5	54,3	36,8	24
91 Type1 t>75mm	168	168	168	168	168	167	166	164	163	161	157	153	147	141	134	126	117	98,5	75,5	54,3	36,8	24
91 Type2	168	168	168	168	168	167	166	164	163	161	157	153	147	141	134	126	117	102	78,2	57,6	39,2	25,1

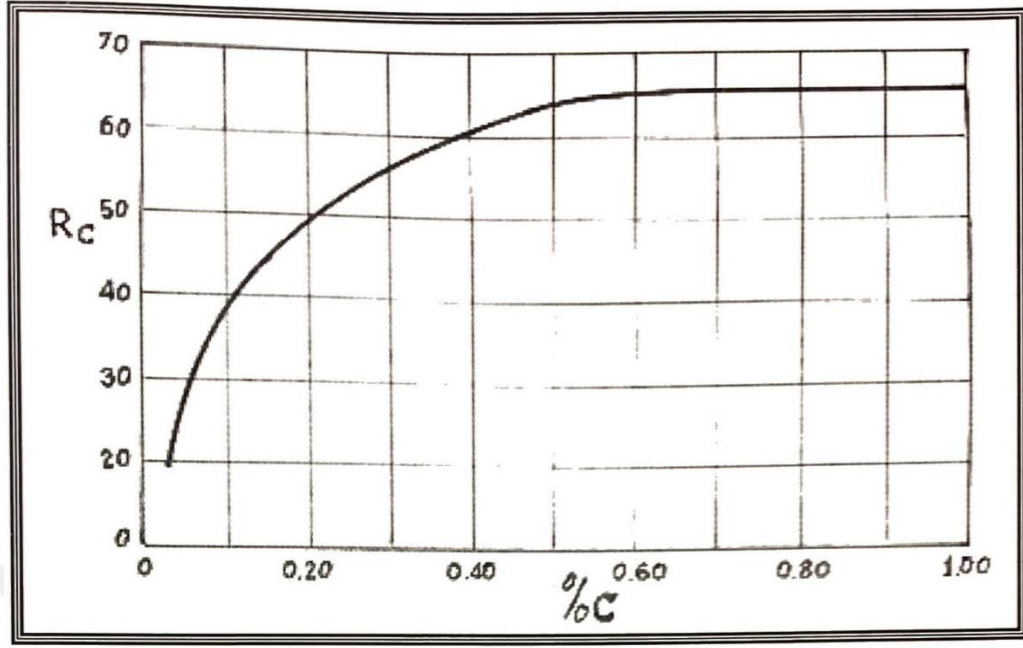
2.1.3.2 Sertlik ve Sertleştirilebilirlik

Bilindiği üzere sertlik esas olarak çelik malzemenin içerdiği alaşım elementlerinin etkisi ile elde edilen bir değer iken, sertleştirilebilirlik çeliğin içerdiği karbon içeriği sayesinde soğuma hızına bağlı olarak elde edilen faz dönüşümleri neticesinde kazandırılan bir malzeme özelliğidir.

Bir alaşımın sertliği soğuma hızından büyük ölçüde etkilenir. Ayrıca sertlik, alaşımın kendisinin sertleşebilirliği de dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenir. Sertlik "çentik oluşumuna karşı direnç" olarak tanımlanır ve çoğu kavram ve ölçümler ile alakalıdır. Sertleşebilirlik, demir alaşımları için "su vermenin neden olduğu sertliğin derinliğini ve dağılımını belirleyen özellik" olarak tanımlanır. Karbon ve düşük alaşımlı çeliklerdeki birçok kaynak ve HAZ çatlaması problemi, bileşenlerin hızlı soğumasıyla ilişkilidir ve hızlı soğuma yüksek çatlak eğilimi olan fazların oluşumuna yol açar. (American Welding Society, The Practice Reference Guide to Welding Metallurgy, 1999)

Petrol rafinerileri, petrokimya ve doğal gaz endüstrisinde H_2S ortamında kullanılan malzemeler için gereklilikleri tarifleyen "ANSI/NACE MR 0175 /ISO 14156-1:2015 Part 2 Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons" standardında H_2S ortamında çalışan kaynaklı malzemeler için kaynak sonrası gerçekleştirilen ısıtılma işlem sıcaklığı ve süresi, maksimum kaynak bölgesi sertliğinin 250 HV veya 22 HRC (ölçülen değerlerden herhangi birinin bu değer 2HRC üzerine çıkmaması gerekir) olmasını sağlamalıdır.

Petrol rafinerileri, petrokimya ve doğal gaz endüstrisinde korozyon petrol rafinesi şartlarında kükürt gerilimli çatlağına dayanıklı metalik malzemeler için gereklilikleri tarifleyen "ANSI/NACE MT 0103 / ISO 17495-1:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries -- Metallic materials resistant to sulfide stress cracking in corrosive petroleum refining environments" standardında alaşımlı çeliklerin sertlik değeri 22 HRC (237 HB) ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 2. 1 Tam sertleşme ve %C içeriği arasındaki ilişki. (Prof. Dr. Erdoğan Tekin “Metalografi” kitabı sayfa 309)

Deneylerde kullanılan SA 387 Gr. 91 Tip 2 malzemenin üretici sertifikasında karbon oranı % 0.09 olarak belirtilmektedir. Yukarıdaki şekilde %0.09C içeriğine sahip çeliğin tam sertleşmesi neticesinde yaklaşık olarak 39HRC (363HB) sertliğe ulaşabildiği görülmektedir. Endüstriyel uygulamalarda kaynak sonrası gerilim giderme tavlaması (PWHT) uygulanmadığında bu sertliklere ulaşıldığı bilinmektedir. Bu yüksek sertlik değeri çatlama ve kırılmalara neden olduğu için uluslararası standartlarda kaynak sonrası gerilim giderme ısı işlemi ile bu sertlik değerinin 22 HRC (237 HB) altında olması istenilmektedir.

API Technical Report’da modifiye edilen 9Cr - 1Mo çeliğinin derin sertleştiği belirtilmiş olup deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen grafikte 101.6mm derinliğe kadar modifiye edilmiş 9Cr – 1Mo çeliğinin sertliğinin kesit boyunca yaklaşık değerlerde olduğu görülmektedir.

2.1.3.3 Tokluk

Tokluk malzemenin kopana kadar absorbe ettiği enerji olarak tariflenmektedir. $\sigma - \epsilon$ eğrisi altında kalan alan malzemenin tokluğudur. Ana malzeme sertifikasında belirtilen minimum %40 uzama değeri ASTM SA 387 Grade 91 tip 2 malzemenin tokluk özelliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

2.1.3.4 Sürünme Dayancı

Sürünme malzemenin yüksek sıcaklıkta sabit yük (genelde basınç) altında zamana bağlı gösterdiği deformasyondur. Sürünme dayancı da bu deformasyona karşı dirençtir. Cr-Mo çelikleri yüksek sıcaklıkta oksidasyona ve yüklere karşı yüksek dayanca sahip malzemelerdir. Sürünme dayancının artırılması için yapılan çalışmalar neticesinde Vanadyum ve Niyobyum (Columbium) ilavesi ile oluşturulan 91 sınıfı malzemeler (Creep Enhanced Ferritic Steel olarak da tarif edilmektedir) Nb (Cb) ve V elementlerinin oluşturduğu karbür çökeltileri sayesinde sürünme dayancı artırılmış malzemelerdir. API Technical Report 938-B’de normalleştirme ve temperleme ısı işleminin, $M_{23}C_6$ karbürler ve vanadyum/kolumbiyum açısından zengin karbon nitrür çökeltileri içeren bir tavlanmış martensit yapısına yol açtığı ve bu çökeltiler sayesinde sürünme kopma mukavemetinin artırıldığı belirtilmektedir.

2.1.3.5 Darbe Dayancı Açısından Değerlendirilmesi

API Technical Report 938-B’de darbe dayancının ergitme uygulamasından gelen inklüzyonlar ve yaşlanma prosesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir. Inklüzyon olarak kükürt ve fosfor içeriği ve bu inklüzyonların şekil ve boyutlarının etkili olduğu belirtilmekte olup, kükürt ve fosfor içeriğinin sınırlandırılması ile mükemmel bir darbe dayancına ulaşılabildiği belirtilmekte ve paylaşılan grafikte -50°C ’nin altında dahi $50\text{J}/\text{cm}^2$ nin üzerinde bir darbe dayancı olduğu görülmektedir. Yaşlanma ile ilgili olarak da 550°C ile 600°C arasında yaşlanmanın 91 sınıfı malzemelerde yaşlandırma uygulamasının etkisiz olduğu, 650°C ile 700°C arasında dayanım ve sertlikte bir miktar azalma olduğu belirtilmektedir.

2.1.4 Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon Dayanımı

ASM Handbook, Volume 13A Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection sayfa 571’de paylaşılan fig.1 karbon, düşük alaşımlı ve paslanmaz çeliklerin 590C den 930C sıcaklık aralığında 100 saat bekletilerek yapılan yüksek sıcaklıkta oksidasyon dayancı deneyi grafiği incelendiğinde 9Cr-1Mo çeliği için yüksek sıcaklık oksidasyonu nedeniyle korozyonun 760C’den itibaren başladığı görülmektedir. Bu özelliği sayesinde 9Cr-1Mo çelikleri yüksek sıcaklıkta çalışan ortamlarda oksidasyona uğramadan uzun yıllar kullanılabilmekte ve üretildikleri ekipmanın dizayn ömürlerinin yüksek olması nedeniyle de uzun ömürlü ekipman kullanımı ile tesis ömrünün artmasına da imkân sağlanmaktadır.

2.2 Kaynak İşleminde Faz Dönüşümleri

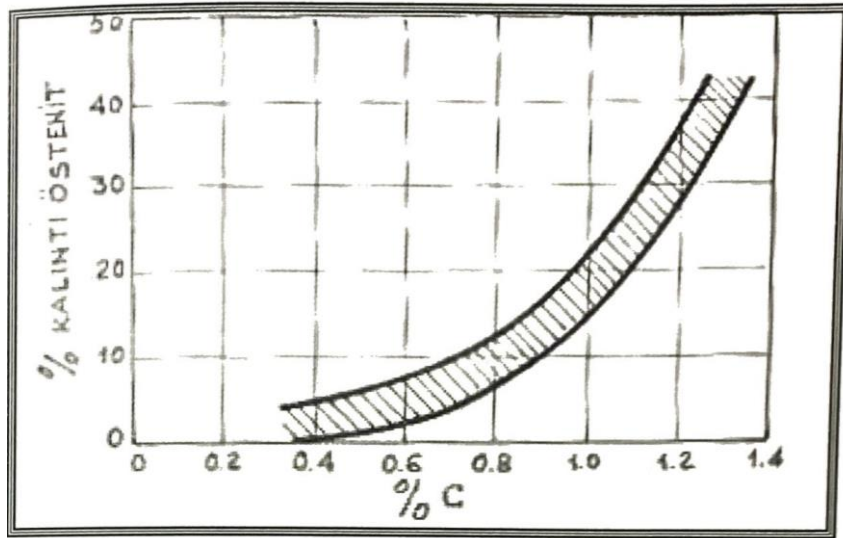
American Welding Society, The Practice Reference Guide to Welding Metallurgy, 1999’da soğutma hızının kaynak ve bitişik ana metal üzerindeki spesifik etkilerine dikkat çekilmekte ve kaynak ve ana metalin 3 bileşene sahip olduğu belirtilmektedir. Bunlar; birinci bölge erimiş olan kaynağın kendisi, ikinci bölge erimeyen ancak kaynak ısısından metalürjik olarak etkilenmiş olabilecek bitişik ısıdan etkilenen bölge (ITAB: Isı Tesiri Altında ki Bölge, HAZ: Heat Affected Zone), üçüncü bölge ise kaynak işleminden etkilenmeyen orijinal işlenmiş ana metaldir.

Bu deneylerde kullanılan modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliği temperlenmiş martenzitik-ferritik yapıya sahip olduğu için kaynak işlemi sırasında ısı girdisi ve akabinde hızlı soğumaya bağlı olarak ısı tesiri altında kalan bölgede martenzitik dönüşümler oluşabilmekte ve bu dönüşümlere ilave olarak kalıntı gerilmeler meydana gelebilmektedir. İstenilmeyen faz dönüşümlerinin oluşmasının engellenmesi için soğuma hızının düşürülmesi gerekmektedir. Aynı zamanda soğuma hızının düşürülmesi kalıntı gerilme oluşumunu da azaltacağı için Cr-Mo çeliği gibi martenzitik ferritik çeliklerde en dikkat edilmesi gereken konudur. Ayrıca kaynak sırasında ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) ve kaynak metalinde oluşan

martenzitik fazlar ve kalıntı gerilmeler sertliği arttırdığı ve bu sertlik artışının da kırılabilirliği arttırdığı bilinmektedir. Kaynak sonrası yapılan gerilim giderme tavlama sayesinde de kalıntı gerilmeler bir miktar azaltılmakta ve buna bağlı olarak sertlik değerleri de düşürülmektedir. Madde 2.1.3.2 de özel uygulamalar için standartlarda istenilen sertlik değerleri belirtilmiştir.

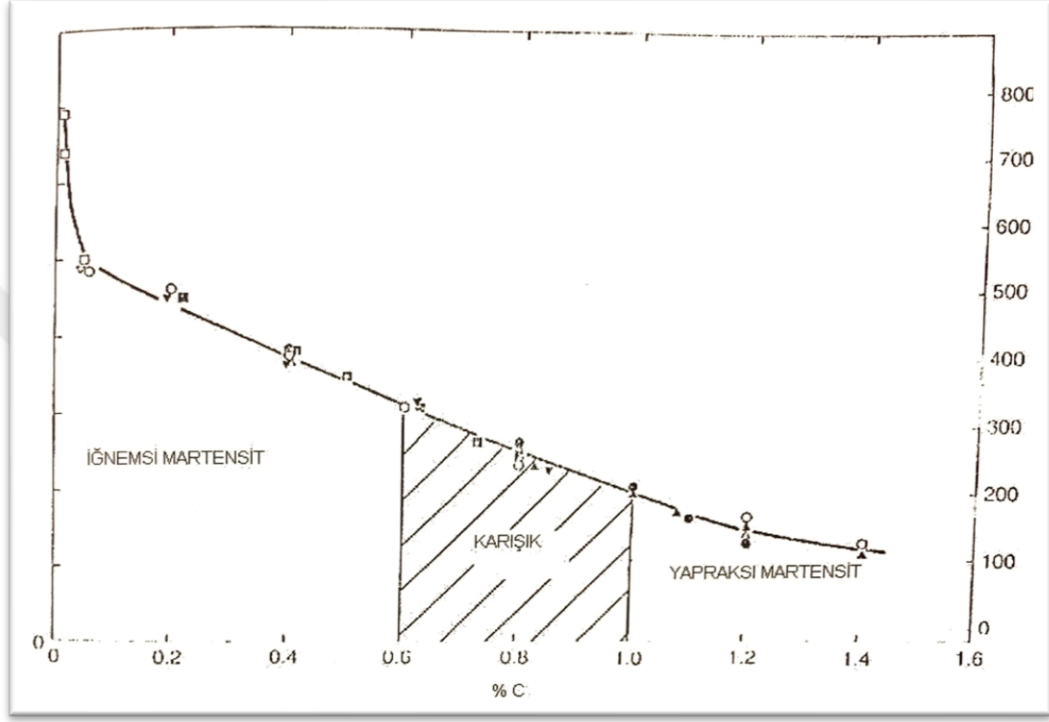
2.2.1 Martenzitik Dönüşüm

Prof. Dr. Erdoğan Tekin “Metalografi” kitabında, martenzit evresini eş ısı dönüşümlerin aksine, değişen sıcaklıklarda oluşan yarı dengeli bir evre olarak tanımlamakta ve eş ısı dönüşümlerde meydana gelen atom yayılmaları yerine değişen sıcaklıklarda oluşan martenzitik dönüşümün atom yayınmasız yarı dengeli bir evre olduğunu, martenzitik mikroyapının YMK yapının hızlı soğuması nedeniyle HMK yapıya dönüşebileceği atom yayınması gerçekleşmeden hacim merkezli kare pirizma şeklinde meydana geldiğini ve martenzit yapıda karbon atomlarının demir atomları arasında zorunlulukla yer aldığı bir aşırı doymuş katı çözeltisi olduğunu belirtmektedir. Ayrıca Kalan östenit miktarının ve martenzitik yapının iğnemi veya plaka şeklinde oluşmasının da çeliğin karbon oranı ile alakalı olduğunu açıklamakta ve aşağıdaki şekillerde bu durumlar görülmektedir.



Şekil 2. 2 %C içeriği ile kalıntı östenit arasındaki ilişki (Prof. Dr. Erdoğan Tekin “Metalografi” kitabı sayfa 307)

Görüldüğü üzere %C miktarı arttıkça kalıntı östenit oluşma eğilimi artmaktadır. Bizim deneylerde kullandığımız SA 387 91 Sınıfı Tip 2 malzemenin karbon oranı çelik üreticisinin malzeme sertifikasında % 0.09 olarak belirtilmiş olup bu grafikte belirtilen kalıntı östenit oluşumu başlangıcına göre oldukça düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 3 Martenzit biçimselliğinin %C içeriğine bağlı oluşumu. (Prof. Dr. Erdoğan Tekin “Metalografi” kitabı sayfa 317)

Prof. Dr. Erdoğan Tekin oluşan martenzit tipi ile %C içeriği ilişkisini yukarıdaki şekilde tariflemiş olup deneylerde kullandığımız malzemenin içerdiği % 0.09 karbon oranında iğnemsiz martenzit oluşumu görülmektedir.

Ayrıca Prof. Dr. Erdoğan Tekin yapraksız martenzit oluşumunda önce oluşan yapraksız martenzit yapılarının yeni oluşan yapraksız martenzitleri çatlatma eğilimi gösterdiğine dikkat çekmekte ve iğnemsiz martenzit yapıların boyunun enine oranla çok fazla (50X-100X) olduğunu belirtmektedir.

SA 387 91 Sınıfı Tip 2 malzeme yüksek sıcaklıkta yüksek basınç altında çalışan ekipmanlarda kullanıldığı için plakalı martenzit oluşumu çatlama eğilimi nedeniyle istenilmemektedir.

2.3 Kaynak Sarf Malzemeleri

2.3.1 Dolgu Teli

Elektrik ark kaynağı, toz altı ark kaynağı, metal aktif gaz kaynağı (MAG) ve metal inert gaz kaynağında (MIG) dolgu teli olmadan kaynak yapılması mümkün değildir. Elektron ışın kaynağı, lazer kaynağı, sürtünme kaynağında dolgu teli kullanmadan kaynak yapılırken gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) yönteminde de dolgu teli kullanmaksızın kaynak yapılabilmektedir.

GTAW kaynağında 2-3mm kalınlıktaki malzemeler dolgu teli olmaksızın kaynatılırken daha kalın parçalar kaynak ağzı açılarak dolgu teli ile kaynatılmaktadır. Kaynak işlemi sırasında eğer kaynak ağzı açıldıysa hem bu boşluğu doldurmak hem de ergime sırasında oksitlenen alaşım elementlerini yerine koymak aynı zamanda da kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini garanti altına almak için dolgu malzemesi kullanılmaktadır. Özellikle mekanik özellik gereksinimlerinin ve korozyon dayancının yüksek olması istenen malzemelerin kaynağında mutlaka dolgu teli kullanılarak ergime nedeniyle korozyona uğrayan alaşım elementlerinin yerine telden alaşım elementi takviyesi yapılmalıdır. Bu tez çalışması kapsamında AWS A5.28 ER90S-B9 kaynak teli kullanılarak GTAW yöntemi ile kaynak yapılacaktır.

Tablo 2. 8 AWS A5.28 ER90S-B9 / 5.28M ER62S-B9, UNS Numarası S50482 olan elektrot ve kaynak tellerinin kimyasal kompozisyon gereklilikleri. (Aralık olarak verilmeyen değerler maksimum değerleri ifade etmektedir)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu	Other Elements
0.07 - 0.13	1.20	0.15 - 0.50	0.010		0.80	8.00 - 10.50	0.85 - 1.20	0.15 - 0.30	0.04	0.20	0.50

Tablo 2. 9 AWS A5.28 ER90S-B9 / 5.28M ER62S-B9, UNS Numarası S50482 olan elektrot ve kaynak tellerinin çekme testi gereklilikleri

AWS Sınıflandırması		Koruma Gazı	Minimum Çekme Dayanımı		Minimum Akma Dayanımı		Minimum Uzama
A5.28	A5.28M		psi	Mpa	psi	Mpa	%
ER90S-B9	ER62S-B9	Argon / %5 O ₂ (SG-AC-5)	90.000	620	60.000	410	16

ER90SB9 [ER62S-B9] ve E90C-B9 [E62C-B9], yüksek sıcaklıklarda mukavemet, tokluk, yorulma ömrü, oksidasyon direnci ve korozyon direnci sağlamak üzere tasarlanmış niyobyum (kolombiyum) ve vanadyum ile modifiye edilmiş 9Cr-1Mo telleridir. Paslanmaz çelik ve ferritik çeliklerin birlikte kullanıldığında benzersiz iki malzemenin kaynaklanmasında yaşanan problemler daha yüksek sıcaklığa dayanım özelliği nedeniyle tek bir modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliği kullanılarak ortadan kaldırılmaktadır. (AWS A5.28 / ASME SFA 5.28)

2.3.2 Koruma Gazı

Kaynak işleminde koruma gazı kök koruma gazı ve kaynak örtüsünü koruma gazı (torç içerisinde gelen) olmak üzere 2 şekilde kullanılmaktadır. Deneylerde

uygulanacak olan gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) metodunda hem kök koruma hem de torç içerisinde beslenen koruma gazı olarak %100 Argon gazı kullanılacaktır.

2.4 Kaynak Uygulaması Hakkında Genel Bilgiler

Kaynak genel olarak iki malzemenin birbirine birleştirilerek bir bütün haline getirilmesidir. Bu işlem iki farklı parçayı birbirine birleştirmek için yapıldığı gibi bir malzemeyi koruma amaçlı yüzeyinin daha sert ya da daha yüksek korozyon dayancına sahip başka bir malzeme ile kaplanması amacıyla da uygulanabilmektedir. Kaynak işlemi metallerde, plastiklerde ve çeşitli malzeme kombinasyonlarında uygulanabilmektedir. Kaynak işleminde en temel sınıflandırma enerji ileten ortama göre sınıflandırmadır. Enerji ileten ortam gaz, akım, ışın, hareket ve sıvı olabilmektedir. Aşağıda yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemlerinde enerji ileten ortam sınıflandırması mevcuttur.

Tablo 2. 10 Yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin enerji ileten ortama göre sınıflandırması (Parantez içerisinde kaynak yöntemlerinin Amerikan sistemine göre kısaltmaları yazılmıştır)

Enerji ileten ortama göre	Kaynak Yöntemi
Gaz	Oksi asetilen kaynağı
Ark	Elektrik ark kaynağı (SMAW) Gaz altı ark kaynağı (GMAW) Toz altı ark kaynağı (SAW) Tungsten inert gaz kaynağı (GTAW)
Işın	Elektron ışın kaynağı Lazer ışın kaynağı
Hareket	Sürtünme kaynağı

2.4.1 Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemi (GTAW)

Avrupa gösterimi ile 141 Tungsten inert gaz kaynağı (TIG), Amerikan gösterimi ile de GTAW (Gaz tungsten ark kaynağı) olarak tariflenen kaynak yöntemi ya da Türkçe de yaygın kullanılan adıyla argon kaynağı yöntemi harcanmayan bir tungsten elektrot yardımıyla yapılan ve koruma örtüsü olarak argon ve/veya helyum gazlarının kullanıldığı bir ark kaynağı yöntemidir. Tel beslemesi kaynakçı tarafından elle yapılır. Kaynak banyosuna tel beslemesi kaynakçının kontrolünde olduğu için ergime noksanlığı probleminin daha az yaşandığı bir kaynak yöntemidir. Kaynakçı ergime ile ilgili problem olabileceğini tespit ettiği bölgede daha çok ertitme yapabilir ve tel beslemesini daha sonra yaparak ergime noksanlığı probleminin önüne geçebilir. Aynı zamanda kaynakçının ergimiş kaynak banyosuna yüksek hakimiyeti sayesinde düzgün bir kaynak formu oluşturabilmesi mümkündür.

Sıçrantı, hidrojen çatlağı ve cüruf probleminin olmaması, kaynakçının kaynak banyosuna hakimiyetinin en iyi olduğu kaynak yöntemi olması sayesinde hem ergime noksanlığının en az yaşandığı hem de kaynak formunun çok düzgün olduğu bir kaynak yöntemi olması nedeniyle GTAW kaynak yöntemi bu çalışma için en uygun yöntem olarak belirlenmiştir.

GTAW yöntemi diğer yöntemlerle aşağıda karşılaştırılmış ve yapılacak olan çalışma için en uygun kaynak yöntemi olduğu kararına varılmıştır.

2.4.1.1 GTAW Kaynağının Gaz Altı Kaynağı ile Kıyaslanması

Gaz altı kaynağındaki gibi eriyen dolgu teli kaynak ağzına püskürtülerek ark geçişi ile kaynak ağzı doldurulması sağlanmayıp, erimeyen tungsten elektrotla kaynak ağzı bölgesindeki ana malzeme eritildikten sonra ergimiş kaynak banyosuna tel beslemesi yapıldığı için gaz altı kaynak yöntemine göre ergime noksanlığı problemi çok daha az görülür. Aynı zamanda gaz altı kaynağına göre sıçrantı probleminin olmaması sayesinde GTAW kaynağı tercih edildiğinde sıçrantı kaynaklı problemler de ortadan kaldırılmaktadır.

2.4.1.2 GTAW Kaynağının Elektrik Ark Kaynağı ile Kıyaslanması

Elektrik ark kaynağında alaşım elektrot örtüsünden gelmektedir, ark oluşumunda kararlılığı elektrot örtüsü sağlamaktadır ve kaynak banyosunun yüksek sıcaklıkta atmosfer ile temasından kaynaklı oluşabilecek korozyondan korunması örtünün erimesi ile meydana gelen cüruf sayesinde olmaktadır. Kaynakçının ergimiş kaynak banyosuna hakimiyeti bozulduğu takdirde (uygunsuz bir salınım hareketi yapılırsa) cüruf metal içerisinde kalabilmekte ve cüruf kalıntısı hatasına neden olmaktadır. Eğer elektrot örtüsünün bütünlüğünde bir bozulma olursa hem o kısmın eridiği bölgede alaşımlama yetersiz olup kaynak içerisinde mekanik özellikleri zayıf bir bölge oluşmakta hem de ark kararlılığı bozulduğu için o bölgede kaynak hatası (gaz boşluğu, çatlak, cüruf kalıntısı gibi) kalmaktadır. Elektrik ark kaynağında yaşanan bir diğer problemde elektrot örtüsünün nem içermesi nedeniyle kaynak içerisinde hidrojen çatlağı oluşturmaktadır. Elektrik ark kaynağı yöntemi yerine GTAW yöntemi tercih edildiğinde elektrot örtüsü bütünlüğünde oluşabilecek hasarlardan kaynaklı problemler, cüruf nedeniyle oluşabilecek problemler ve örtünün nem tutması nedeniyle oluşabilecek hidrojen çatlağı problemleri ortadan kaldırılmıştır.

2.4.1.3 GTAW Kaynağının Toz Altı Ark Kaynağı ile Kıyaslanması

Toz altı kaynağı koruma örtüsü olarak toz kullanılan ve yüksek kalınlığa sahip malzemelerin Çift taraflı V (diğer adıyla X) kaynak ağızlarının veya altlıklı birleştirmelerinin yüksek amperle tek seferde fazla kaynak metali yığılarak az sayıda paso ile kaynatılmasında kullanılan bir kaynak yöntemidir. Toz altı kaynağı ile altlık kullanılmadan kök kaynağı yapmak imkansızdır. Cüruf kalıntısı, tek seferde fazla kaynak metali yığıldığı için sıcak yırtılma ve soğuk katlanma (overlap) gibi hataların oluşumu toz altı ark kaynağında yaygın karşılaşılan kaynak hatalarıdır.

2.4.2 Kaynak İşleminde Isı Girdisi

EN 1011-1 “Recommendations for welding of metallic materials Part 1: General guidance for arc welding” standardında pek çok çelik için, sertleşme ve çatlama riskinden dolayı kaynak ısısının ani soğumasından kaçınılması gerektiği ve bu nedenle malzeme tipine, malzeme kalınlığına ve ısı girdisine bağlı olarak, ön ısıtma ve pasolar arası üst veya alt sıcaklığın korunması gerekebildiği ve ısı girdisinin buna göre seçilmesi gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca ısı girdisinin özellikle ferritik ve ferritik-Östenitik paslanmaz çeliklerde önemli bir faktör olduğu ve ısı girdisinin kaynak sırasındaki zaman/sıcaklık döngüsünü etkilediği üzerinde durulmuştur.

$$Q = k \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \text{ in kJ/mm} \quad (2.2)$$

Q: Isı girdisi

k: Isıl Verimlilik

U: Ark voltajı (volt)

I: Kaynak akımı (amper)

v: Kaynak hızı (mm/sn)

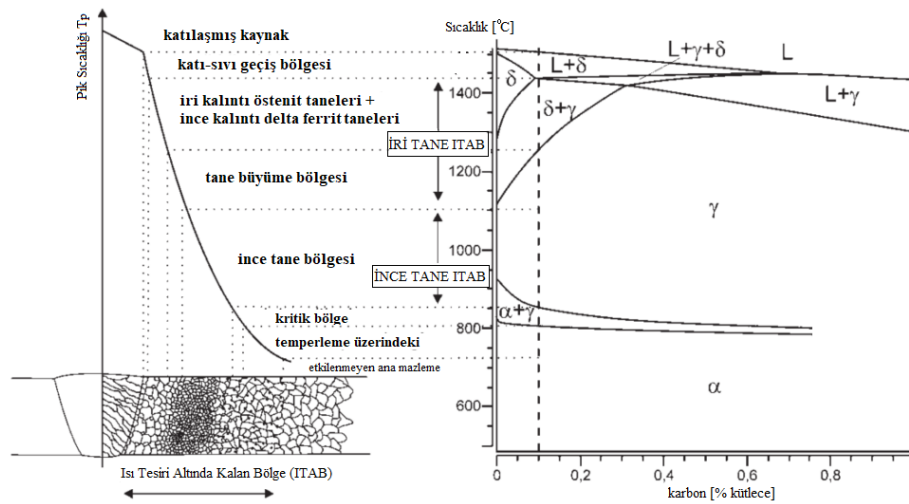
Tablo 2. 11 EN 1011-1 Standardında belirtilen kaynak yöntemine göre ısı verimlilik katsayıları

Yöntem Numarası	Kaynak Yöntemi	k
12	Tozaltı ark kaynağı	1,0
111	Elle metal ark kaynağı	0,8
131	İnert gaz ile metal ark kaynağı	0,8
135	Aktif gaz ile metal ark kaynağı	0,8
114	Toz özlü tel ile gaz korumasız metal ark kaynağı	0,8
136	Aktif gaz ile metal ark kaynağı (özlü tel ile)	0,8
137	İnert gaz ile metal ark kaynağı (özlü tel ile)	0,8
141	Tungsten asal gaz ark kaynağı	0,6
15	Plazma ark kaynağı	0,6

Bu tez çalışması kapsamında Avrupa gösterimi ile 141 Tungsten inert gaz kaynağı, Amerikan gösterimi ile GTAW Gaz tungsten ark kaynağı (argon kaynağı olarak da bilinen) yöntemi uygulanacak olup ısı verimliliği 0,6 dır.

2.4.3 Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

Kaynak işlemi sırasında kaynağın ergime çizgisinden ana malzemeye doğru bir ısı transferi meydana gelmektedir. Bu ısı girdisi nedeniyle ergime çizgisinden ana malzemeye doğru azalan bir ani sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu sırada ana malzemede meydana gelen ısınma neticesinde farklı fazlar ve/veya tane boyutunda değişimler meydana gelir. Bu sırada oluşan tane boyutu değişimleri kalıntı gerilmeleri meydana getirir. Bu olumsuz etkileri kaynak sırasında sınırlandırmak amacıyla ana malzemeye ön ısıtma uygulanır ve ısı tesiri altında kalan bölgenin ani soğuması engellenerek faz dönüşümü olan malzemelerde faz dönüşümleri sınırlandırılmakta ve kalıntı gerilme oluşumu azaltılmaktadır. Kalıntı gerilme oluşumunun sınırlandırılması ön ısı uygulaması ile olur iken oluşan kalıntı gerilmelerin azaltılması kaynak sonrası gerilim giderme ısı işlemi ile sağlanabilmektedir. Kaynak sonrası gerilim giderme ısı işlemi östenitik dönüşüm çizgisinin (A_{c1}) altında yapılmakta olup östenitik faz dönüşümüne izin verilmemektedir.



Şekil 2. 4 HAZ'ın alt bölgelerinin şeması ve X10CrMoVNb9-1 (P91 tipi) çeliğin hesaplanan denge faz diyagramı ile ilişkisi (Mayr 2007)

Mayr tarafından 2007 yılında yapılan çalışmadan alınan modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliğinin kaynak işlemi sırasında ısı tesiri altında kalan bölgede meydana gelen değişimleri yukarıdaki şekilde görülmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere ana malzemenin ergime çizgisine en yakın kısmı en yüksek sıcaklığa çıkan bölgedir ve bu bölgede iri taneli kalıntı östenit ve ince taneli kalıntı delta ferritler meydana gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında GTAW yönteminin seçilmesinin bir amacı da ısıl verimliliğinin düşük olması ve ısıdan etkilenen bölgenin düşük tutulmasıdır.

2.4.4 Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler çeşitli üretim/imalat aşamalarından sonra parçada kalan elastik gerilmelerdir. Kaynaklı imalat, döküm, yüzey işlemleri ve ısı işlemler sonucunda malzeme içerisinde homojen olarak dağılmadan kalan plastik deformasyonlar veya ısısal değişimler, kalıntı gerilim oluşmasındaki ana nedenlerdendir (YELBAY 2008)

Kaynak işlemi sırasında kaynak metalinden ana malzemeye doğru azalan bir sıcaklık gradyanı mevcuttur. Farklı sıcaklık dağılımı nedeniyle meydana gelen çekme basma kuvvetleri neticesinde malzeme içerisinde kalıntı gerilmelerin oluştuğu bilinmektedir. Ön ısı uygulaması ile bu sıcaklık farkı hem azaltılmakta hem de sıcaklık farkından dolayı meydana gelen soğuma hızı farkları da azaltılmaktadır. Bu iki nedenden dolayı kaynak işleminde ön ısı uygulaması neticesinde kalıntı gerilme oluşumunun azaltıldığı bilinmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında SA387 91 Sınıfı Tip 2 Malzemenin farklı ön ısı sıcaklıkları uygulamaları ile yapılan kaynak işleminde oluşan farklı kalıntı gerilmelerin mekanik özelliklere etkileri irdelenecektir.

2.5 Ön Isı ve Gerilim Giderme Tavlaması

2.5.1 Kaynak Öncesi Ön Isı Uygulaması

Ön ısı uygulamasının amacı kaynak sırasında ana malzemede meydana gelen ani ısınma soğumanın sınırlandırılması ile kalıntı gerilmelerin ve istenilmeyen faz dönüşümlerinin önüne geçmektir. Bu şekilde çatlak oluşumuna meyilli malzemelerde de kaynak işlemi sırasında çatlak oluşumu da engellenmektedir. Ön ısı uygulaması ana malzemenin ısıtılma işlemi olup ana malzemenin istenilen sıcaklığa ulaştığından emin olunmalıdır. Alev ile yapılan ön ısı uygulamalarında alev kaynağı uzaklaştırıldıktan en az 30 saniye sonra ölçüm alınarak ana malzemenin yüzeyinin değil de tüm cidarının ısındığından emin olunmalıdır. Bu tez çalışması kapsamında ön ısı uygulaması ısıtım işlem cihazı kullanılarak yapılacak olup, malzemenin sıcaklığı sabit 2 adet termokupol ile ölçüm alınarak takip edilecektir.

Isı girdisi kaynak parametrelerinin değişimi ile değişebilmekteyken ön ısı uygulaması tamamen dışarıdan bir ısı kaynağı yardımı ile ana malzemenin ısıtılması işlemidir. Isı girdisinin artışı ile ısı tesiri altında kalan bölgenin genişliğinin artması ve buna bağlı olarak daha geniş bir bölgede ani ısınma soğumaların meydana gelmesi neticesinde mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesi durumu var iken ön ısı uygulaması ile ana malzemede ani soğumalar engellendiği için kalıntı gerilmeler sınırlandırılmakta ve bu sayede ana malzemenin mekanik özelliklerinde kaynak işlemi nedeniyle oluşacak olan olumsuzluklar azaltılmaktadır.

Francis, Cantin ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada; Normalleştirme sıcaklığının, tavlama sıcaklığının ve tungsten içeriğinin sürünme dayancına etkilerinin iyi bilindiği belirtilmiş ve ilginç bir şekilde, kaynak sırasındaki ön ısıtma sıcaklığının da kırılma dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, ancak kaynak ısı girdisinin öyle olmadığı belirtilmiştir. (Francis, Cantin et al. 2009)

Ön ısı ile ısı girdisi arasında kırılma dayanımının farklı olması yukarıda açıklandığı şekilde ısı girdisi ısı tesiri altında kalan bölgeye (ITAB) direk olarak etki ederken, ön

ısıtma tüm cidarda homojen bir ısı dağılım oluşturarak yavaş ve daha homojen bir soğuma sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Srivastava, Tewari ve arkadaşlarının 2010 yılında yaptığı çalışmada ön ısıtmanın çekme gerilemelerini düşürdüğü ve aynı zamanda daha düşük soğuma hızı sağladığı üzerinde durulmuştur. Ön ısıtmanın çekme gerilmelerini ve soğuma hızını azaltması kalıntı gerilme oluşumunu azalttığını göstermektedir. (Srivastava, Tewari et al. 2010)

2.5.2 Kaynak Sonrası Hidrojen Giderme Isıl İşlemi

Soğuk çatlak diye tabir edilen çatlak kaynak işlemi sırasında kaynak sarf malzemelerinden ya da ortamdan gelen hidrojen atomlarının kaynak metaline geçmesi ve soğuduktan sonra moleküler (H_2) hale geçip hacmi genişleyerek kendini dışarı atması neticesinde oluşan çatlaklardır. Soğuk çatlak diye tanımlanmasının nedeni bu çatlağın kaynak metali soğuduktan saatler sonrasında meydana gelmesidir.

“Postheating” ya da “Dehydrogenation heat treatment (DHT)” şeklinde tabir edilen kaynak işlemi sonrası hidrojen giderme ısıtma işlemi 300-350C aralığında minimum 20dk beklenilerek atomik halde bulunan hidrojenin kaynak metali soğumadan (moleküler hale geçmeden) kaynak metalinden dışarı çıkmasını ve kaynak sırasında kaynak metaline geçen hidrojenin olumsuz etkisinden kurtulmayı amaçlayan bir ısıtma işlemidir.

2.5.3 Hidrojen Giderme Sonrası Soğuma

Modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliklerinde hidrojen giderme işleminin akabinde martenzitik dönüşümün tamamlanması için kaynaklar 100°C'nin altına soğutulup yeteri kadar beklenmelidir. Bu çalışma kapsamında 80°C'de 2 saat bekleme yapılacaktır.

API Technical Report 938-B'de bu dönüşüm ile ilgili olarak, ASME 91 sınıfı malzemelerin kimyasal bileşim aralığının alt sınırında (0.08C, 8.0Cr, 0.85Mo, 0.20Si, 0.18V) martenzitik dönüşümün başlangıç (M_s) ve bitiş (M_f) sıcaklıkları 400C ve 209C

olduğu fakat kimyasal bileşimin üst sınırında (0.12C, 9.5Cr, 1.05Mo, 0.50Si, 0.25V) martenzitik dönüşümün başlangıç (Ms) ve bitiş (Mf) sıcaklıkları 339C ve 149C olduğu ve ihtiyatlı bir şekilde davranılarak Mf'nin 100C'nin üzerinde olduğu varsayılabilir. belirtilmektedir.

ER90S-B9 ((9 Cr-1 Mo-0.2V-0.07Nb(Cb)) alaşımının ısıtılması işlemi kritiktir ve yakından kontrol edilmelidir. Mikroyapının tamamen martenzite (Mf) dönüştüğü sıcaklık nispeten düşüktür; bu nedenle, kaynak tamamlandıktan sonra ve kaynak sonrası ısıtılma işleminden önce, martenzite dönüşümü en üst düzeye çıkarmak için kaynağın en az 200°F [93°C] sıcaklığa kadar soğumasına izin verilmesi önerilir. (AWS A5.28 / ASME SFA 5.28)

2.5.4 Kaynak Sonrası Gerilim Giderme Tavlama (PWHT)

PWHT ısıtılması işlemi kaynak sonrası kalıntı gerilmeleri azaltmak amacıyla uygulanan bir ısıtılma işlemidir. Faz dönüşümü olmaması için PWHT sıcaklığının Ac₁ dönüşümünün altında olması gerekmektedir. Alaşımın kimyasal kompozisyonu Ac₁ dönüşüm sıcaklığını değiştirdiği için uygulanabilecek maksimum PWHT sıcaklığının sınırlandırılmasında kimyasal kompozisyon önem arz etmektedir.

P91 sınıfı çeliklerin kaynakları kalıntı gerilimi azaltmak ve kaynağın performansını artırmak için genellikle kaynak sonrası ısıtılma işlemine tabi tutulur. PWHT uygun bir sıcaklık ve sürede gerçekleştirilirse, kaynaklı bağlantı uygun mekanik özellikler sergiler. Ancak, PWHT sıcaklığı çok düşükse, yetersiz temperleme nedeniyle kaynak metali yetersiz tokluk gösterir. Öte yandan, PWHT sıcaklığı çok yüksekse, ortam ve yüksek sıcaklıklardaki çekme mukavemeti, aşırı temperleme nedeniyle yetersiz kalır. Özellikle PWHT sıcaklığının kaynak metalinin Ac₁ dönüşüm noktasını aştığı durumlarda, kaynak metali ters dönüşüme uğrar, bu da yüksek çekme dayanımına sahip ve düşük tokluğa sahip yeni martensit içeren bir mikro yapı ile sonuçlanır. Bu mikro yapı, kaynaklı bağlantının performansını bozar. Bu sorunlardan kaçınmak için, uygulamada PWHT sıcaklığı kontrol edilir. (Taniguchi and Yamashita 2013)

P91 kaynaklı parçalar, gerilim giderme amacıyla ve optimum mekanik özelliklerin elde edilmesi için tipik olarak 760°C sıcaklıkta kaynak sonrası gerilim giderme tavlamasına (PWHT) tabi tutulur. Genel olarak PWHT sıcaklığı, alt kritik sıcaklıktan (Ac1) yaklaşık 30 –50°C daha düşüktür. Kimyasal bileşime (özellikle Ni + Mn), ısıtma hızına ve önceki ostenit tane boyutuna bağlı olarak Ac1 sıcaklığı 780°C ile 860°C arasında değişebilir. (Vimalan, G., et al. 2017)

SA 387 spesifikasyonunda 91 sınıfı malzemelerin 1040-1080C aralığında östenitleme, 730-800C aralığında da temperleme uygulandığı belirtilmektedir.

API TR 938B’de Ni+Mn içeriğine göre AC1 değişimi verilmiş ve bu çalışma kapsamında kullanılan SA 387 91 sınıfı çeliğin Ni + Mn = %0,73 olup grafiğe göre AC1 sıcaklığı yaklaşık 800C’dir.

API 938B’de 91 sınıfı çeliklerde 732C’ye kadar temperlemenin başlamadığı belirtilmekte ve PWHT sıcaklığı için;

- Yardımcı tesisler için 760°C ± 14°C
- Rafineri proses servisleri için 775°C ± 10°C olması önerilmektedir.

ASME Sec VIII-1 kazanlar ve basınçlı kaplar için gereklilikleri belirten kod içerisinde 15E grubu malzemeler için minimum PWHT sıcaklığı olarak 705°C verilmiştir. Bekleme süresi olarak da 125mm et kalınlığına kadar 2 dakika/mm oranı verilmiş olup en düşük bekleme süresi de 30dakika ile sınırlandırılmıştır.

ASME B31.3 basınçlı hatlar için gereklilikleri belirten kod içerisinde tablo 331.1.1’de kaynak sonrası gerilim giderme tavlaması ile ilgili bilgiler verilmiş olup P-No. 15E için bekleme sıcaklığı 705C-775C arasında sınırlandırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında PWHT sıcaklığı olarak 755°C, bekleme süresi olarak ta 2 saat belirlenmiştir.

2.5.4.1 PWHT Isıtma Hızı

Vimalan, G., ve arkadaşları 2017’de yapmış oldukları çalışma sonucunda PWHT sıcaklığı Ac1 sıcaklığından yaklaşık 12°C daha düşük olduğunda, P91 çeliğinde alfa ferrit fazı ve yeni temperlenmemiş martensit oluşabileceğini göstermiştir. Ayrıca ısıtma hızının Ac1 sıcaklığı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu görmüş, 28°C/saat ısıtma hızında, Ac1 kaynak metali için yaklaşık 792°C iken, 220°C/saat ısıtma hızı için Ac1 yaklaşık 812°C olduğu belirtmişlerdir.(Vimalan, Ravichandran et al. 2017)

Vimalan ve arkadaşlarının 2017 yılında yayınlamış olduğu çalışmada gerilim giderme tavlaması sırasında ısıtma hızının Ac₁ sıcaklığını değiştirdiği belirtildiği için ısıtma hızı belli bir değeri geçmemelidir.

ASME SEC VIII Bölüm 1’de 425°C’nin üzerinde ısıtma hızının 222°C/saat’in inç olarak kalınlığa bölünmesinden fazla olmaması fakat hiçbir koşulda da 222°C/saat’i aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Yapılacak deneysel çalışmalarda 550°C’ye kadar 120°C/saat hız ile ısıtma yapılması ve akabinde 755°C’ye 80°C/saat hızla ısıtılarak çıkılması planlanmıştır. API 938-B’de 550°C-600°C’ye kadar modifiye edilmiş 9Cr-1Mo eliğinde herhangi bir yaşlanma olmadığı belirtildiği için bu sıcaklığa kadar ki ısıtma hızı 550°C üzerindeki hızdan daha yüksek seçilmiştir.

2.5.4.2 PWHT Soğutma Hızı

Bu alaşımların (P91/T91) Sürekli Soğutma Dönüşümü (CCT) diyagramları nispeten basittir ve temel olarak hepsinde ikinci faz çökeltilerinin varlığı ostenit, ferrit ve martensit olmak üzere üç fazlı alanları gösterir. P91/T91çeliklerinin CCT diyagramının temel özellikleri iki kritik soğutma hızı değerini içerir: C_α (artan soğutma hızlarında) tamamen ferritik bir mikroyapı elde etmek için maksimum soğutma hızını temsil eder ve C_m, tamamen martensitik bir mikro yapıya sahip olmak için minimum soğutma hızı miktarıdır (azalan soğutma hızlarında). Bu iki değer arasındaki soğutma hızları için, nihai mikro yapı, martensit ve ferritin (çökeltilerle birlikte) karışımıdır.(Carrizo, Besoky et al. 2019)

ASME SEC VIII Bölüm 1'de 425°C'nin üzerinde soğutma hızının 280°C/saat'in şeklinde her 1 inç için 280°C/saat olarak verilmiş ve bu soğuma hızının inç olarak kalınlığa bölünmesinden çıkan değerden daha fazla soğutma hızı olmaması fakat hiçbir koşulda da 280°C/saat'i aşmaması belirtilmiştir. Yapılacak deneysel çalışmalarda 550°C'ye kadar 80°C/saat hız ile soğutma yapılması ve akabinde 300°C'ye kadar 120°C/saat hızla soğutulması ve daha sonra izolasyon altında soğumaya bırakılması planlanmıştır. API 938-B'de 550°C-600°C'ye kadar modifiye edilmiş 9Cr-1Mo eliğinde herhangi bir yaşlanma olmadığı belirtildiği için bu sıcaklığa kadar ki soğutma hızı 550°C altındaki hızdan daha düşük seçilmiştir.

2.6 Tahribatsız Muayene

Tahribatsız muayene malzemeye hasar vermeden kontrol etmeyi tarifleyen genel bir tanımdır. Genel olarak yüzey kontrolü ve hacim kontrolü olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Bu tez kapsamında deney numunelerine yüzey kontrol yöntemleri olarak görsel muayene ve sıvı penetrant testi, hacim kontrol yöntemlerinden radyografik muayene ve ileri tahribatsız muayene yöntemlerinden faz taramalı ultrasonik muayene (PAUT: Phased Array Ultrasonic Testing) uygulanacaktır.

Tahribatsız muayene öncesinde uygulanacak yönteme göre muayene yüzey hazırlığı büyük önem arz eder. Eğer yüzeyde yağ, kir, pas gibi süreksizliğin yüzeyini tıkayan istenilmeyen kalıntılar var ise ya da prob ile yapılacak bir kontrolde probun oturacağı yüzeyde sıçrıntı, kirlilik gibi prob hareketini engelleyen kusurlar var ise uygulanacak olan tahribatsız muayenede süreksizliklerin tespit olasılığı azalmaktadır. Bu nedenle tahribatsız muayeneye başlamadan önce muayene edilecek yüzeyin uygulanacak olan kontrol yöntemine göre uygunluğunun mutlaka kontrol edilmesi gerekmektedir.

2.6.1 Görsel Muayene

Görsel muayene tahribatsız muayenenin ilk aşamasıdır. Direkt gözle muayene ve endirekt (uzaktan) gözle muayene olmak üzere iki uygulama metodu vardır. Bu tez

çalışması kapsamında direkt gözle muayene ile kaynak ağzı hazırlığı, kaynak için ön birleştirme (fit-up) uygunluğu ve kaynakların kep ve kök bölgeleri kontrol edilecektir.

Kaynakların görsel muayenesi 2 aşamada yapılmaktadır. İlk muayene kaynak ağzı hazırlığı ve fit-up (kaynak için ön birleştirme) sırasında yapılarak kaynak ağzının ve fit-up'ın istenilen özellikleri sağlayıp sağlamadığından emin olunduktan sonra kaynak işlemine geçilir. İkinci görsel muayene uygulaması kaynak işlemi tamamlandıktan sonra görülebilen kusurların tespiti için yapılmaktadır. Görsel muayenede görülebilen kusurlar eğer kabul kriterlerini aşıyor ise kaynak reddedilir ve yapılabilir ise tamir yapılır, eğer kabul kriterlerini aşmıyor ise bu kusurlar kayıt altına alınır. Bu sayede diğer muayene yöntemlerinde bu kusurların daha sağlıklı değerlendirmesi yapılabilir ve yanıltıcı belirtiler nedeniyle değerlendirme hatalarından kaçınılabilir.

2.6.1.1 Direkt Gözle Muayene

Direkt gözle muayene göz ile muayene yüzeyi arasında kesintisiz bir optik yolun bulunduğu gözle muayene olup muayene sırasında muayene yüzeyinde Avrupa standardı EN ISO 17637 Ergitme Kaynaklarının Gözle Muayenesi'ne göre en az 350lx (fakat 500lx önerilmektedir), Amerikan standardı ASME BPVC Section V Article 9 Visual Examination koduna göre ise en az 1076lx (100fc) aydınlanma şiddeti sağlanmalıdır. Bu muayene sırasında iki standart da göz ile muayene bölgesi arasındaki mesafenin en fazla 600mm olabileceğini ve bakış doğrultusu ile muayene yüzeyi arasındaki açının da 30°C'den az olmaması gerektiğini belirtmektedir. Görme açısını iyileştirmek için yardımcı olarak ayna veya detaylı inceleme için mercekle kullanılabilir. Bu tez kapsamında ASME BPVC Section V Article 9 Visual Examination kodunda belirtilen kriterler baz alınacaktır ve herhangi bir yardımcı araç kullanılmayacaktır.

2.6.1.2 Endirekt (Uzaktan) Gözle Muayene

Direkt gözle muayenenin yapılamadığı durumlarda optik araçlar (kamera, boroskop, videoskop, endoskop, ayna gibi) yardımıyla yani göz ile muayene yüzeyi

arasında kesintili bir optik yolun bulunduğu gözle muayenedir. Aydınlatma şartları genel olarak direkt gözle muayenedeki gibi olmakla birlikte yüzeyde aydınlatma ölçülemediği takdirde (videoskop, boroskop, endoskop vb. kullanıldığında) yüzeyde parlama, yansıma gibi muayeneyi etkileyebilecek uygunsuz durumların olmaması yeterlidir. Bu tez kapsamında endirekt gözle muayene uygulaması yapılmayacaktır.

2.6.2. Sıvı Penetrant Testi

Sıvı penetrant testi teflon ve gözenekli yüzeyli malzemeler dışında ki her malzemenin yüzeye açık kusurlarının tespiti için uygulanan bir yüzey muayene yöntemidir. Penetrant adı verilen girici özelliği olan kimyasal muayene yüzeyine uygulanır ve kapiler etki sayesinde yüzeye açık süreksizliğin içerisine nüfuz etmesi beklenir. Bu nüfuziyet süresi muayene edilecek malzemenin ve penetrantın tipine göre belirlenir. Daha sonra yüzeyden fazla penetrant temizlenir ve akabinde geliştirici uygulanır. Temizleme işleminde eğer temizleyici spreyci çözelti ise süreksizlik içerisinde bulunan penetrantıda çıkartmaması için yüzeye direk olarak püskürtülmemeli, bir beze sıkılarak bez ile yüzey tek yönlü olarak temizlenmelidir. Eğer temizleyici madde su ise yani penetrant su ile temizlenebilir penetrant ise su yüzeye su basıncı 50 psi'yi (350 kPa) ve su sıcaklığı 43°C'yi (110°F) aşmayacak şekilde tatbik edilmelidir. Ayrıca penetrant ürün ailesi (penetrant, temizleyici, geliştirici) aynı markanın olmalı ve birbiri ile uyumlu olmalıdır.

ASME BPVC Section V Article 6 Liquid Penetrant Examination Koduna göre penetrant testi 4°C ile 52°C muayene yüzey sıcaklığı aralığında uygulanabileceği belirtilir iken EN ISO 3452-1 Penetrant Testi standardında 10°C ile 50°C aralığındaki yüzey sıcaklıkları için uygulanabileceği belirtilmektedir. Bu belirtilen sıcaklıkların dışında da sıvı penetrant testi uygulanabilmekte olup özel uygulamalar Amerikan standartları için ASME Section V için Article 6 Mandatory Appendix III Qualification techniques for examinations at nonstandard temperatures, Avrupa standartları için EN ISO standartları için ISO 3452-5, Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 5: Penetrant testing at temperatures higher than 50 degrees C ve ISO 3452-6, Non-

destructive testing — Penetrant testing — Part 6: Penetrant testing at temperatures lower than 10 degrees C standartlarına uygun şekilde yapılmalıdır.

Tablo 2. 12 Penetrant ürün ailesi sınıflandırması (EN ISO 3452-1 Penetrant Testi standardı baz alınarak hazırlanmıştır)

Penetrant		Fazla Penetrant Giderici		Geliştirici	
Tip	Adlandırma	Metod	Adlandırma	Form	Adlandırma
I	Fluoresan	A	Su	a	Kuru
II	Renkli kontrast	B	Lipofilik emülsiyonu (Yağda Çözünen)	b	Suda çözünmeyen
III	Hem renkli hemde fluoresan	C	Çözücü	c	Suda askıda bulunan
		D	Hidrofilik emülsiyonu (Suda Çözünen)	d	Çözücü bazlı (sulu olmayan tip I için)
		E	Su ve çözücü	e	Çözücü bazlı (sulu olmayan tip II ve III için)
				f	Özel uygulamalar
				g	Geliştiricisiz (Yalnızca Tip I)

Bu tez çalışması kapsamında yukarıdaki tabloya göre IICe ürün ailesi kullanılacaktır. Yüzey sıcaklığı olarak test sırasında 10°C ile 50°C aralığında test yapılacaktır.

2.6.3 Radyografik Muayene

Radyografik muayene, bir kaynaktan çıkan radyasyon ışınının, kontrol edilmek istenilen malzeme üzerine yönlendirilerek malzeme içerisinden geçirilmesi sırasında ana malzeme, boşluk veya kalıntıların radyasyonu soğurma farkından yararlanılarak film üzerine gelen ışının farkının oluşturduğu görüntü farkları sayesinde yapılan muayene yöntemidir.

Bu tez kapsamında yapılacak olan radyografik muayene ASME BPVC Section V Article II Radiographic Examination koduna göre yapılacak olup, ışınım kaynağı

olarak gamma ray kullanılacaktır. Penetrametre (IQI: Image Quality Indicator) ışıının kaynağına konulacak, ASTM 1B 11 penetrametre kullanılacak ve 16mm malzeme kalınlığı için en az 8 numaralı tel görülebilir olacaktır. Film yoğunluğu 2-4 arasında olacaktır.

2.6.4 Faz Taramalı Ultrasonik Muayene (PAUT)

PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) olarak bilinen faz taramalı ultrasonik muayene yöntemi, ultrasonik probundan farklı zamanlarda ses ateşlemeleri yapılarak farklı açılarda ses demetleri üretilen ve bu sayede geleneksel ultrasonik muayene de ki gibi probun ileri geri hareket ettirilmesine gerek kalmadan, lineer ve S (kesit) tarama yapılarak tarama imkanı sağlanan bir ileri tahribatsız muayene yöntemidir. Bu muayenede birçok proba ileri geri prob hareketi yapılan konvansiyonel ultrasonik tarama yerine bir prob ile sabit projeksiyon mesafesinde lineer bir şekilde tek bir tarama yapılabilmektedir. Bu yöntemde aynı zamanda ekran tarama görüntüsü ve tarama verileri ile de muayene kayıt altına alınabilmektedir. Kayıt alınabilme özelliği sayesinde ileride süreksizliklerin tekrar incelenmesine ve süreksizliğin durumunu geçmiş durumuna göre kıyaslanabilmesine imkân sağlamaktadır.

2.7 Tahribathı Muayene

Bu tez çalışması kapsamında makro yapı incelemesi, kesitin vickers mikro sertlik ölçümü, mikroyapı incelemesi, üç nokta eğme deneyi ve çekme deneyleri yapılacaktır.

2.7.1 Makro Yapı İncelemesi

Makro yapı incelemesi için kaynaklı plakadan enine kesit alınacak ve %5'lik nitel çözeltisinde ergime bölgeleri görülebilir olana kadar dağlama yapılacaktır. Isıdan etkilenen bölgenin genişliği ölçülecek ve ergime durumu değerlendirilecektir. Yüzey hazırlığı sırasında yüzey sırasıyla P150 – P400 – P600 zımpara kağıtları ile zımparalanacaktır.

2.7.2 Vickers Mikro Sertlik Ölçümü

Vicker mikro sertlik ölçümünde 136° tepe açılı tabanı kare piramit olan bir elmas uç malzeme yüzeyine batırılarak malzeme yüzeyinde oluşturduğu izin köşegenleri ölçülür ve bu sayede malzemenin sertlik değeri belirlenir. Burada temel prensip ucun malzeme yüzeyine ne kadar battığının ölçümü ile malzemenin bu uca karşı direncini belirlemektir. Bu direnç malzemenin sertliğini belirler. Bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan vickers mikro sertlik ölçüm deneyleri 10kg yük altında gerçekleştirilecektir.

2.7.3 Mikroyapı İncelemesi

Mikroyapı incelemesi malzeme içerisinde oluşan farklı fazların ve kalıntıların değerlendirilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Bu incelemede malzemeden bir kesit çıkarılır ve bakalite alınır. Daha sonra incelenecek olan yüzey zımparalanır, parlatılır ve dağlanarak mikroskop altında inceleme yapılır. Bu tez çalışması kapsamında “ASTM E407 – Standard Practice for Microetching Metals and Alloys” standardında tablo 1’de “Fe + 4–12 Cr” aralığındaki malzemeler için tablo 2’de önerilen 80 numaralı dağlayıcı kullanılacaktır. Bu dağlayıcı endüstride “Vilellas’s Reagent” özel adı ile bilinir ve aşağıdaki bileşime sahip bir çözeltidir.

- 1 gr pikrik asit
- 5ml HCL ait
- 100ml Etil alkol

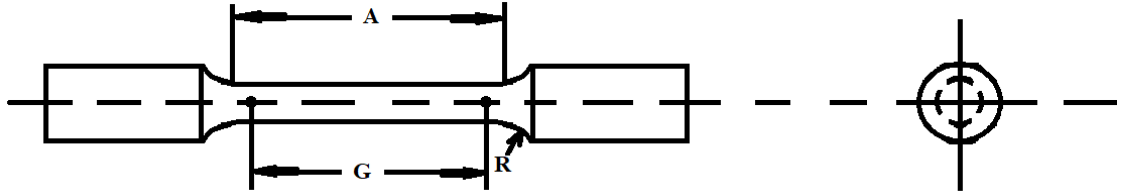
2.7.4 Üç Nokta Eğme Deneyi

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan üç nokta eğme testi yan eğme şeklinde olacaktır. Bu nedenle kaynaklı numune üzerinden enine kesitte her deney için 2’şer adet olacak şekilde eğme numuneleri çıkartılacak ve incelenecek olan yüzeyleri zımpara ile parlatılacaktır. Akabinde ASTM A370 standardında şekil A 2.14 ve A 2.15’e uygun olacak şekilde testler gerçekleştirilecektir. Yan eğme yapılmasındaki

amaç kesit boyunca ergine çizgisinde, kaynakta ve ısıdan etkilenen bölgede martenzitik yapı veya kaynak uygulamasından dolayı herhangi bir yırtılma veya süreksizlik oluşup oluşmadığının görülmesidir.

2.7.5 Çekme Deneyi

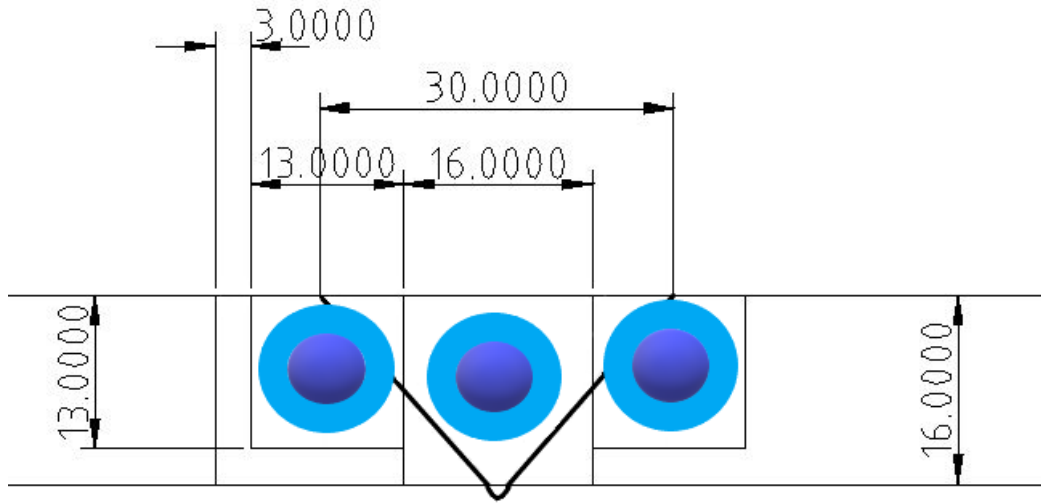
Bu tez çalışması kapsamında ısı tesiri altındaki bölgelerden (ITAB), kaynaktan ve ana malzemeden boyuna yönde ve kaynaklı birleştirmeden de enine yönde dairesel çekme çubukları çıkartılacak olup numunelerin akma dayancı, çekme dayancı, % uzaması karşılaştırılacaktır. Çekme çubukları “ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” standardında şekil 8’de belirtilen küçük boyutlu dairesel test numunelerinden 3 numaralı numune ebatları baz alınarak hazırlanacaktır.



Şekil 2. 5 ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials standardında şekil 8’de belirtilen dairesel kesitli tasla çizim

Numune 3 için ölçüler;

- A: 36mm
- G: $30,0 \pm 0,1$ mm
- D: $6,0 \pm 0,1$ mm
- R: 6mm



Şekil 2. 6 Kaynak bölgesinden çıkartılacak olan boyuna çekme çubuklarının kesit görüntüsü.

Şekil 2.6’da Mor olan kısım 6mm çaplı boyun kısmının, Mavi olan kısım ise çenelerin tutacağı 10mm çaplı kavrama bölgesinin numune üzerinde geldiği konumlarını göstermektedir.

Hazırlanacak olan küçük ebatlı dairesel çekme çubuklarının kaynaklı plaka üzerindeki konum detayları şu şekilde olacaktır;

- Kaynağın ortasından boyuna çekme çubuğu
- Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB) için her iki taraftan da birer adet boyuna çekme çubuğu.
- Ana malzemeden (Kaynak kenarından 70mm uzaklıktan) birer adet boyuna çekme çubuğu
- Kaynak kesiti için kaynak tam merkezde kalacak şekilde bir adet enine çekme çubuğu

BÖLÜM ÜÇ UYGULAMA

3.1 Kaynak Öncesi Ön Hazırlık

3.1.1 Kaynak Ağzı Hazırlığı

Kaynak ağzı ve ısıdan etkilenen bölgede kaynak öncesinde, kesim nedeniyle ısınma soğuma olup faz dönüşümü ve kalıntı gerilmeler oluşturmaması amacıyla parçalar bor yağlı şerit testere kullanılarak soğuk kesim yöntemiyle kesilmiştir.

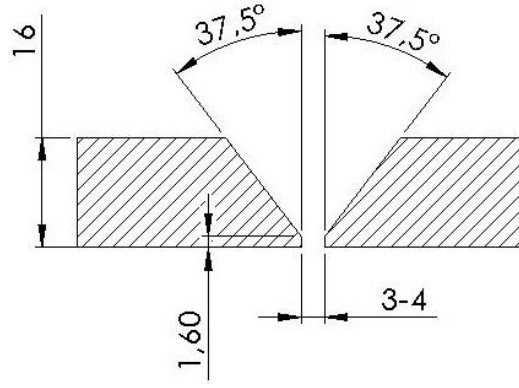


Şekil 3. 1 Plakaların şerit testere kullanılarak soğuk kesim yapıldığı esnada çekilmiş fotoğraf

Kesilen plaka boyutları 530mm X 105mm X 16mm olup kaynak ağzları aşırı ısınma olmaması için dikey işlem EUMEGA marka freze kullanılarak 37,5° olarak açılmıştır.



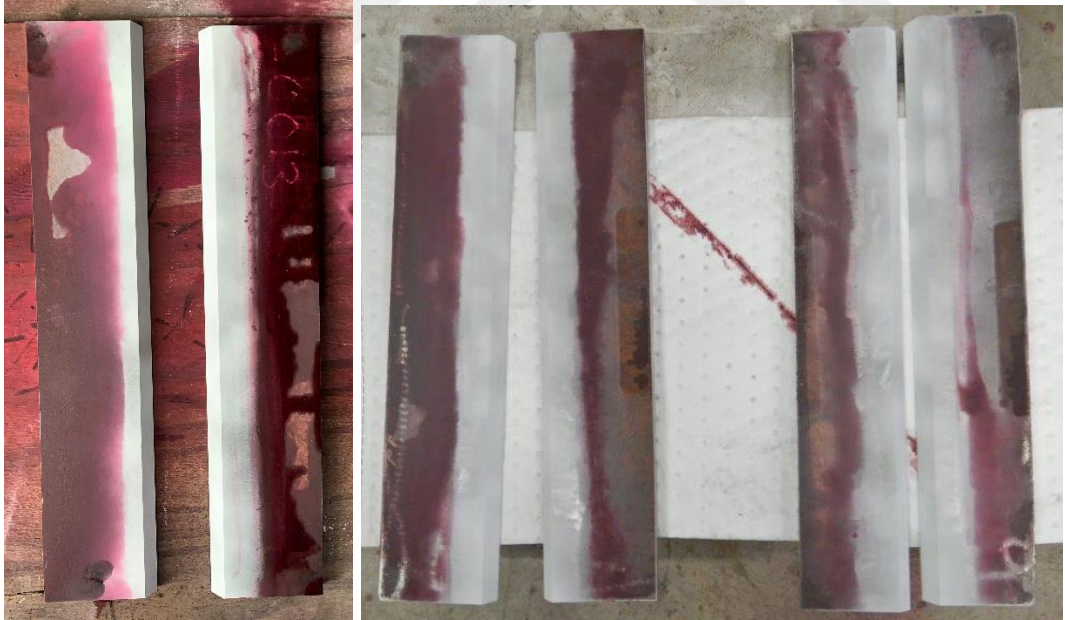
Şekil 3. 2 Kaynak ağzlarının EUMEGA freze ile açılması işlemi sırasında çekilmiş fotoğraf



Şekil 3. 3 Kaynak ağzı detayları

3.1.2 Kaynak Ağzlarına Sıvı Penetrant Testi Uygulaması

Kaynak ağzları ve kaynak sırasında ısıdan etkilenecek bölgelerde çatlak, katlanma, gözenek gibi yüzeye açık süreksizliklerin olmadığından emin olmak için sıvı penetrant testi uygulanmıştır.

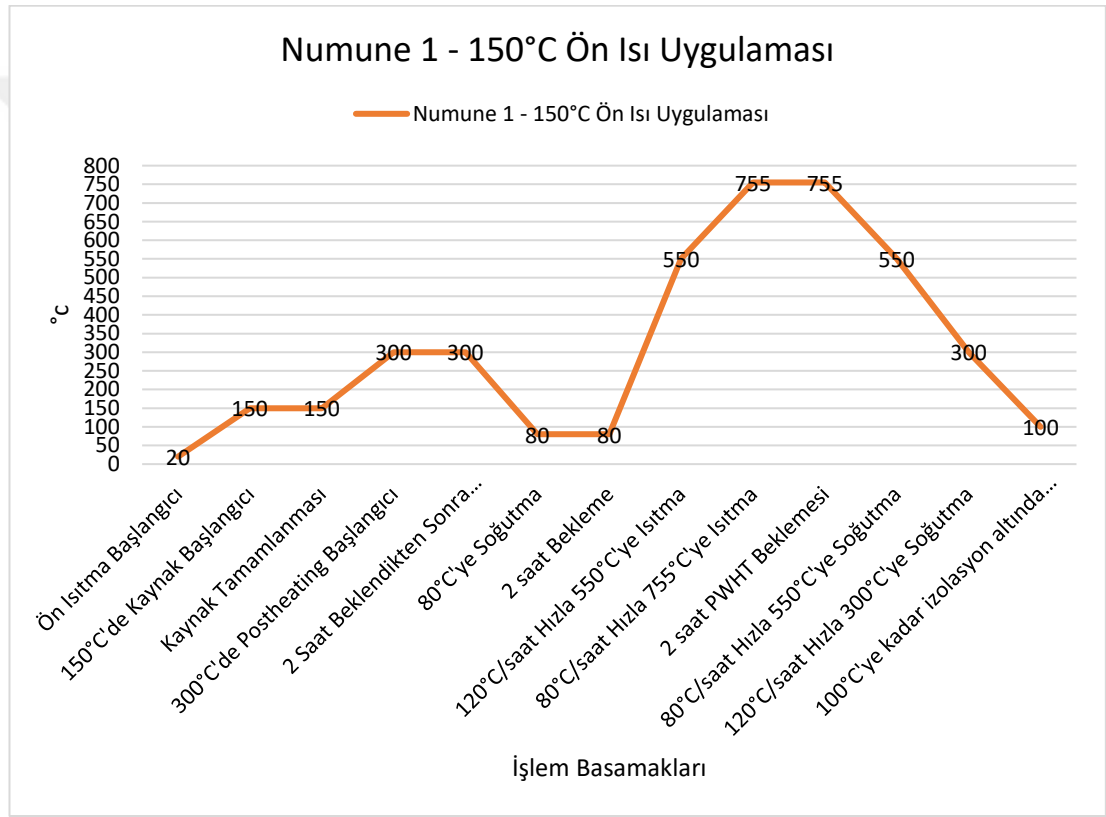


Şekil 3. 4 Kaynak ağzı yüzeylerinin kaynak işlemi öncesinde sıvı penetrant testi ile kontrolü

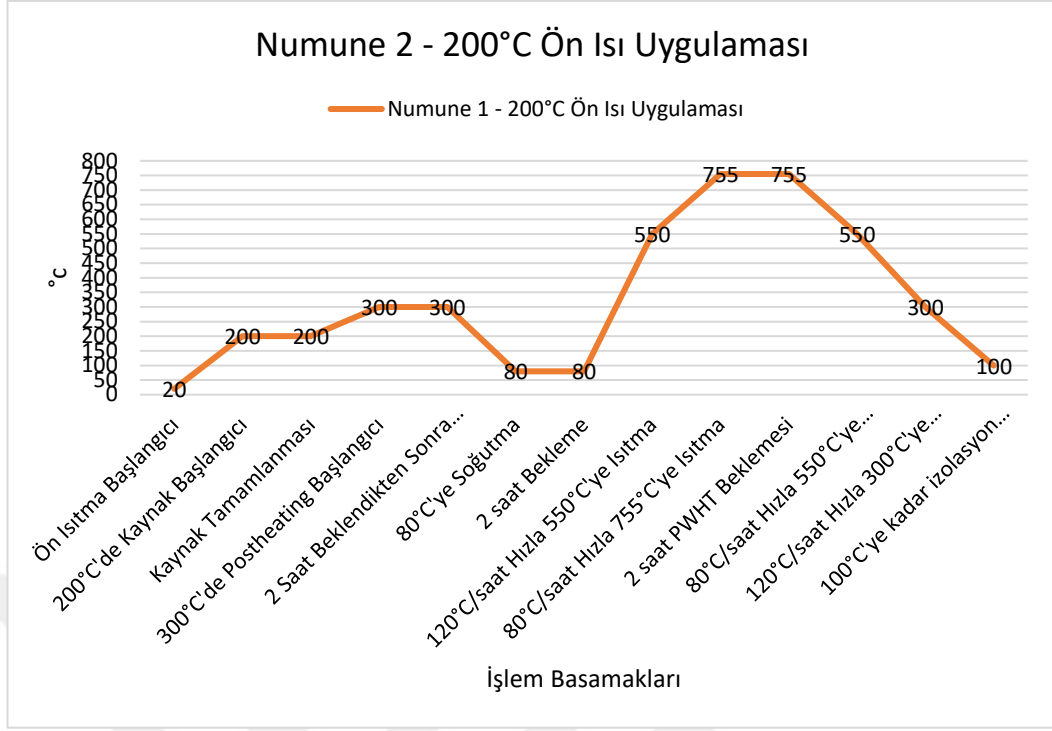
Penetrant testlerinde ürün ailesi olarak Pfinder 860 görünür kontrast penetrant, Pfinder 890 temizleme solvent spreyi, Pfinder 871 gelişrici sprey kullanılmıştır.

3.2 Ön Isı ve Isıl İşlem Planı

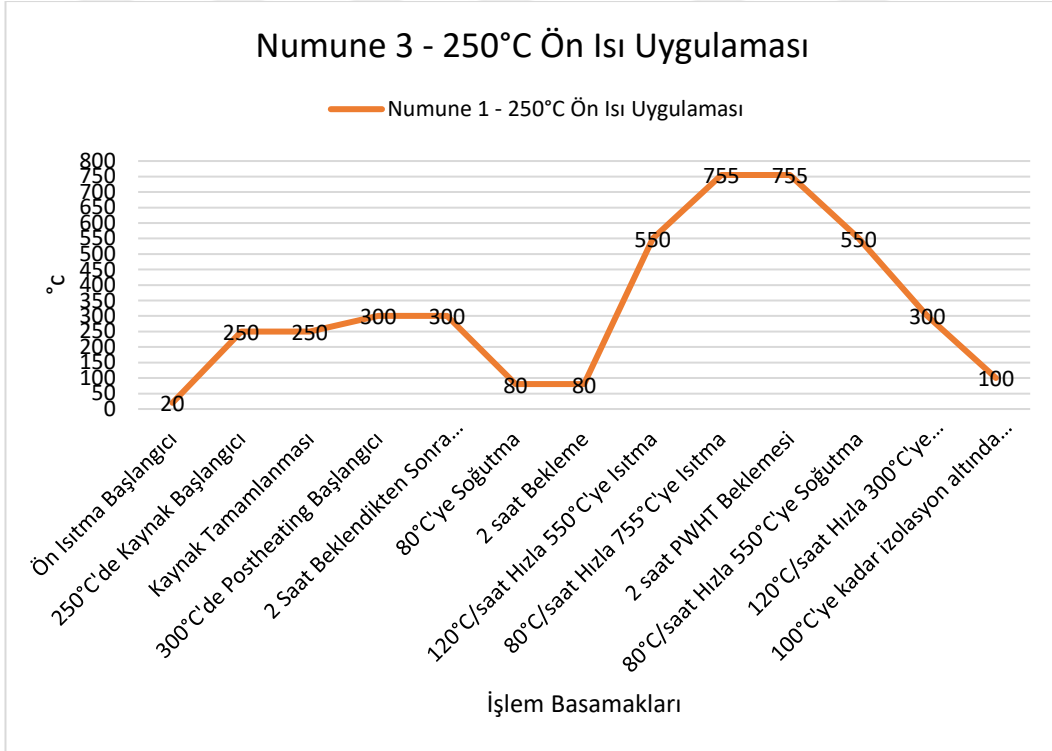
Bu tez çalışması kapsamında ön ısıtmanın kalıntı gerilmeler ve faz dönüşümlerine olan etkisi ile mekanik özellikler arasındaki ilişki irdelenmektedir. B nedenle 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulaması ile 3 farklı kaynak işlemi yapılacaktır. Tez çalışması kapsamında kullanılan ana malzeme ASTM SA 387 Grade 91 Tip 2 çelik plaka olup tamamen söndürülmüş, ince taneli 1050°C’de normalize edilmiş ve akabinde 780°C’de temperlenmiş martenzitik-ferritik mikroyapıya sahiptir.



Şekil 3. 5 150C ön ısı uygulanan numune 1 için kaynak ısıl işlem planı



Şekil 3. 6 200C ön ısı uygulanan numune 2 için kaynak ısıl işlem planı



Şekil 3. 7 250C ön ısı uygulanan numune 3 için kaynak ısıl işlem planı

3.2.1 Ön Isı Uygulaması

Ön ısı uygulaması ısıtıl işlem cihazı yardımı ile yapılmış olup 2 adet termokupol bağlantısı ile sıcaklık kontrolü sağlanmıştır. Aynı zamanda ısı tebeşiri ve lazerli sıcaklık ölçer ile de çapraz kontrol yapılmıştır. Sıcaklık bir üst deney sıcaklığına geldiğinde kaynak durdurulmuş ve olması gereken ön ısı sıcaklığına indikten sonra tekrar kaynağa başlanmıştır.



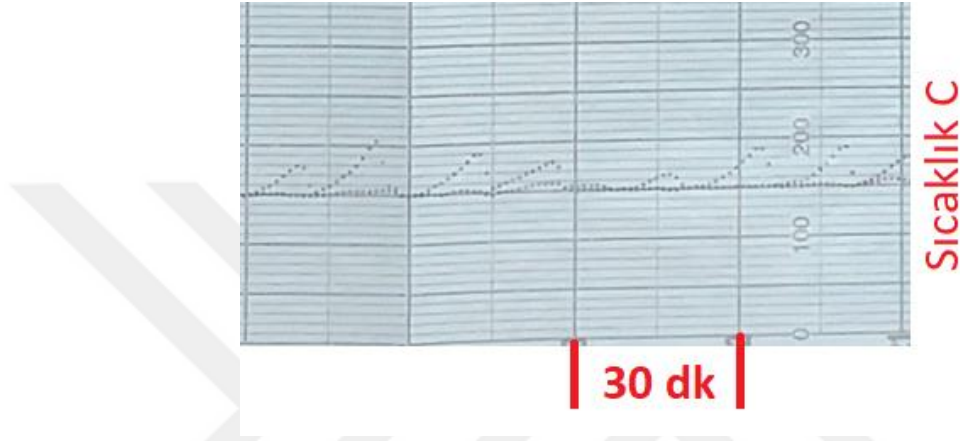
Şekil 3. 8 Kaynak öncesi ve sırasında ısıtma ve sıcaklık kontrolünün sağlanması için kurulan ısıtıl işlem düzenekleri



Şekil 3. 9 Ön ısı ve ısıtıl işlem için kullanılan Weldotherm 82 Kv 12 kanallı ısıtıl işlem makinası

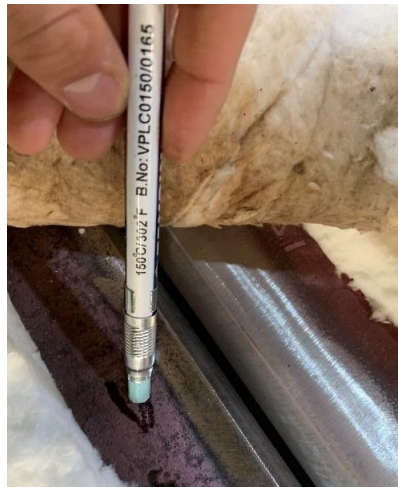
3.3.1 150°C Ön Isı Uygulaması

Her 200°C ye yaklaşıldığında veya anlık olarak geçildiği görüldüğünde kaynak bölgesinin 150°C ye soğuması için beklenilmiştir. 150°C ön ısı uygulaması sırasında 87 kere sıcaklık yükselmesi nedeniyle bekleme yapılmış ve kaynağın tamamlanması 25 saat sürmüştür.



Şekil 3. 10 150°C ön ısı kontrollü kaynatılan plakanın ısıtım cihazı grafiğinden temsili kesiti.

Şekil 3.10'da yatay ekseninde her 30dk lık zaman dilimine karşılık gelen mesafe için örnek bölge kırmızı çizgiler ile gösterilmiş olup, dikey ekseninde grafik üzerinde görülen rakamlar °C olarak sıcaklık değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 3. 11 150°C ön ısı kontrollü kaynağa başlamadan önce malzeme sıcaklığının 150°C ısı tebeşiri ile kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf



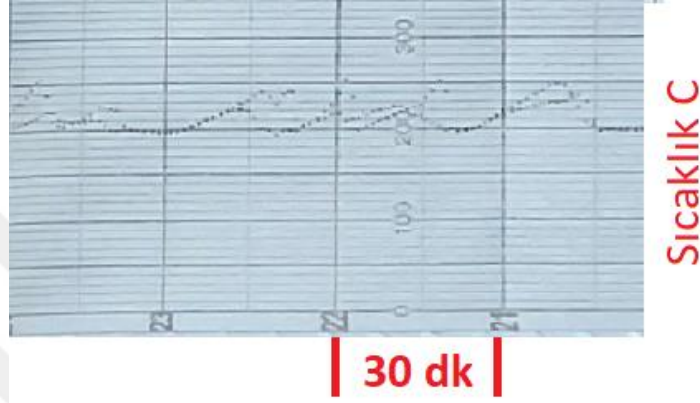
Şekil 3. 12 150°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında 150°C ısı tebeşiri ile malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf



Şekil 3. 13 150°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında lazerli sıcaklık ölçerle malzeme sıcaklığının kontrolleri sırasında çekilmiş fotoğraf

3.3.2 200°C Ön Isı Uygulaması

Her 250°C ye yaklaşıldığında veya anlık olarak geçildiği görüldüğünde kaynak bölgesinin 200°C ye soğuması için beklenilmiştir. 200°C ön ısı uygulaması sırasında 53 kere sıcaklık yükselmesi nedeniyle bekleme yapılmış ve kaynağın tamamlanması 16 saat sürmüştür. Isıl işlem grafiğinden temsili bir kesit aşağıda mevcuttur.



Şekil 3. 14 200°C ön ısı kontrollü kaynatılan plakanın ısıl işlem cihazı grafiğinden temsili kesit.

Şekil 3.14'te yatay ekseninde her 30dk lık zaman dilimine karşılık gelen mesafe için örnek bölge kırmızı çizgiler ile gösterilmiş olup, dikey ekseninde grafik üzerinde görülen rakamlar °C olarak sıcaklık değerlerini temsil etmektedir



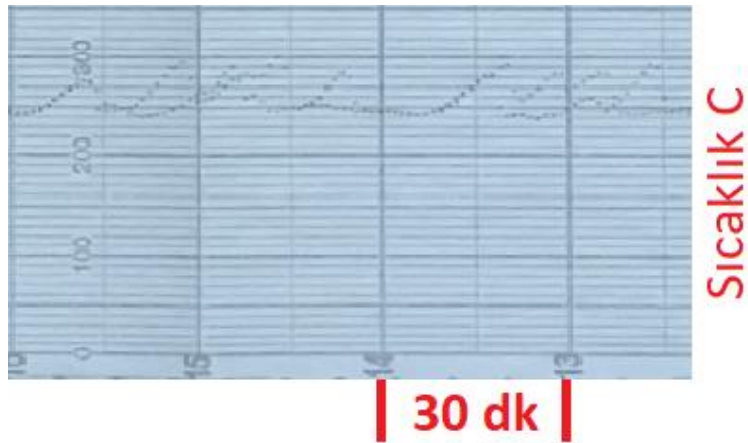
Şekil 3. 15 200°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında 200°C ısı tebeşiri ile malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf



Şekil 3. 16 200°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında lazerli sıcaklık ölçerle malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf

3.3.3 250°C Ön Isı Uygulaması

Her 300°C ye yaklaşıldığında veya anlık olarak geçildiği görüldüğünde kaynak bölgesinin 250°C ye soğuması için beklenilmiş olup 250°C ön ısı uygulaması sırasında 39 kere sıcaklık yükselmesi nedeniyle bekleme yapılmış ve kaynağın tamamlanması 11,5 saat sürmüştür. Isıl işlem grafiğinden temsili bir kesit aşağıda mevcuttur.



Şekil 3. 17 250°C ön ısı kontrollü kaynatılan plakanın ısıtım cihazı grafiğinden temsili kesiti.

Şekil 3.17’de yatay ekseninde her 30dk lık zaman dilimine karşılık gelen mesafe için örnek bölge kırmızı çizgiler ile gösterilmiş olup, dikey ekseninde grafik üzerinde görülen rakamlar °C olarak sıcaklık değerlerini temsil etmektedir



Şekil 3. 18 250°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında 250C ısı tebeşiri ile malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf



Şekil 3. 19 250°C ön ısı kontrollü kaynak sırasında lazerli sıcaklık ölçerle malzeme sıcaklığının kontrolü sırasında çekilmiş fotoğraf

3.4 Kaynak Uygulaması

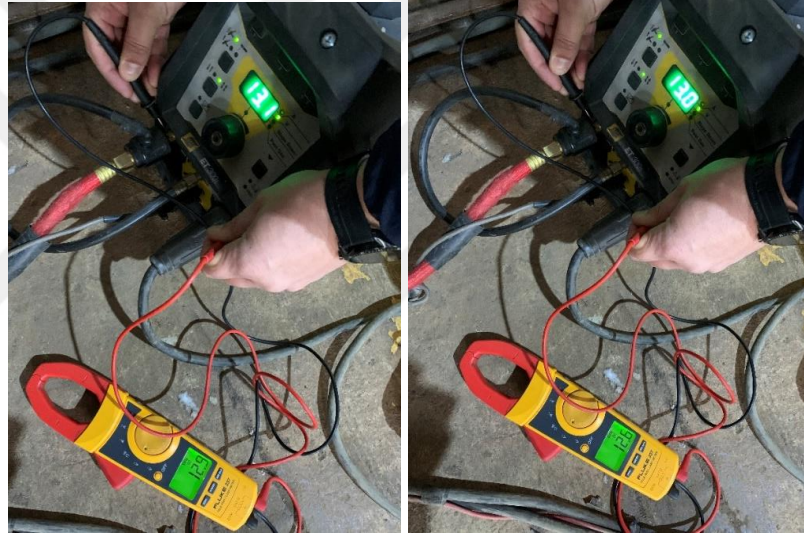
Deneylerde 16mm kalınlığında SA 387 Grade 91 Tip 2 elik plaka numuneleri kullanılmıştır. 150°C, 200°C ve 250°C n ısı sıcaklıkları weldotherm 82kV 12 kanallı ısıtıl işlem cihazı kullanılarak sağlanmış, sıcaklık kontrolleri bu ısıtıl işlem cihazının oluşturduğu grafikten takip edilerek belirlenen n ısı sıcaklığını 50°C aştığı anda müdahale edilerek kaynak durudurulmuştur. Plakaların sıcaklığı uygun hale geldiğinde ya da kaynaktan etkilenmeyip ısınmayan yani n ısı sıcaklığında kalan kısımlarında kaynak yapılarak devam edilmek suretiyle kaynaklar tamamlanmıştır. n ısı ve kaynak işlemi boyunca ısıtıl işlem cihazından yapılan sıcaklık takibine ilave olarak yüzey sıcaklıkları lazerli sıcaklık ölçer ile llerek ve ısı tebeşirleri ile de doğrulanarak malzeme sıcaklığı kontrol altında tutulmuştur. Kaynak gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) yöntemi ile çok pasolu alın kaynağı şeklinde yapılmıştır. Kaynak yöntemi olarak sadece GTAW uygulanmasının amacı farklı kaynak yöntemleri nedeniyle olabilecek değişkenleri ortadan kaldırmak ve GTAW kaynak yönteminde kaynakçının kaynak banyosuna daha hkim olması nedeniyle kaynakıdan doğabilecek kaynak kusurlarını da mümkün olduğunca ortadan kaldırmaktır. GTAW kaynak yönteminde kaynak banyosu inert gaz olan argon gazı altında tutularak oksidasyondan korunmaktadır. Deney numuneleri kalıntı gerilmelerin etkilerini daha iyi irdeleyebilmek için plaka olarak seçilmiştir. Kaynak ağızları V şeklinde tasarlanmış ve arka taraftan 22 bar kök koruma gazı uygulanarak korozyona neden olabilecek hava ortamının uzaklaştırılması sağlanmıştır.



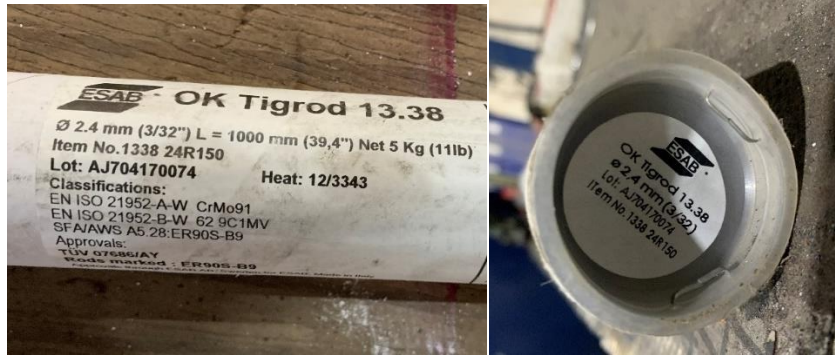
şekil 3. 20 Kök koruma gazı için U profilden yapılan kanal ve ısıtıl işlem cihazının termokupol yerleşimi



Şekil 3. 21 Kaynak makinası amper doğrulaması sırasında çekilmiş fotoğraf



Şekil 3. 22 Kaynak makinası voltaj doğrulaması sırasında çekilmiş fotoğraflar



Şekil 3. 23 Kaynak işlemi sırasında kullanılan dolgu tellerinin kutuları üzerindeki marka standart bilgilerini gösteren etiketleri

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Tahribatsız Muayene

4.1.1 Görsel Muayene

PWHT işlemi tamamlandıktan sonra kaynak ve ısı tesiri altında kalan bölge tel çanak fırça ile temizlenmiş ve akabinde görsel muayene yapılmıştır. Görsel muayene sırasında aşağıdaki süreksizlikler tespit edilmiştir.

Tablo 4. 1 PWHT sonrası gerçekleştirilen görsel muayene sırasında kep ve kök taraflarında tespit edilen süreksizlikler

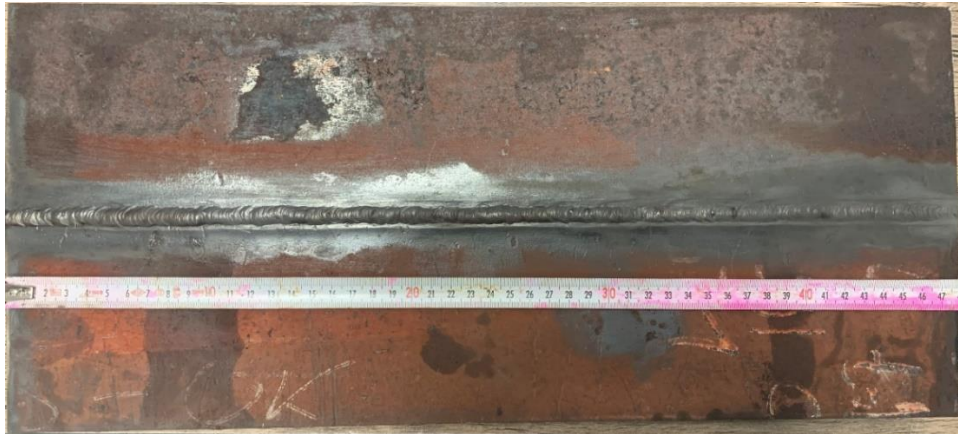
Numune	Kep	Kök
150°C Ön Isı	200-225mm aralığında 1mm kaynak düşüklüğü	280-282mm aralığında tel kesiği 288-290mm aralığında tel kesiği 325-327mm aralığında tel kesiği 351-353mm aralığında tel kesiği
200°C Ön Isı	115-190mm aralığında 1,5mm kaynak düşüklüğü 120-122mm aralığında tel kesiği 122-124mm aralığında gözenek	16-21mm aralığında ergime noksanlığı 160-162mm aralığında tel kesiği 225-227mm aralığında tel kesiği 413-419mm aralığında yan cidar ergime noksanlığı
250°C Ön Isı	Kepte boylu boyunca kaynak düşüklüğü 359-361mm aralığında tel kesiği 365-367mm aralığında tel kesiği	5-65mm aralığında kökte sarkma 66-70mm aralığında yan cidar ergime noksanlığı 200-210mm aralığında kökte sarkma 220-227mm aralığında kökte iç bükeylik, kötü başlangıç 230-253mm aralığında kökte sarkma 290-310mm aralığında kökte sarkma



Şekil 4. 1 150°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmından çekilen fotoğraf



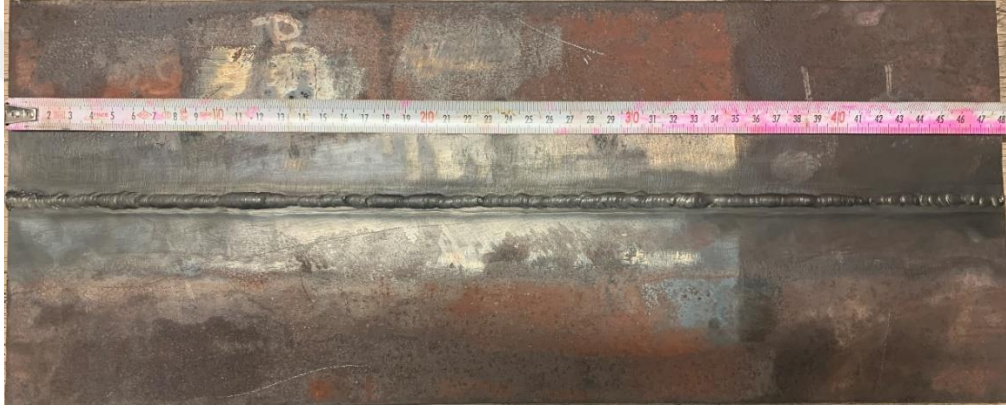
Şekil 4. 2 150°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmında 200-225mm aralığında 1mm kaynak düşüklüğü



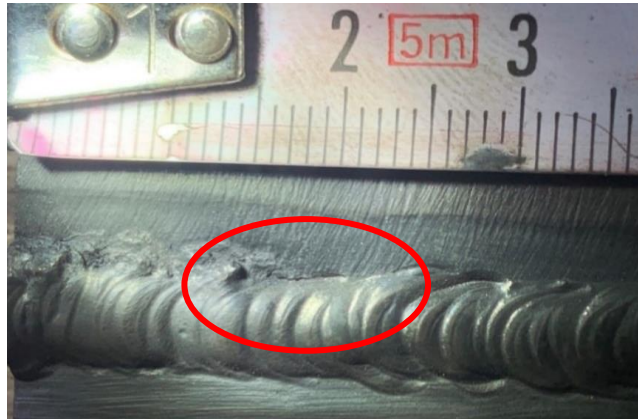
Şekil 4. 3 150°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmından çekilen fotoğraf



Şekil 4. 4 200°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmından çekilen fotoğraf



Şekil 4. 5 200°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmından çekilen fotoğraf



Şekil 4. 6 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 16-21mm aralığında kökte ergime noksanlığı



Şekil 4. 7 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 160-162mm aralığında tel kesiği



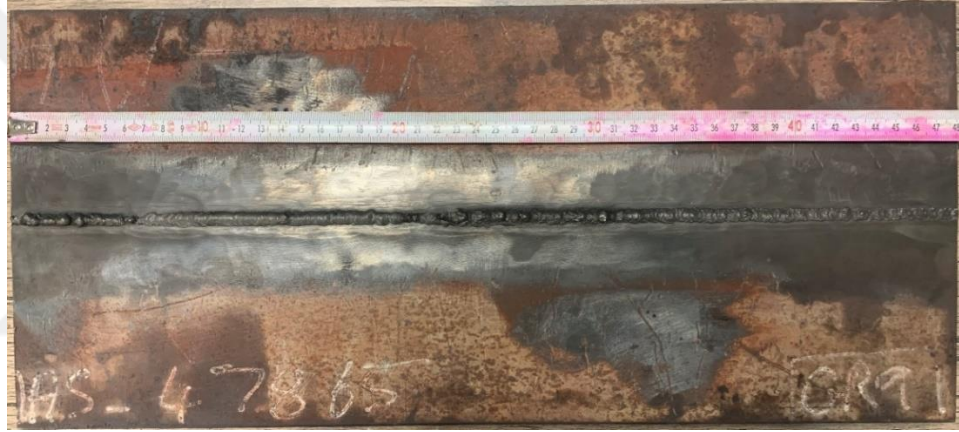
Şekil 4. 8 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 413-419mm aralığında yan cidar ergime noksanlığı



Şekil 4. 9 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmından çekilen fotoğraf



Şekil 4. 10 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep kısmında 359-361mm ve 365-367mm aralığında tel kesigi



Şekil 4. 11 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmından çekilen fotoğraf



Şekil 4. 12 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 5-65mm aralığında kökte sarkma



Şekil 4. 13 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 66-70mm aralığında yan cidar ergime noksanlığı



Şekil 4. 14 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin 190-340mm arası kök bölgesi

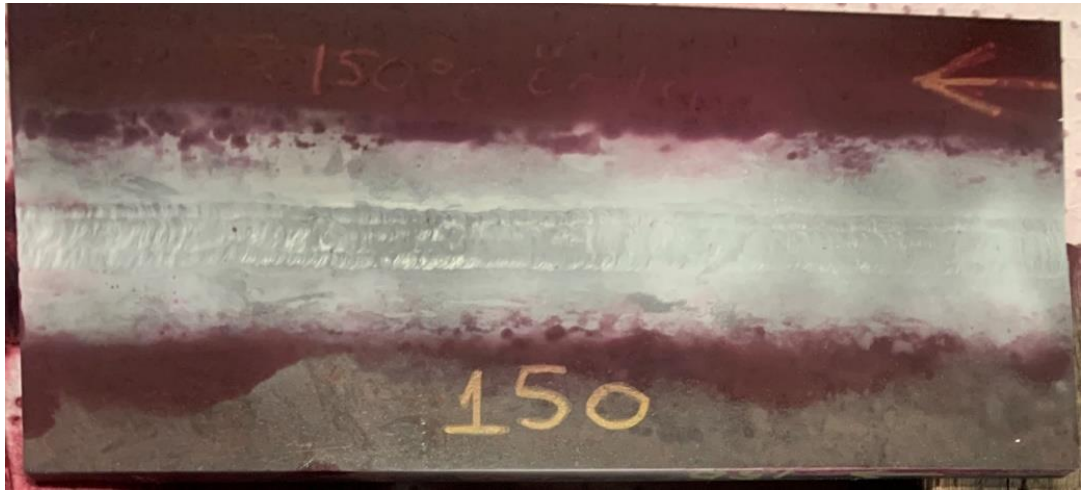
Şekil 4.14'te 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan SA 387 Gr. 91 Cl. 2 test numunesinin (PWHT sonrası) kök kısmında 200-210mm aralığında kökte sarkma, 220-227mm aralığında kökte iç bükeylik ve kötü başlangıç, 230-253mm ve 290-310mm aralığında kökte sarkma

Görsel muayene sonuçlarını içeren tablo 13'den de görüldüğü üzere ön ısı sıcaklığı artırıldıkça malzeme yüzeyinin sıcak olması nedeniyle kaynakçının köke erişimde zorlandığı için (eli-kolu ısındığından dolayı) hata yapma ve süreksizlik bırakma miktarı artmıştır. Kaynak sırasında sıcaklık arttıkça kaynak banyosu ile ana malzeme arasındaki kontrast farkının azaldığı ve kaynakçının ayırım yapmakta zorlandığı görülmüştür. Bu kontrast farkı azalmasının da kaynakçının kök kaynağında fazla

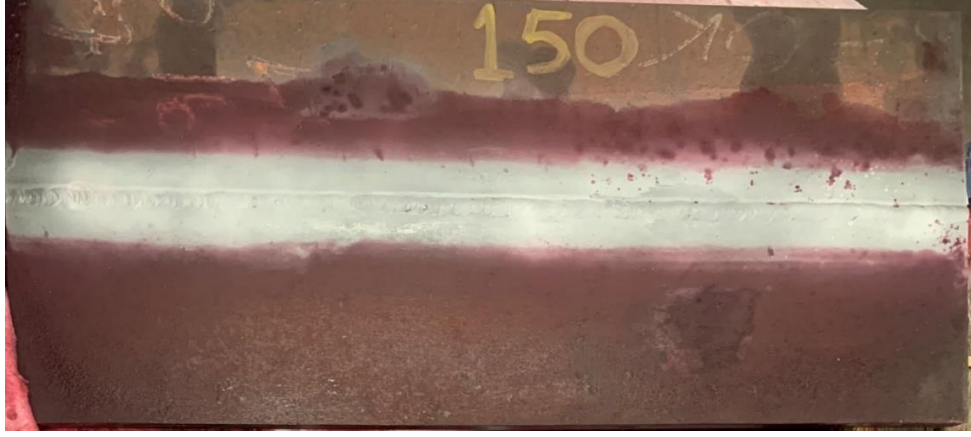
süreksizlik bırakmasına neden olduğu görülmüştür. Kaynakçı bu durumu için “kaynak banyosunun çamur gibi bir görüntü aldığı” şeklinde yorum yapmıştır. Alaşım elementlerinin yüksek sıcaklıkta kontrastı düşürücü bir etkisi olduğu düşünülmektedir.

4.1.2 Sıvı Penetrant Testi

Bu tez çalışması kapsamında kaynak ve akabinde gerilim giderme ısıtma işlemi uygulamaları tamamlandıktan sonra kaynak ve ısı tesiri altında kalan bölgelere görünür sıvı penetrant testi uygulanmış olup ürün ailesi olarak Pfinder 860 görünür kontrast penetrant, Pfinder 890 temizleme solvent spreyi, Pfinder 871 geliştirici sprey kullanılmıştır. Penetrant uygulaması sonrasında 10dk beklenilmiş ve akabinde temiz tüylenmeyen bir beze temizleyici sprey uygulanarak fazla penetrantın temizliği bu bez ile tek yönlü olarak yapılmıştır. Fazla penetrantın temizliği sağlandıktan sonra geliştirici sprey kaynak ve ısıdan etkilenen bölgeye homojen bir şekilde tatbik edilmiş ve değerlendirme işlemine geçilmiştir. Test sonunda görsel muayenede tespit edilen süreksizliklerin dışında başka bir bulguya rastlanmamıştır.



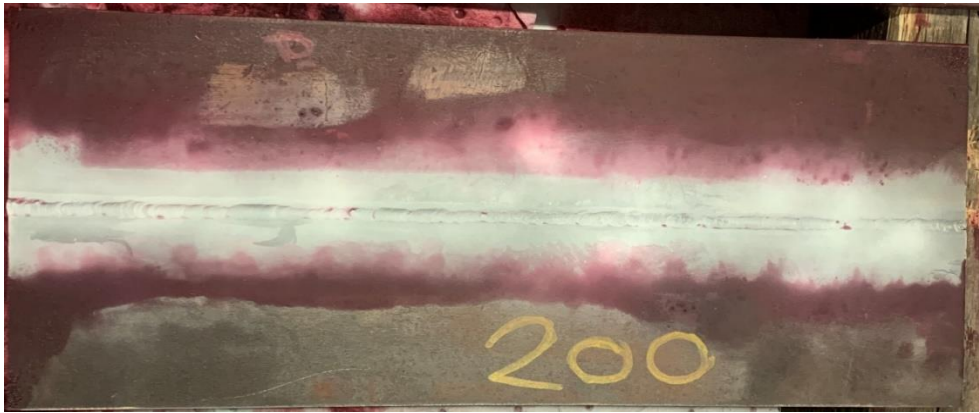
Şekil 4. 15 150°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep bölgesinin sıvı penetrant testi



Şekil 4. 16 150°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök bölgesinin sıvı penetrant testi



Şekil 4. 17 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep bölgesinin sıvı penetrant testi



Şekil 4. 18 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök bölgesinin sıvı penetrant testi



Şekil 4. 19 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 16-21mm aralığında ergime noksanlığının sıvı penetrant testi neticesinde belirtisi



Şekil 4. 20 200°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 413-419mm aralığında ergime noksanlığının sıvı penetrant testi neticesinde belirtisi



Şekil 4. 21 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kep bölgesinin sıvı penetrant testi



Şekil 4. 22 250°C ön ısı uygulaması ile kaynak yapılan test numunesinin kök bölgesinin sıvı penetrant testi

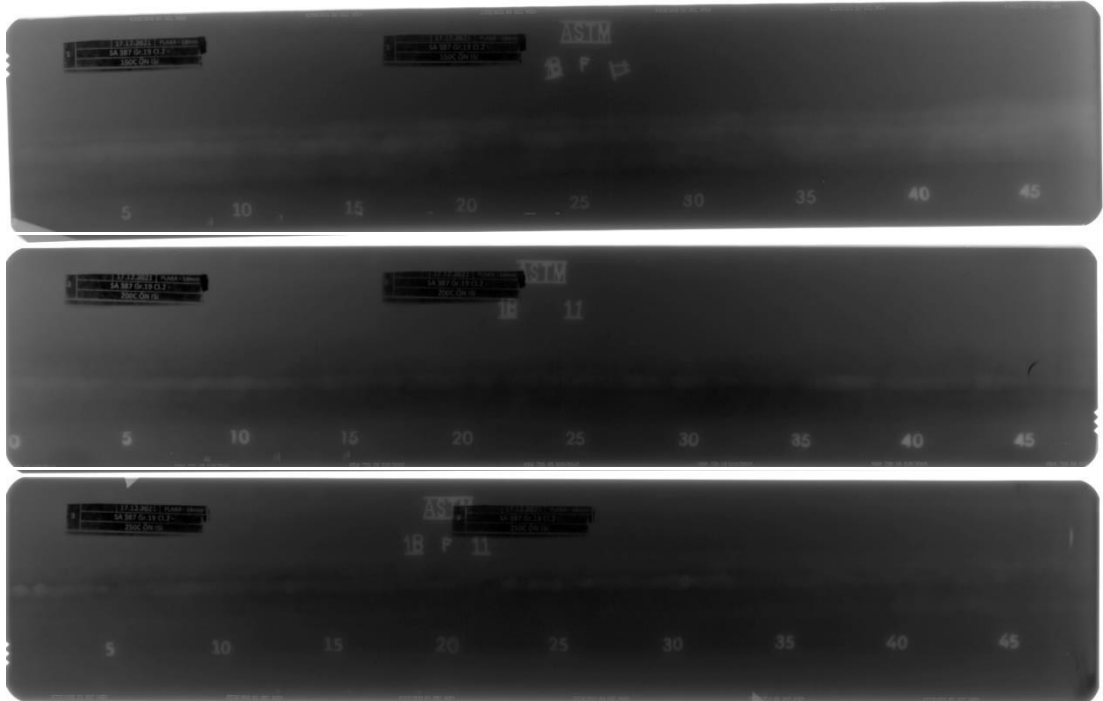
4.1.3 Rayografik Muayene

Bu tez çalışması kapsamında tamamlanmış kaynaklı test numuneleri gerilim giderme ısıtma işlemi sonrası ASME Section V BPVC Nondestructive Testing Article 2'ye göre radyografik muayene ile kontrol edilmiştir. Filim çekim parametreleri tablo

4.2’de verilmiştir. Filmle KODAK T200 marka olup 27Ci cihaz ile 5dk 45sn pozlama süresinde çekilmiştir

Tablo 4. 2 Radyografik muayene sırasında ki çekim parametreleri

Muayene kapsamı	%100 Kaynak + ITAB	Görüntüleme	Tek cidar
Işın kaynağı	Ir-192	Film tipi	Kodak T200
Aktivite	27 Küri (Ci)	Film boyutu	10cm x 48cm
Poz süresi	5 dk 45 sn.	Banyo tekniği	Manuel banyo
Film-ışınım kaynağı arası mesafe	500mm	Ekran	Ön-arka 0,13mm Pb
Penetrametre (IQI)	ASTM 1B 11	Görünebilen tel	6



Şekil 4. 23 Sırasıyla 150C, 200C ve 250C ön ısı uygulanarak kaynatılan test numunelerine ait radyoraflar.



Şekil 4. 24 250°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin 0-5cm aralığının radyograf görüntüsü.

Şekil 4.24'te 250°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin 0-5cm aralığında kökte sarkma ve 5cm'de kötü başlangıç nedeniyle kökte içbükeylik görülmektedir (kötü başlangıç olan bölgede VT-PT-PAUT ile de kökte ergime noksanlığı tespit edilmiştir).



Şekil 4. 25 250°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin 20-30cm aralığının radyograf görüntüsü.

Şekil 4.25'te 250°C ön ısı ile kaynak yapılan test numunesinin kök kısmında 20-22cm aralığında kökte içbükeylik, 23-31cm aralığında kökte sarkma görülmektedir.

4.1.3.1 Rayografik Muayene Bulgularının Değerlendirilmesi

Radyografik muayene sonucunda ergime noksanlığı, çatlak ve nüfuziyetsizlik gibi lineer herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiştir. Tespit edilen bulgular;

- 150°C ön ısı uygulanan numunede hiçbir süreksizlik tespit edilmemiştir
- 200 °C ön ısı uygulanan numunede 24 cm’de gaz boşluğu
- 250 °C ön ısı uygulanan numunede 0-5cm aralığında kökte sarkma ve 5cm’de kökte kötü başlangıç nedeniyle kökte iç bükeylik görünümü (kötü başlangıç olan bölgede VT-PT-PAUT ile de kökte ergime noksanlığı tespit edilmiştir), 20-22cm aralığında kökte içbükeylik, 23-31cm aralığında kökte sarkma hataları

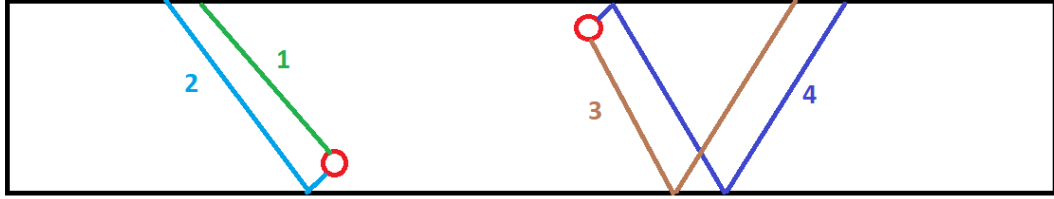
Radyografik muayene bulgularında VT-PT-PAUT ile kök bölgelerinde tespit edilen ergime noksanlıklarının tespiti yapılamamıştır. Bu durum RT nin hacimsel hataların tespitinde daha uygulanabilir bir yöntem olduğunu fakat kılcal lineer hataların tespitinde yetersiz kaldığını göstermiştir.

4.1.4 Faz Taramalı Ultrasonik Muayene (PAUT)

Bu tez çalışması kapsamında tamamlanmış kaynaklı test numuneleri gerilim giderme ısıtıl işlemi sonrası faz taramalı ultrasonik muayene ile kontrol edilmiştir. Muayenede kullanılan phased array ultrasonik muayene cihazı Doppler PHASCAN modeli olup 32 - 128 ateşleme aralığında bir cihazdır. Prob olarak 5L32-0.5X10 modeli Linear Phased Array probu kullanılmıştır. Prob 32 elementli olup frekansı 5MHz; element merkezleri arası mesafe (pitch size) 0.5mm, genişliği 10 mm dir. Ses hızı, takoz ve hassasiyet kalibrasyonları yapıldıktan sonra tarama 22dB kazanç değerinde yapılmıştır.

4.1.4.1 Hassasiyet Kalibrasyonu

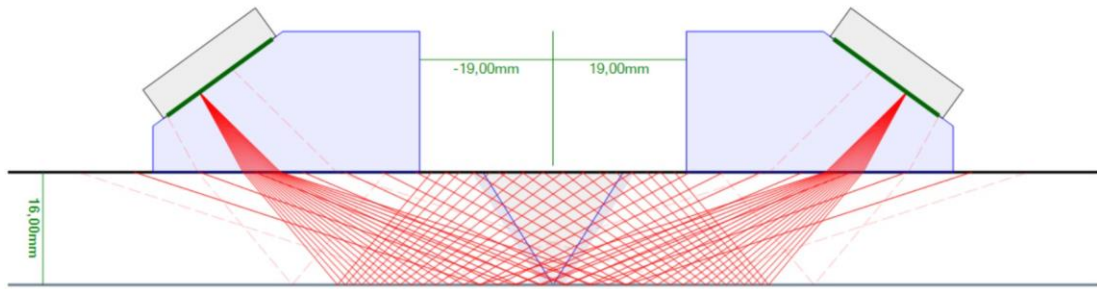
K2 blokla ses hızı ve takoz kalibrasyonları yapıldıktan sonra 16mm kalınlığında ferritik çelik (St44) kalibrasyon boğunda alt ve üst yüzeyden 5mm derinlikte bulunan 3mm çapında delikler kullanılarak Hassasiyet kalibrasyonu ve TCG eğrisi çizildi.



Şekil 4. 26 TCG çizerken alt ve üst yüzeyin 5mm altında merkezi olacak şekilde 3mm çaplı yandan açılmış deliklerden yararlanılmıştır

4.1.4.2 Tarama Planı

Muayene sırasında 0,6 pitch değeri olacak şekilde 1 den 20 ye kadar element ateşlenmiş olup projeksiyon mesafesi 19mm ve 40°- 72° aralığında 1 er derece farkla 32 ateşleme yapılarak tarama yapılmıştır.



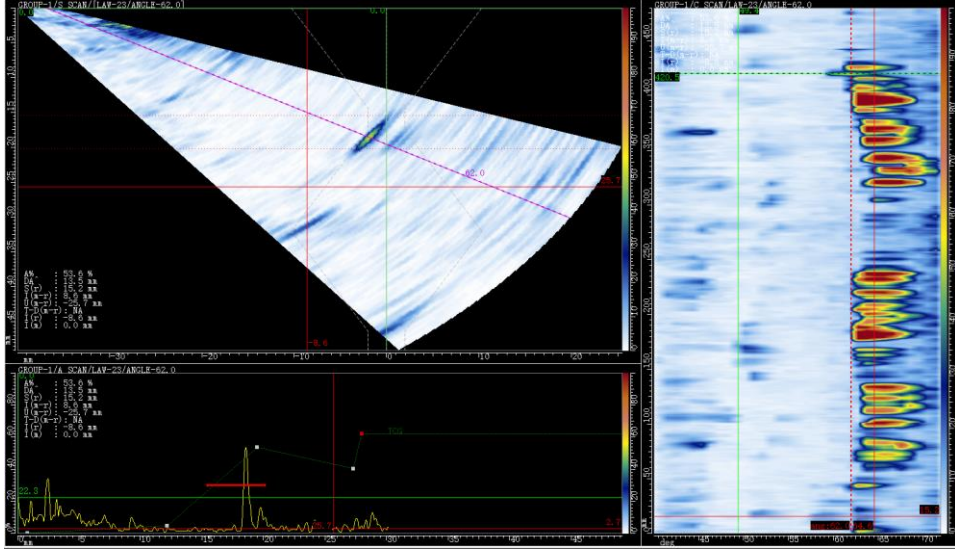
Şekil 4. 27 Faz taramalı ultrasonik muayene öncesinde hazırlanan tarama planı

4.1.4.3 PAUT Bulgularının Değerlendirilmesi

Faz taramalı ultrasonik muayenede enine ses dalgaları gönderilmekte olup tespit edilebilir herhangi bir süreksizlik olması durumunda bu süreksizlikten geri yansıyan ekolar değerlendirilmektedir. Her tahribatsız muayene yönteminde olduğu gibi bu yöntemde tespit hassasiyeti süreksizliğin türüne ve yöntemin özelliklerine bağlı olarak sınırlıdır. Özellikle kaynak dikişlerinin kök bölgelerinde aşırı sarkma veya form bozuklukları olması durumunda form ekoları oluşmakta ve bu ekolar belirtileri gölgeleyebilmektedir. Görsel muayene (VT) ve sıvı penetrant testi (PT) metodlarında tespit edilen bulgular ile PAUT yöntemi ile tespit edilen bulgular tablo 4.3’de kıyaslanmıştır.

Tablo 4. 3 Görsel muayene (VT), sıvı penetrant testi (PT) ile faz taramalı ultrasonik muayene (PAUT) kontrolleri sonuçlarının karşılaştırılması

Numune	VT - PT	PAUT
150°C		Herhangi bir süreksizlik tespit edilememiştir.
200°C	16-21mm aralığında kökte ergime noksanlığı	Tespit edilememiştir.
	413-419mm aralığında kökte yan cidar ergime noksanlığı	412-419mm arası kökte yan cidar ergime noksanlığı
250°C	66-70mm aralığında kökte yan cidar ergime noksanlığı	Kök formu bozuklukları nedeniyle aşırı sarkma olan bölgeler sağlıklı değerlendirilememiştir.



Şekil 4. 28 200°C ön ısı uygulanan numunede 412-419mm arası kökte yan cidar ergime noksanlığının faz taramalı ultrasonik muayenede (PAUT) görüntüsü

Özellikle 200°C ve 250°C ön ısı uygulamaları ile kaynatılan numunelerde kök formları bozuk olduğundan dolayı VT ve PT ile tespit edilebilen bazı süreksizlikler PAUT ile tespit edilememiştir.

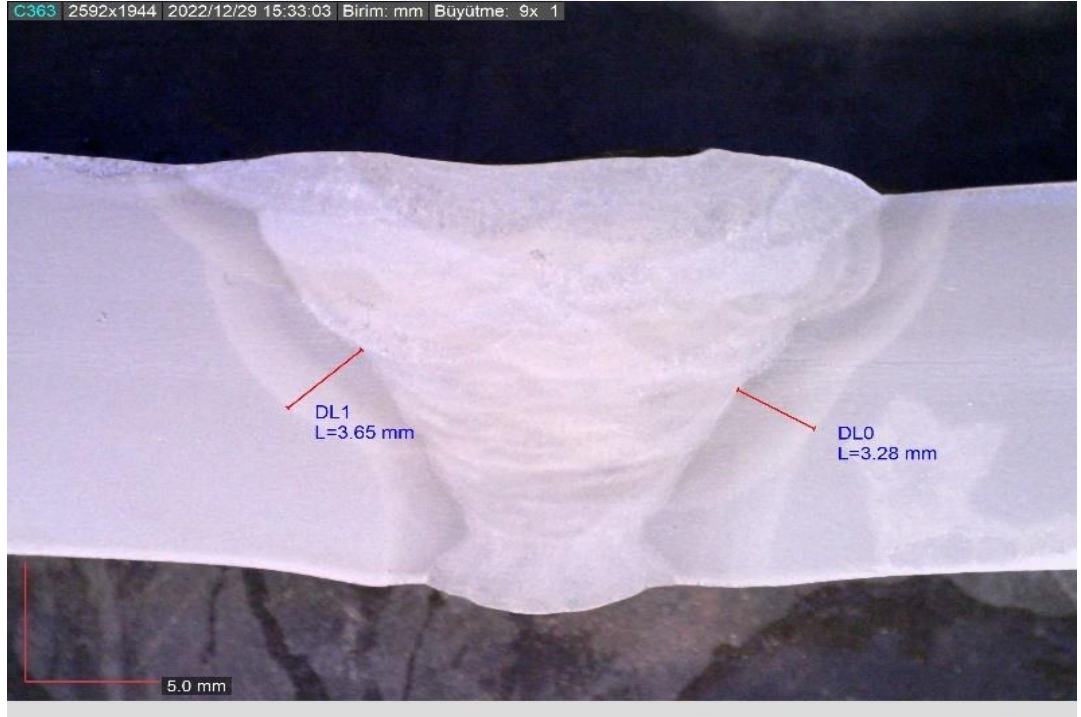
4.2 Tahribatlı Muayene

4.2.1 Makroyapı İncelemesi

Makroyapı incelemesi için kaynaklı plaka numuneleri ısınmaması için bor yağlı şerit testere kullanılarak 10mm genişliğinde enine kesit olacak şekilde kesilmiş ve akabinde sırasıyla P150 – P400 – P600 parlatma kağıtları ile yüzeyleri parlatılmış. Parlatma işleminden sonra %5'lik nitel-etil alkol çözeltisi içerisinde dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



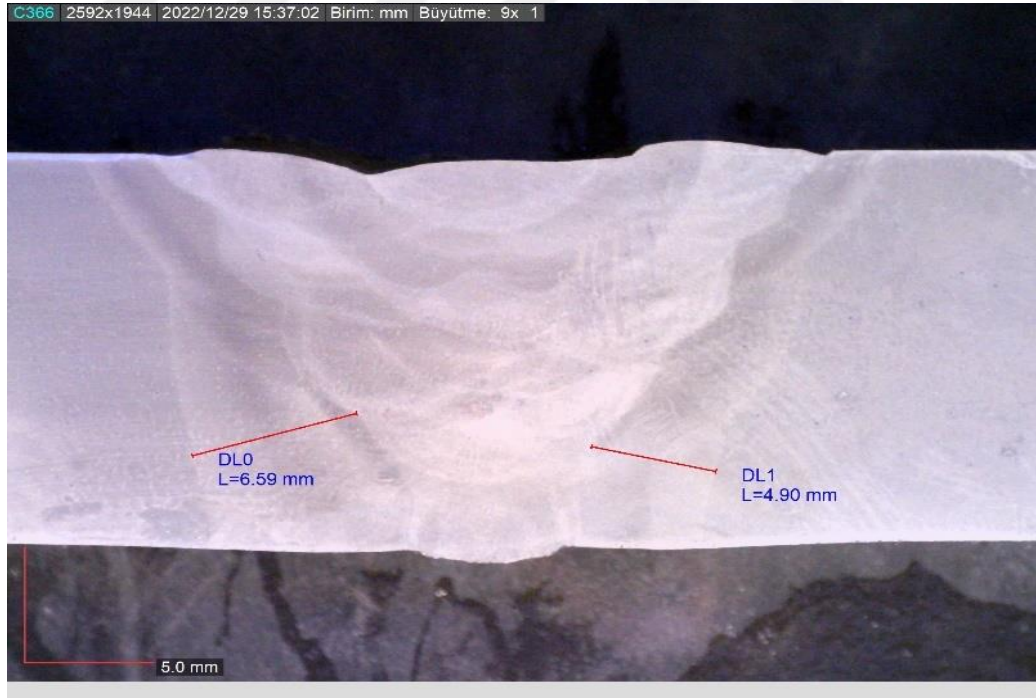
Şekil 4. 29 Makro yapı incelemesi öncesi parlatılmış numuneler



Şekil 4. 30 150°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede enine kesitin makroyapı incelemesi



Şekil 4. 31 200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede enine kesitin makroyapı incelemesi

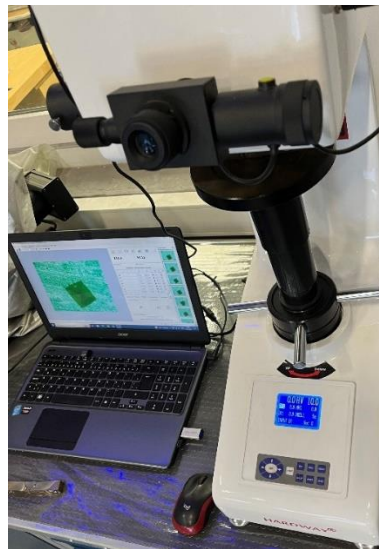


Şekil 4. 32 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede enine kesitin makroyapı incelemesi

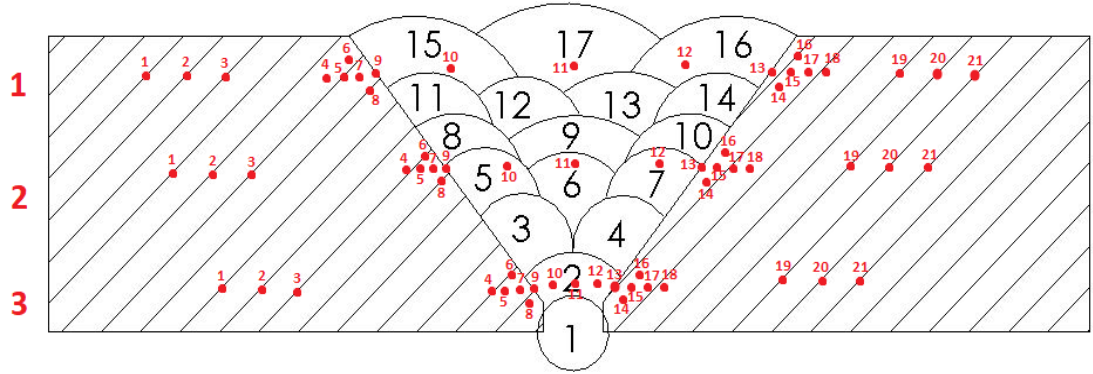
Makro inceleme neticesinde 150°C ve 200°C ön ısı sıcaklığında kaynatılan parçalarda ısıdan etkilenen bölge genişlikleri birbirine benzer (maksimum 3-5mm) iken 250°C ön ısı sıcaklığında kaynatılan numunede ısıdan etkilenen bölgenin çok daha geniş (maksimum 6,59mm) olduğu görülmüştür. Bu durumun kaynakçının yüksek ön ısı uygulamasında kaynak eldiveni ve yanmaz battaniye kullanmasına rağmen eli, kolu sıcaklıktan etkilenmesi ve bu nedenle özellikle kök kaynağında banyoya hakimiyeti zorlaştığı için tel verme süresinin uzaması ve bu nedenle ısı girdisinin artması ile ilişkilendirilmiştir. Kaynakçının kaynak sırasında banyo hakimiyeti kaynak camı ile gözlendiğinde ön ısı sıcaklığı artışı ile kaynak banyosunun renginin değiştiği ve kontrastın azaldığı bu durumda kaynakçının kaynak banyosuna hakimiyetini azalttığı görülmüştür. SA387 91 Sınıfı malzemelerin GTAW kaynağı için ön ısı sıcaklığının 250°C olduğu durumda ITAB'ın çok fazla genişlediği (maksimum 6,59mm) görülmüştür.

4.2.2 Vickers Mikro Sertlik Ölçümü

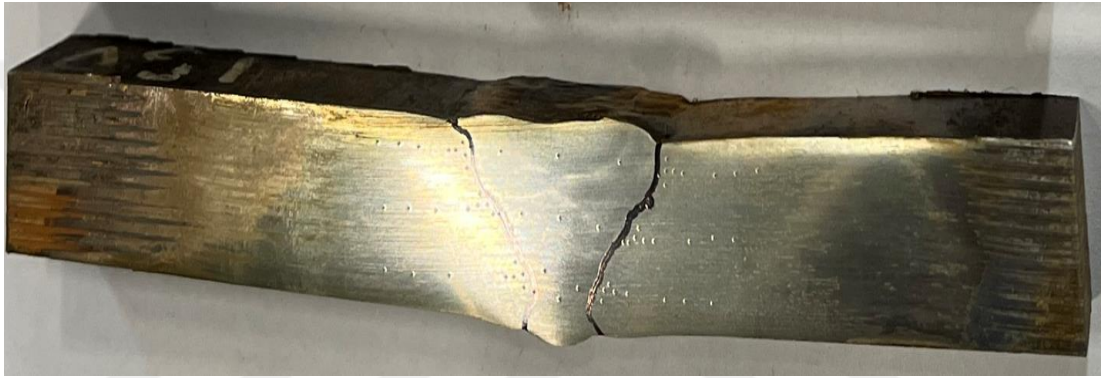
Bor yağlı şerit testere kullanılarak kesildikten sonra makroyapı incelemesi sırasında ısı tesiri altında kalan bölgeleri (ITAB) belirlenen her numune için enine kesitten 3 sıra halinde 4.33'de ki gibi her sıradan 21 adet olmak üzere 63 adet mikro sertlik ölçümü yapılmıştır.



Şekil 4. 33 Mikro sertlik ölçümlerinde kullanılan Check-Way/Hv10 mikro sertlik ölçüm cihazı



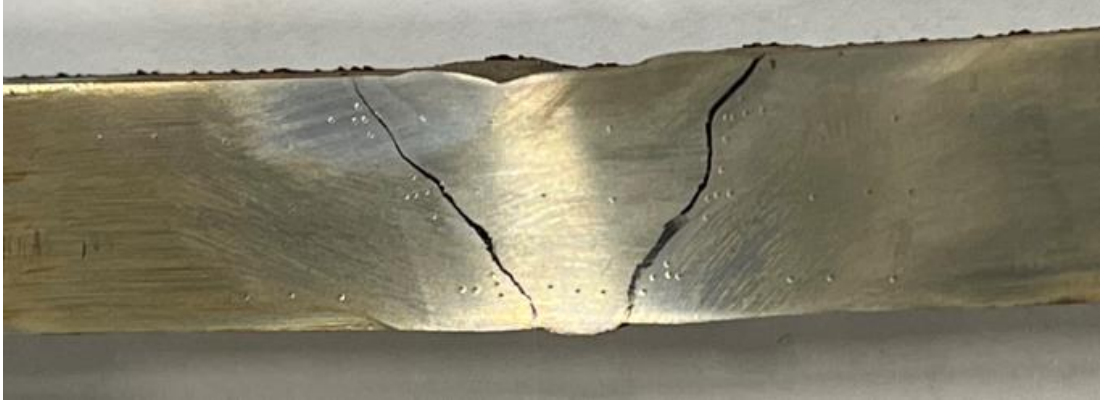
Şekil 4. 34 Mikro sertlik ölçümlerinin konumlarını gösteren kesit çizimi



Şekil 4. 35 150°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan plakada enine kesit üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin izlerin görüldüğü fotoğraf



Şekil 4. 36 200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan plakada enine kesit üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin izlerin görüldüğü fotoğraf

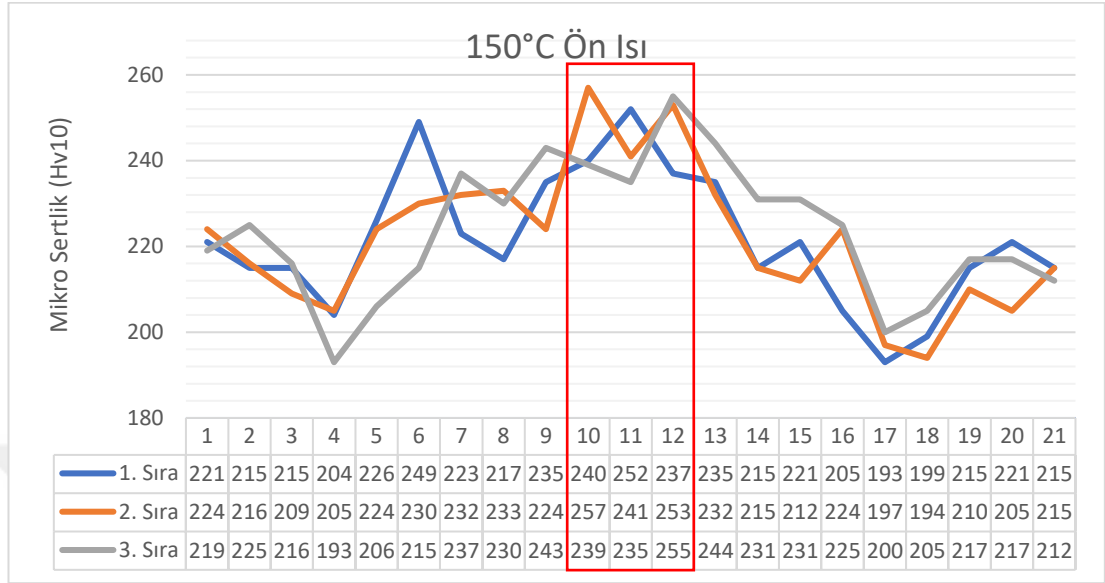


Şekil 4. 37 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan plakada enine kesit üzerinden alınan sertlik ölçümlerinin izlerin görüldüğü fotoğraf

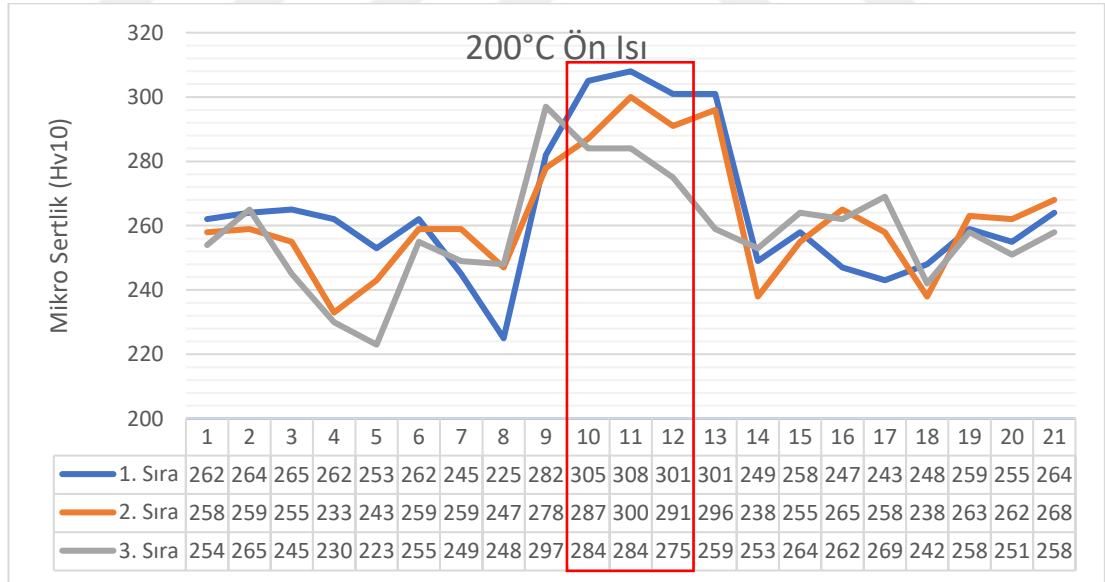
Tablo 4. 4 Test numunelerinden şekil 4.33’de ki gibi enine kesit alınarak 3 sıra halinde ölçülen sertlik değerleri

Numune	SIRA	Ana Malzeme			ITAB						Kaynak			ITAB						Ana Malzeme		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 Ergime Çizgisi	10	11	12	13 Ergime Çizgisi	14	15	16	17	18	19	20	21
150C ÖN ISI	1	221	215	215	204	226	249	223	217	235	240	252	237	235	215	221	205	193	199	215	221	215
	2	224	216	209	205	224	230	232	233	224	257	241	253	232	215	212	224	197	194	210	205	215
	3	219	225	216	193	206	215	237	230	243	239	235	255	244	231	231	225	200	205	217	217	212
200C ÖN ISI	1	262	264	265	262	253	262	245	225	282	305	308	301	301	249	258	247	243	248	259	255	264
	2	258	259	255	233	243	259	259	247	278	287	300	291	296	238	255	265	258	238	263	262	268
	3	254	265	245	230	223	255	249	248	297	284	284	275	259	253	264	262	269	242	258	251	258
250C ÖN ISI	1	265	269	279	263	256	256	249	237	299	351	353	338	291	292	315	323	285	241	266	281	267
	2	271	287	271	260	257	278	295	288	305	334	353	345	265	290	292	279	272	273	273	272	273
	3	334	342	332	358	361	395	379	370	361	407	391	389	326	358	356	346	338	318	331	331	329

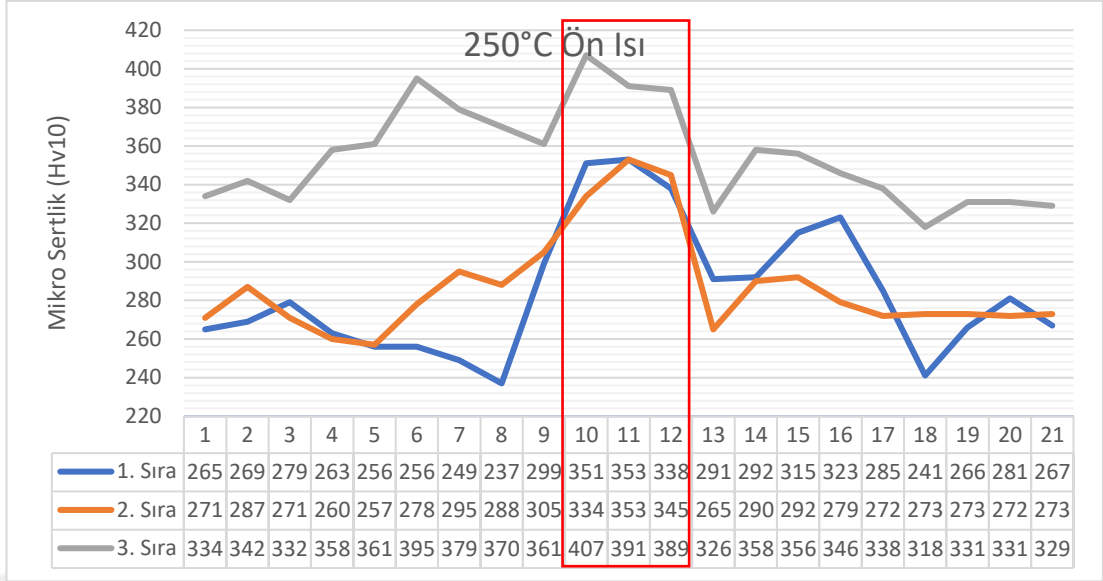
Şekil 4.34'te enine kesit üzerinde gösterilen 3 sıradan alınan sertlik değerlerinin grafiksel gösterimleri aşağıda ki şekillerde görülmektedir.



Şekil 4. 38 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden ölçülen sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi



Şekil 4. 39 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden ölçülen sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi



Şekil 4. 40 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden ölçülen sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi

Kaynak bölgeleri grafiklerde kırmızı kutu içerisinde belirtilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri grafiksel olarak karşılaştırıldığında ön ısı sıcaklığı artışı ile sertlik değerlerindeki artış belirgin bir şekilde görülmektedir. 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numunenin kök bölgesinde sertliğin katastrofik bir şekilde yükseldiği görülmektedir. 250°C ön ısı uygulanan numunenin yüksek sertlik değerleri ile makro görüntüdeki ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) genişliği ilişkilendirildiğinde ön ısı sıcaklığı arttıkça plaka kaynağı sırasında kaynakçının sıcaklıktan hem eli, kolu yanması nedeniyle hem de kaynak banyosunda ki kontrastın azalması nedeniyle kaynak banyosuna hakimiyetinin azalması ve tel verme sürelerinin artması sonucu özellikle kök kaynağı sırasında ısı girdisinin çok fazla artması ve buna bağlı olarak karbür çökeltilerinin daha fazla oluşması nedeniyle sertlik değerlerinin katastrofik bir şekilde yükseldiği görülmüştür.

Ölçülen sertlik değerlerinin yüksekliğinin bir nedeni de uygulanan gerilim giderme ısııl işlemi (PWHT) sıcaklığının (755°C) yetersiz kalmasıdır. Ana malzeme sertifikasına bakıldığında temperleme sıcaklığı olarak 780°C uygulandığı görülmektedir. Bu sıcaklığın (780°C) altında kalmak kaydıyla PWHT sıcaklığının artırılması sertlik değerlerini düşürecektir. Fakat bu durum ön ısı sıcaklığı ile

ilişkilendirildiğinde SA387 91 Sınıfı malzemelerin GTAW kaynağı için ön ısı sıcaklığı artışının sertlik değerlerini arttırdığı açık bir şekilde görülmektedir.

4.2.3 Mikroyapı İncelemesi

Kaynaklı test numuneleri enine kesit alınarak ısınmaması için bor yağlı şerit testerede kesilmiştir. Sırasıyla 180 – 220 – 360 – 800 – 1000 – 1200 – 2500 zımpara kağıtları kullanılarak yüzeyleri hazırlanan numuneler 1 mikron elmas içerikli “POLY-TOP-DUO 1micron” çözelti ve keçe kullanılarak parlatılmıştır.

Dağlama işleminde “ASTM E407 – Standard Practice for Microetching Metals and Alloys” standardında tablo 1’de “Fe + 4–12 Cr” aralığındaki malzemeler için tablo 2’de önerilen 80 numaralı dağlayıcı kullanılmıştır. Bu dağlayıcı endüstride “Vilellas’s Reagent” özel adı ile bilinmekte olup aşağıdaki bileşime sahip bir çözeltilidir.

- 1 gr pikrik asit
- 5ml HCL ait
- 100ml Etil alkol

Metalografik incelemeler için numuneler Vilellas’s Reagent çözeltisi ile 10 saniye dağlanmış ve metalografi mikroskobu olarak LEICA marka DM 2700M kullanılmıştır.



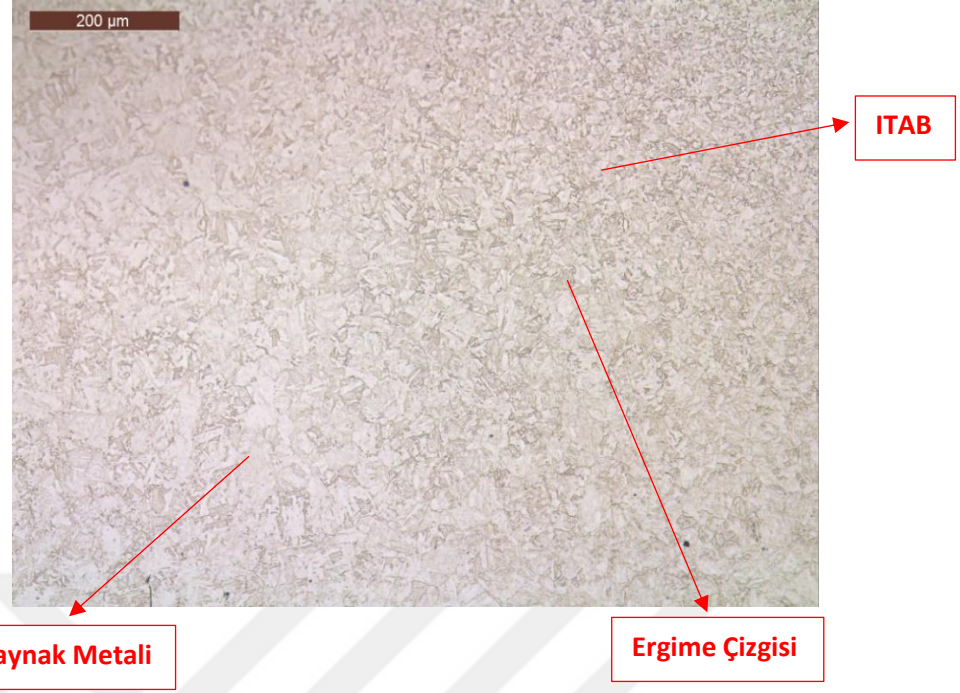
Şekil 4. 41 Metalografik incelemelerde kullanılan LEICA DM 2700M metalografi mikroskobu



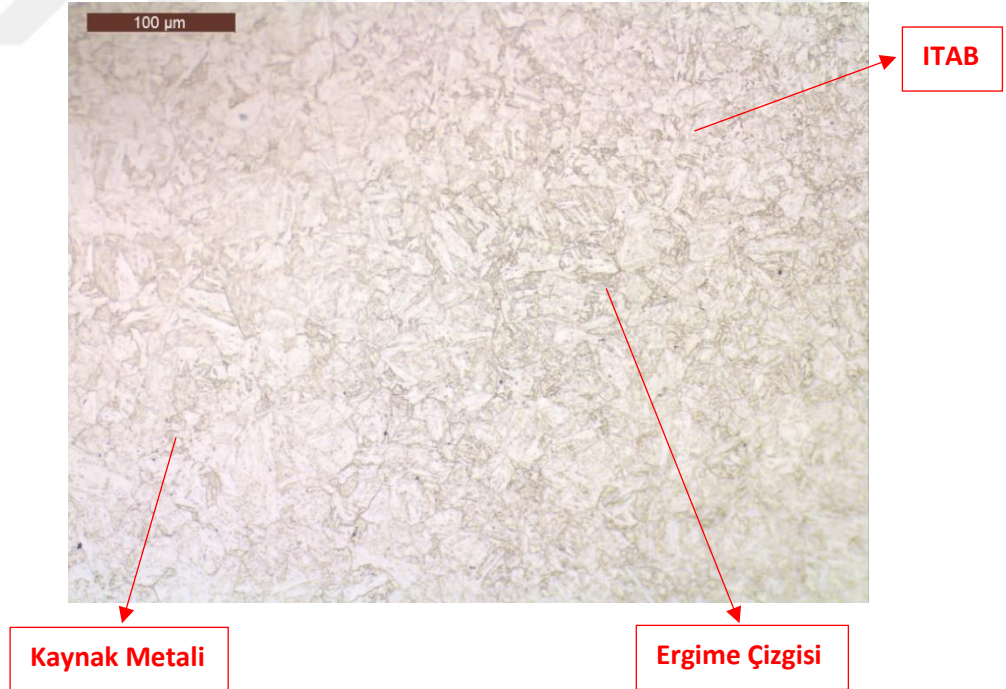
Şekil 4. 42 Parlatma işleminde kullanılan POLY-TOP-DUO 1micron elmas çözeltisi



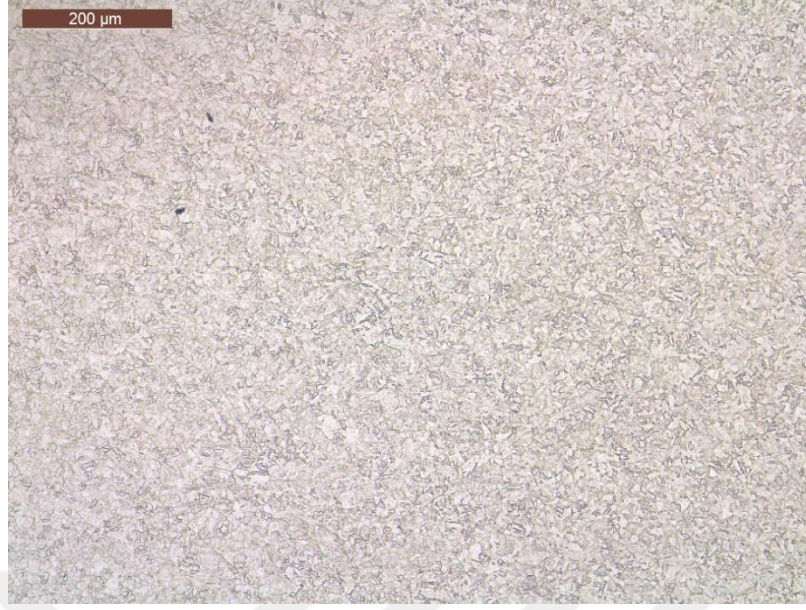
Şekil 4. 43 Zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan impro PROPOL zımparalama ve parlatma makinası



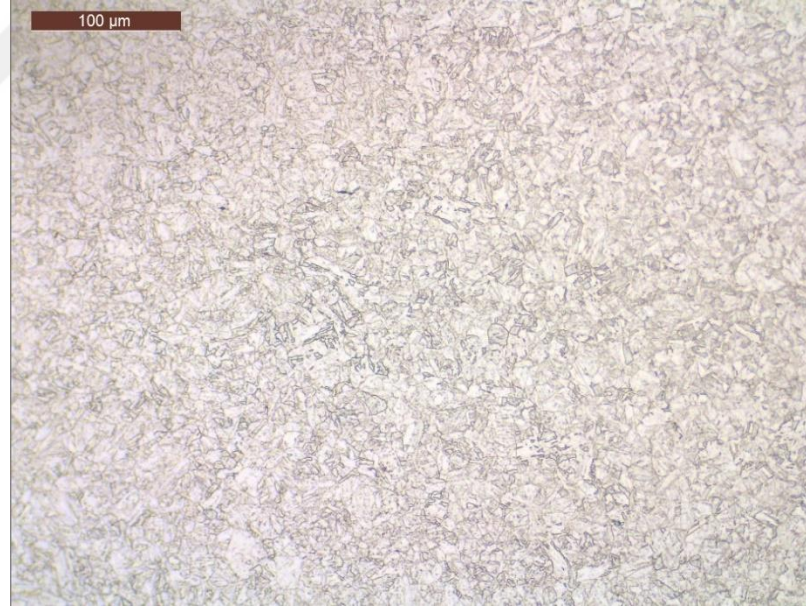
Şekil 4. 44 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 10X büyütme altında



Şekil 4. 45 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 20X büyütme altında

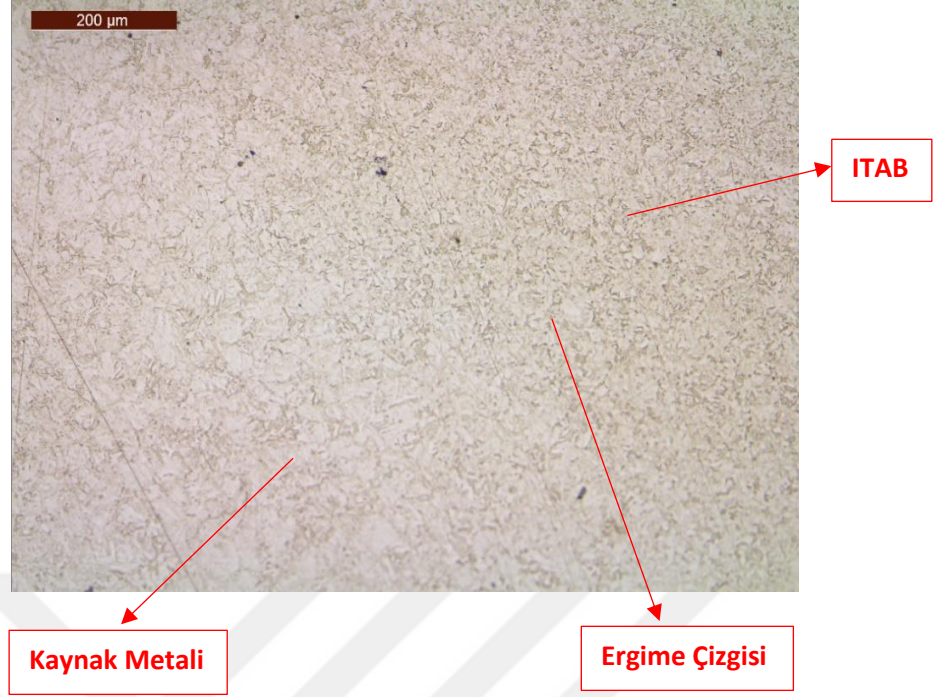


Şekil 4. 46 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 10X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü

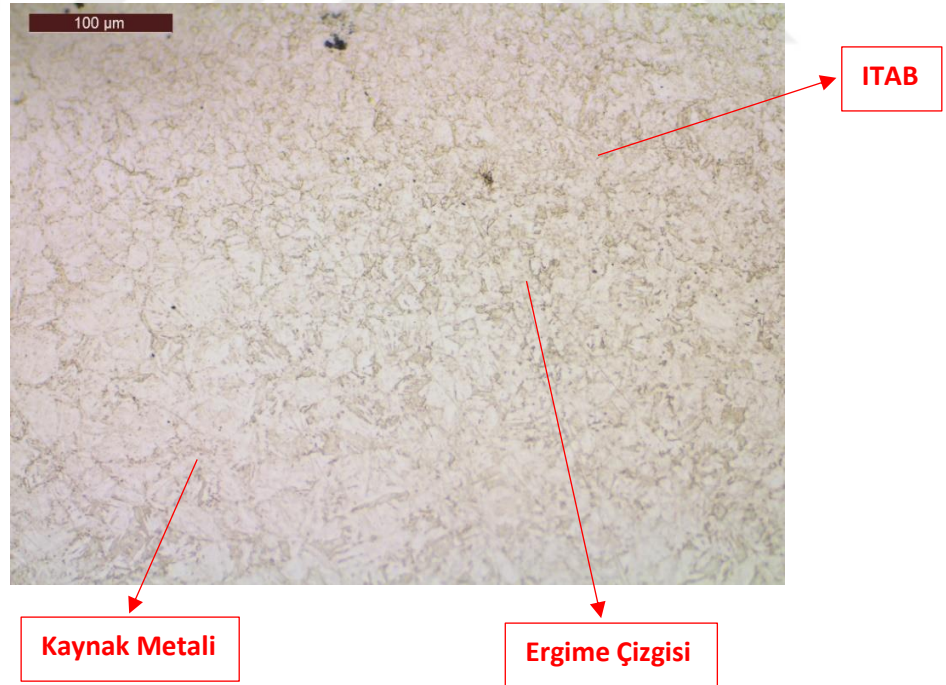


Şekil 4. 47 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 20X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü

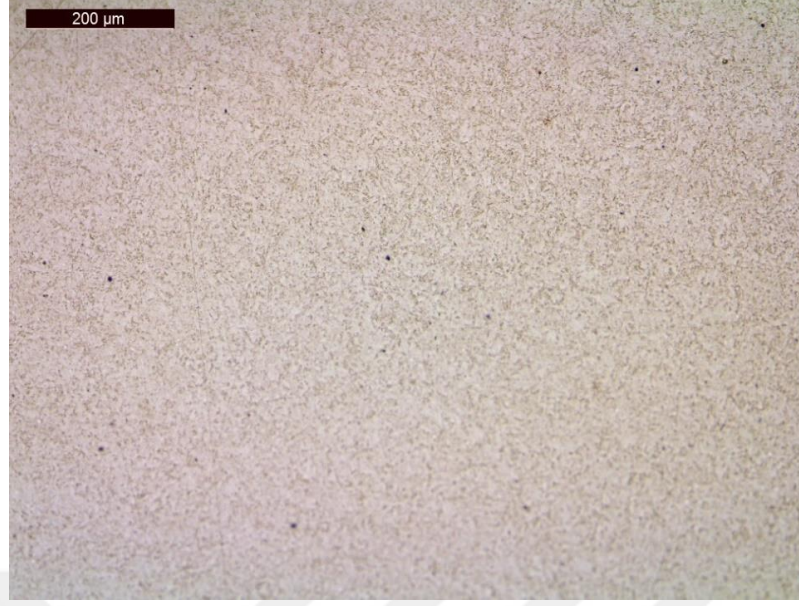
150°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numuneden alınan mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde kaynak bölgesinde ve ergime çizgisinde tane irileşmesi görülmüştür.



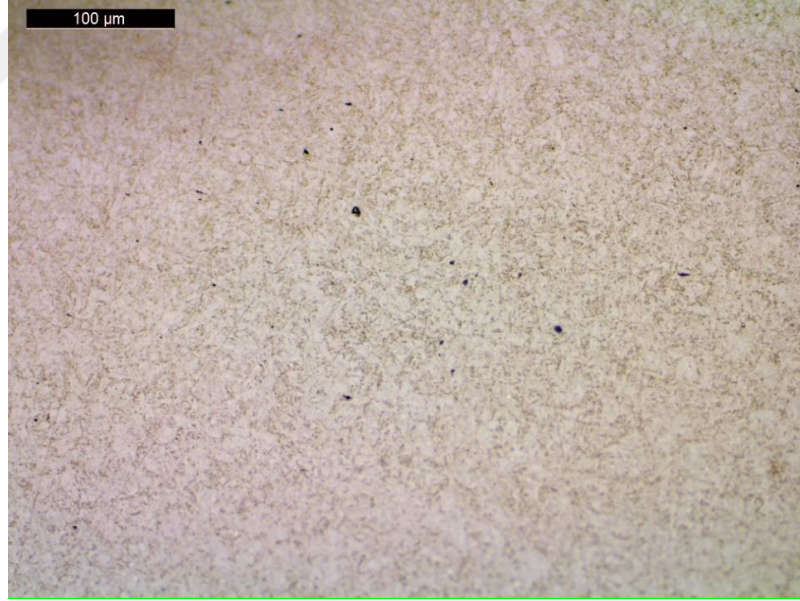
Şekil 4. 48 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 10X büyütme altında



Şekil 4. 49 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 20X büyütme altında

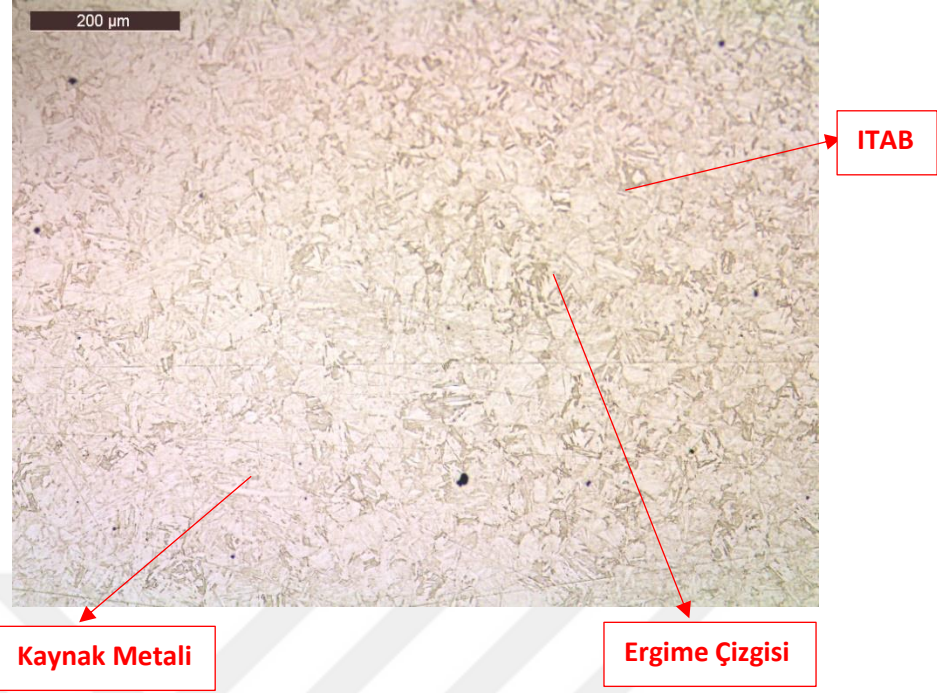


Şekil 4. 50 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 10X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü

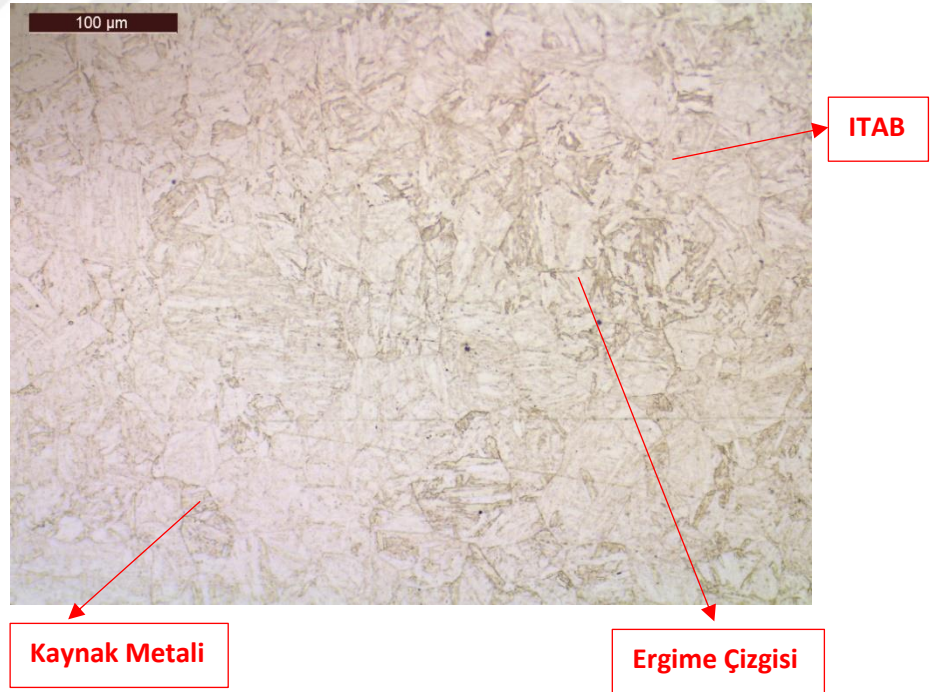


Şekil 4. 51 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 20X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü

200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numuneden alınan mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde 150°C ön ısı ile kaynatılan numunede ki ile benzer şekilde kaynak bölgesinde ve ergime çizgisinde tane irileşmesi görülmüştür.



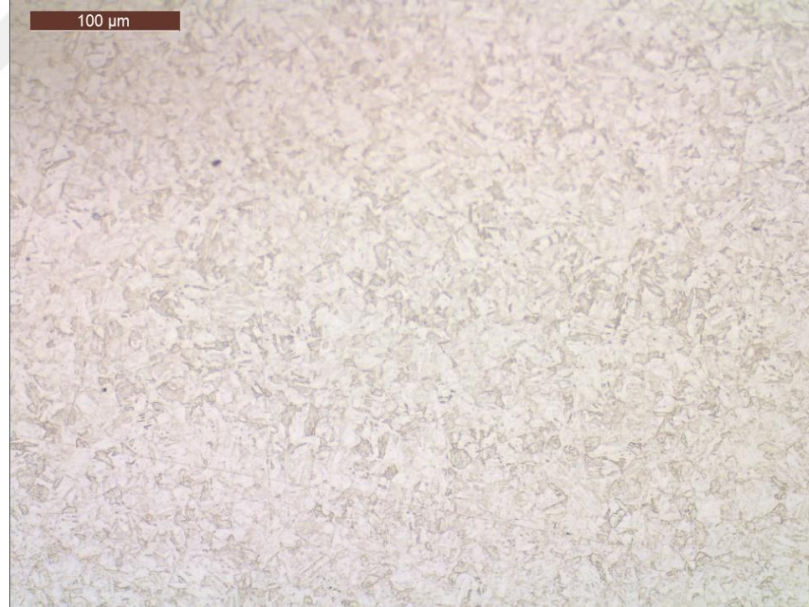
Şekil 4. 52 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 10X büyütme altında



Şekil 4. 53 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakadan enine kesit alınarak hazırlanan mikroyapı görüntüsü 20X büyütme altında



Şekil 4. 54 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 10X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü



Şekil 4. 55 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakanın 20X büyütme altında ana malzeme mikroyapı görüntüsü

250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numuneden alınan mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde 150°C ve 200°C ön ısı ile kaynatılan numunelere göre kaynak

bölgesinde ve ergime çizgisinde tane irileşmesinin çok daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kaynaklı bölgenin ana malzeme tarafından alınan mikroyapı görüntüsünün de 150°C ve 200°C ön ısı ile kaynatılan numunelere göre az bir miktar daha büyük taneli olduğu görülmüştür. Bu durum ısı tesiri altında kalan bölgenin 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede diğerlerine göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

4.2.4 Üç Nokta Eğme Deneyi

ASTM A370 standardında şekil A 2.14 ve A 2.15'e uygun olacak şekilde MTC Check Way üç nokta eğme test cihazı kullanılarak üç nokta yan eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yan eğme deneylerinde kesit boyunca ergine çizgisinde, kaynakta ve ısıdan etkilenen bölgede martenzitik yapı veya kaynak uygulamasından dolayı herhangi bir yırtılma veya süreksizlik araştırılmıştır.



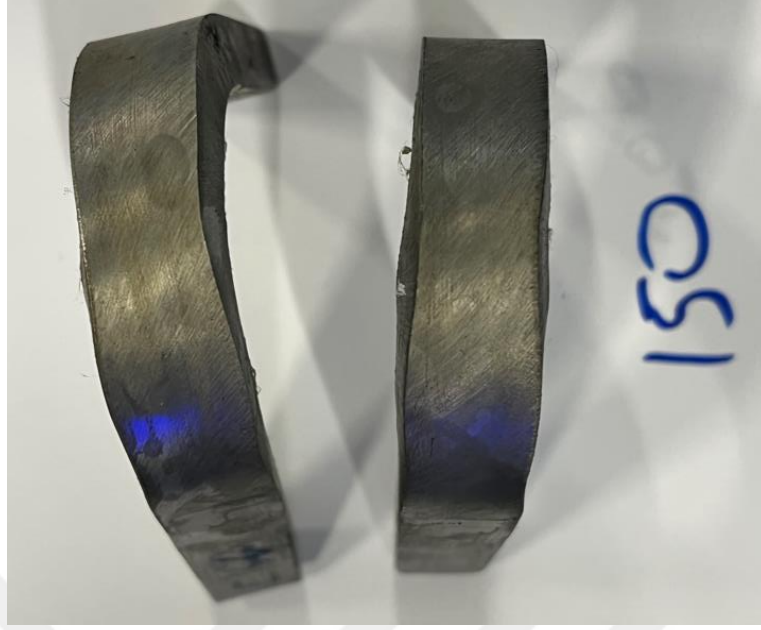
Şekil 4. 56 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi görüntüsü



Şekil 4. 57 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi görüntüsü



Şekil 4. 58 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi görüntüsü



Şekil 4. 59 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi sonucundaki görüntü



Şekil 4. 60 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi sonucundaki görüntü



Şekil 4. 61 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı numuneden enine kesit alınarak yapılan yan eğme deneyi sonucundaki görüntü

Üç nokta yan eğme deneyleri sonucunda uygulanan farklı ön ısı sıcaklıklarının SA387 91 Sınıfı malzemelerin GTAW kaynağı için kaynakta, ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) veya ana malzemedede süreksizlik oluşuma etkisinin olmadığı görülmüştür.

4.2.5 Çekme Testi

Çekme deney numuneleri ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” standardında şekil 8’de belirtilen küçük boyutlu dairesel test numunelerinden 3 numaralı numune ebatları baz alınarak çıkartılmış olup numune bölgeleri ve ebatları “2.7.5 Çekme Deneyi” maddesinde açık bir şekilde belirtilmiştir. Deneylerde AUTOGRAPH AG-I / 250 kN çekme test cihazı kullanılmıştır.

Aşağıda 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin hem her sıcaklık için ana malzeme, ısı tesiri altında kalan bölgeler (ITAB), kaynaktan boyuna çıkartılan numune ve kaynaktan enine çıkartılan numune çekme deney verileri işlenerek grafik haline getirilmiş hem de çekme çubuğu çıkartılan bölgelere göre çekme deney verileri işlenerek grup halinde çekme deney grafikleri verilmiştir.



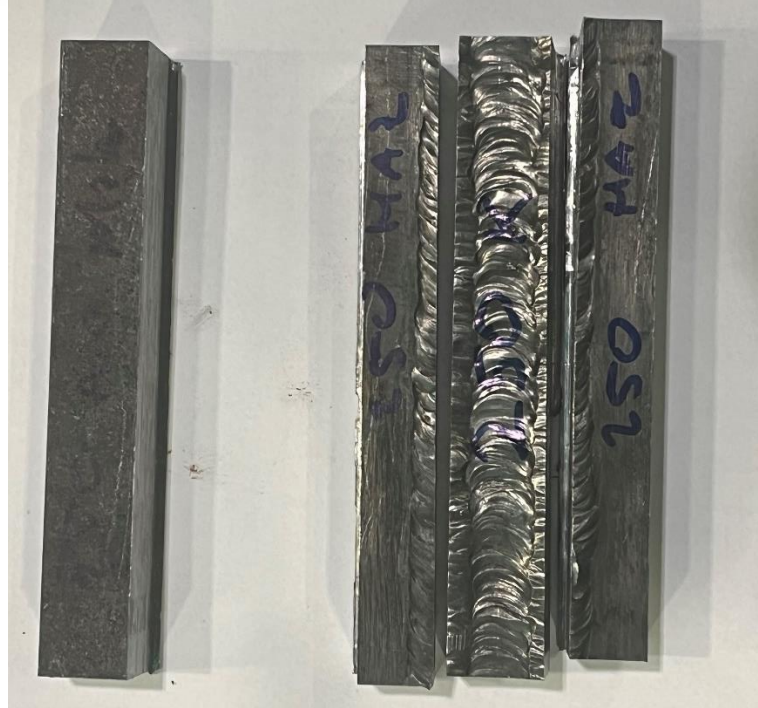
Şekil 4. 62 150°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakada çekme çubuğu çıkartılması amacıyla şerit testerede kesilmesi için çizilen çizgiler görülmektedir



Şekil 4. 63 Kaynak bölgesinden ve ITAB'dan çıkartılan çekme çubuklarının konumu görülmektedir



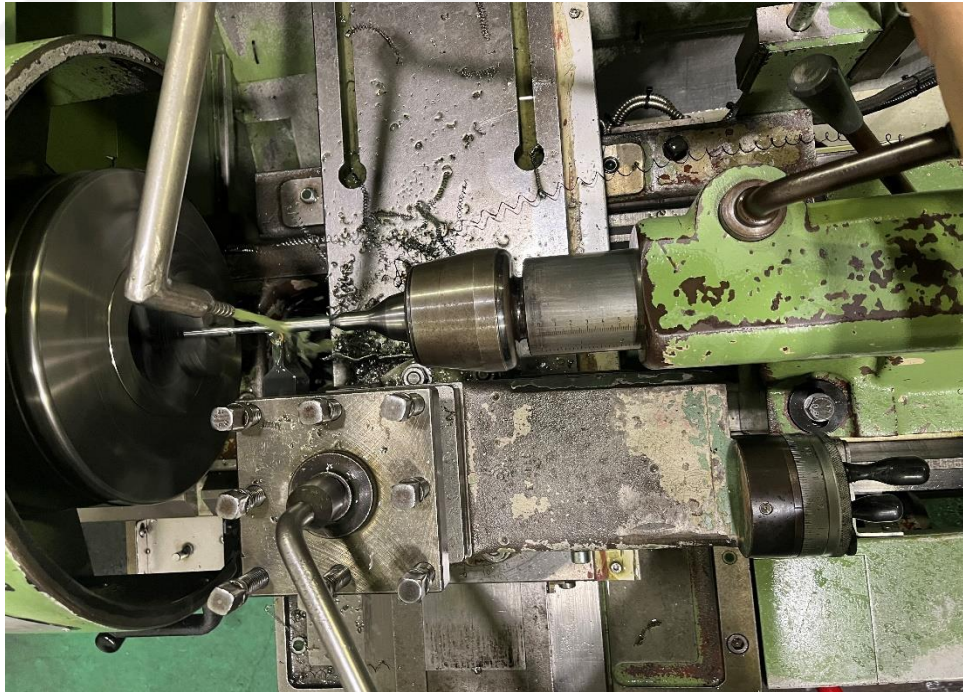
Şekil 4. 64 200°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakada çıkartılan çekme çubukların konumları görülmektedir



Şekil 4. 65 250°C ön ısı uygulanan kaynaklı plakada çıkartılan çekme çubukların konumları görülmektedir



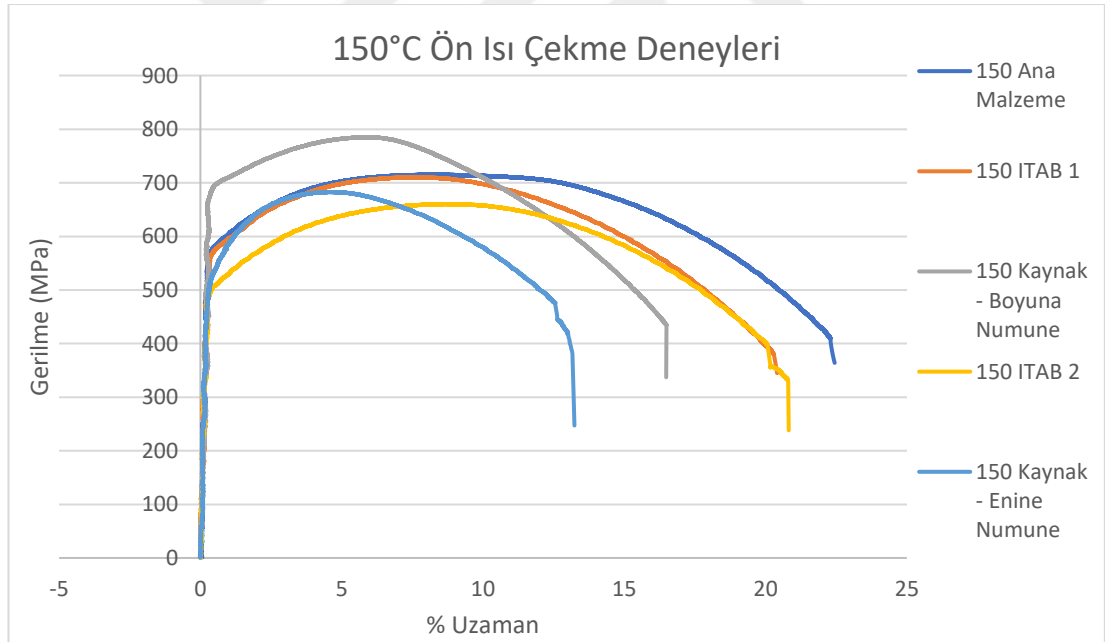
Şekil 4. 66 ITAB bölgesinden 16mmx16mm olarak kesilen çubukların bor yağlı freze tezgahında 13mmx13mm şekline getirilmesi



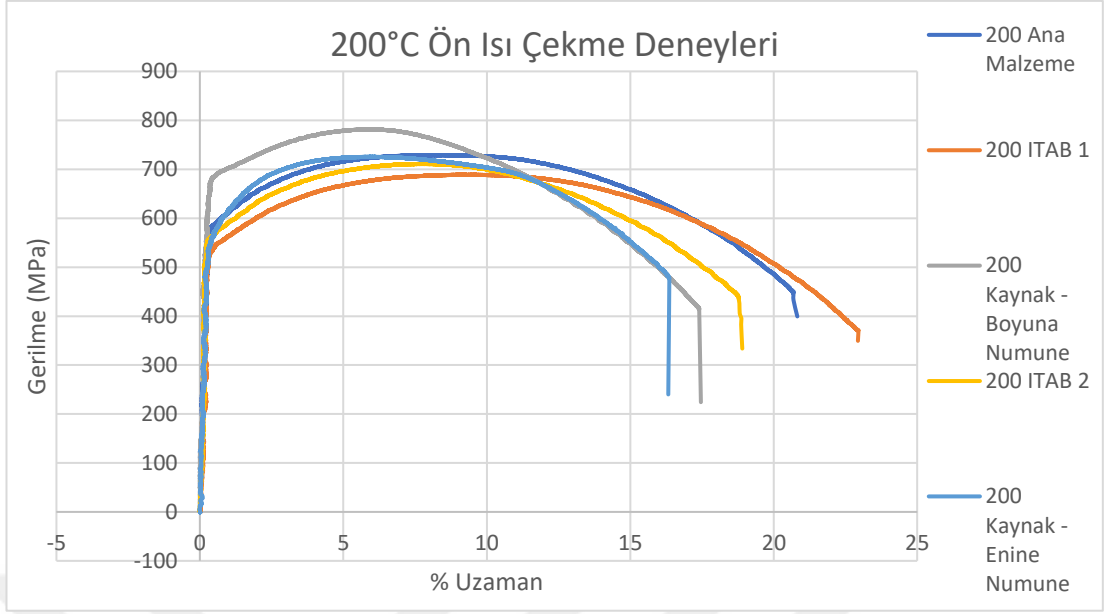
Şekil 4. 67 Bor yağlı torna tezgahında hazırlanan çekme çubuğunun radüs verilmesi işlemi sırasında bir görüntü



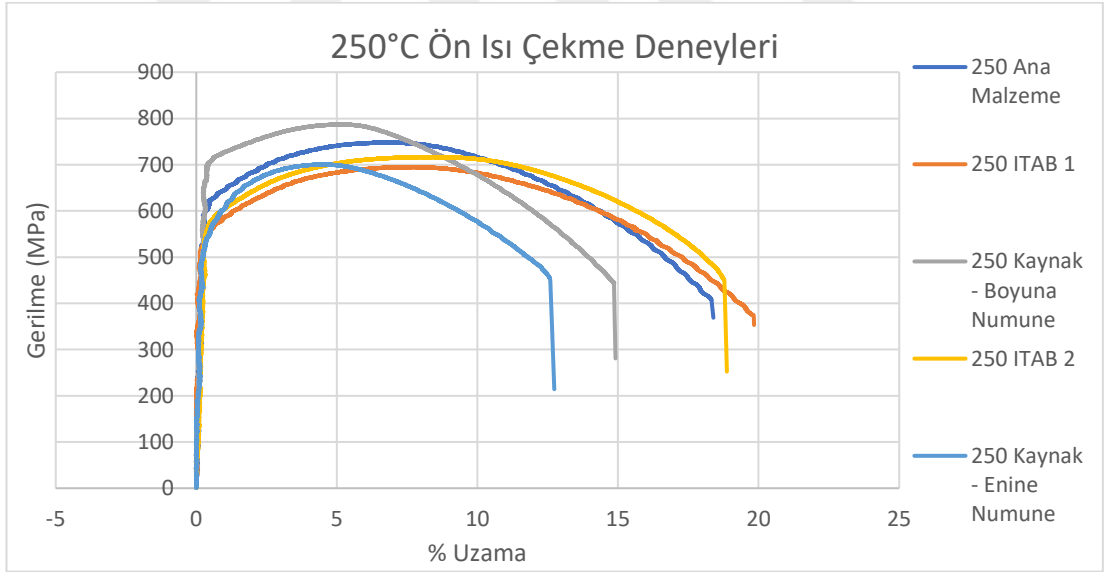
Şekil 4. 68 Hazırlanan çekme çubuğunun çekme test cihazı dairesel numune tutucu çenesi ile görüntüsü



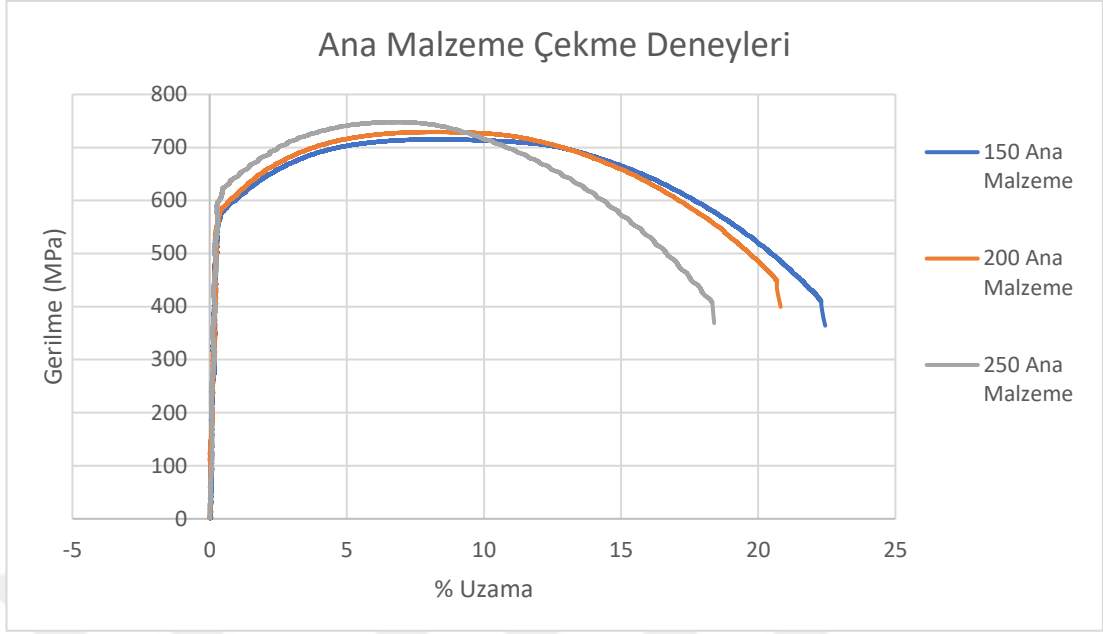
Şekil 4. 69 150°C ön ısı uygulanarak kaynatılan test plakalarından çıkartılan numunelerin çekme deney grafikleri



Şekil 4. 70 200°C ön ısı uygulanarak kaynatılan test plakalarından çıkartılan numunelerin çekme deney grafikleri

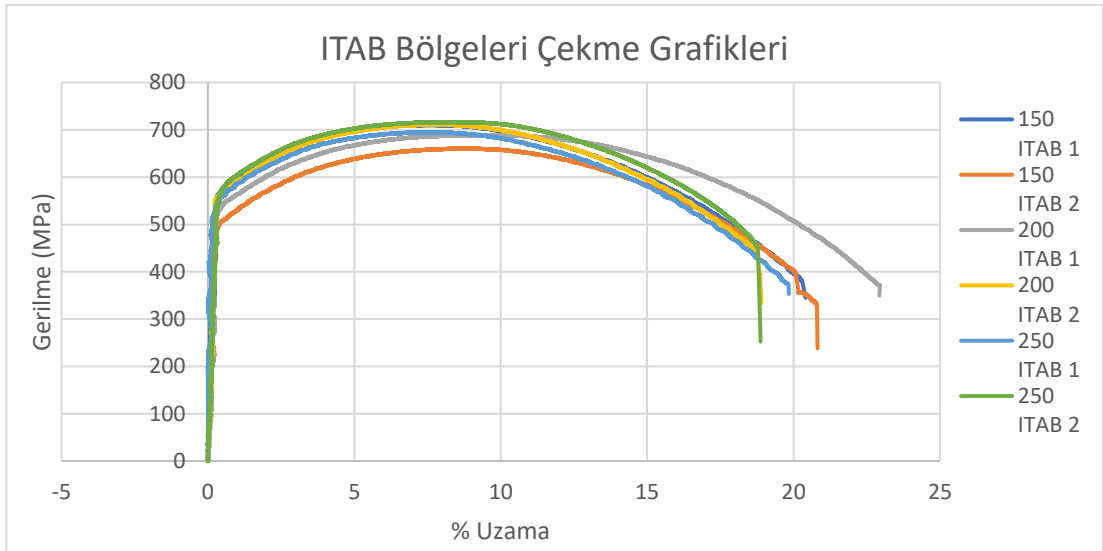


Şekil 4. 71 250°C ön ısı uygulanarak kaynatılan test plakalarından çıkartılan numunelerin çekme deney grafikleri

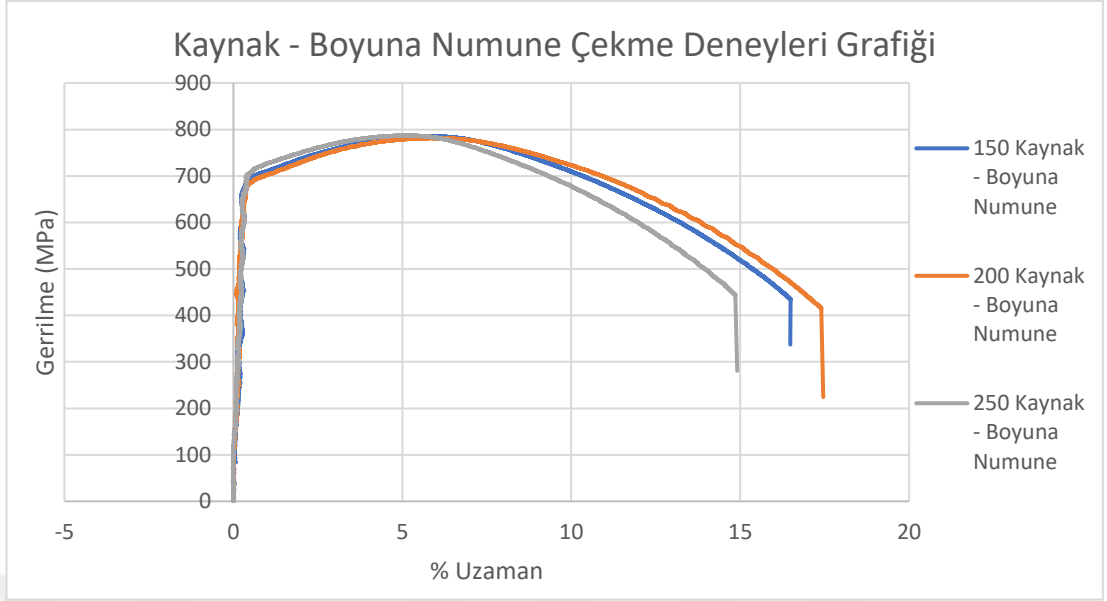


Şekil 4. 72 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin ana malzeme çekme deney sonuçlarının kıyaslanması

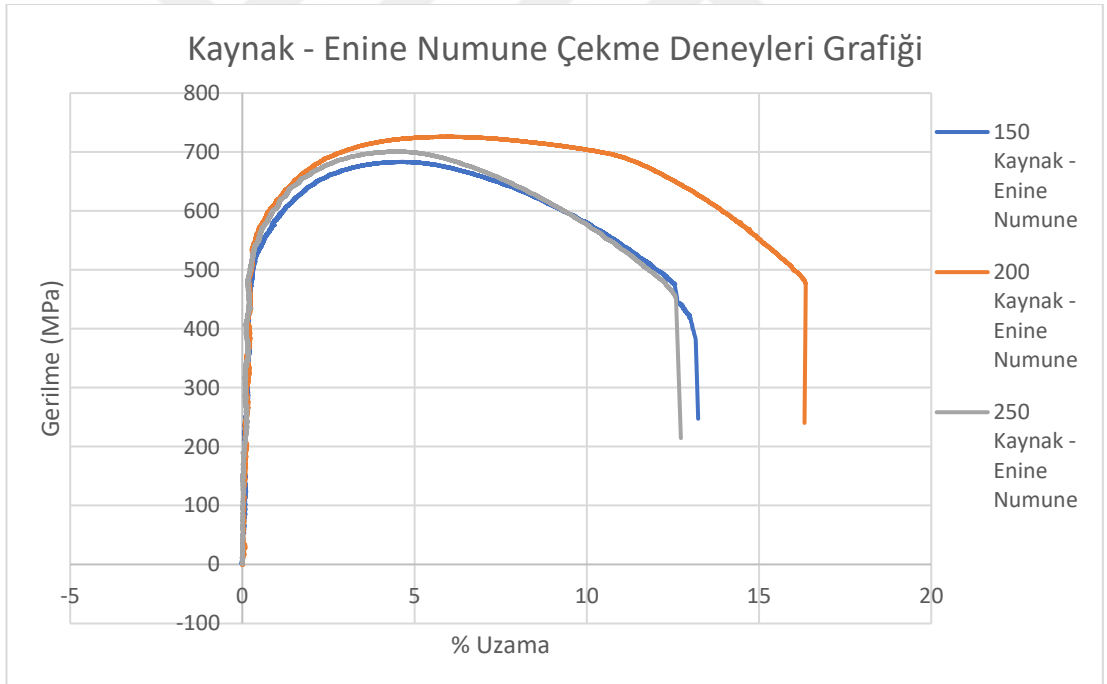
Ana malzemeden çekme deneylerinde kullanılan numuneler kaynaktan 80mm uzaklıkta ana malzeme üzerinden çıkartılmıştır.



Şekil 4. 73 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin ITAB çekme deney sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 4. 74 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin kaynaktan boyuna yönde çekme deney sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 4. 75 150°C, 200°C ve 250°C ön ısı uygulanan numunelerin kaynaktan enine yönde çekme deney sonuçlarının kıyaslanması

Tablo 4. 5 Çekme deneyleri sonucunda elde edilen çekme dayanımları, akma dayanımları ve % uzamalar

Numune Bölgesi	Ön Isı	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	% Uzama
Ana Malzeme	150	715	578	22.09
	200	729	587	20.55
	250	748	623	18.1
ITAB	150 ITAB 1	710	573	21.15
	150 ITAB 2	660	507	21.38
	200 ITAB 1	689	540	22.78
	200 ITAB 2	711	563	19.44
	250 ITAB 1	695	556	21.1
	250 ITAB 2	717	577	19.2
Kaynak Boyuna Numune	150	785	697	16.93
	200	782	686	18.04
	250	787	711	15.35
Kaynak Enine Numune	150	683	531	14.15
	200	726	564	15.65
	250	700	545	13.7

- 200C ön ısı uygulanan numunenin ITAB bölgesinde uzamanın diğerlerinden daha fazla olması, enine çekme deneyinde de uzamasının daha yüksek olmasını sağladığı görülmüştür.
- 200C ön ısı uygulanan numunenin kaynaktan boyuna yönde çıkartılan çekme deneylerinde de uzamasının diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Kaynaklı plakadan enine çıkartılan numunelerin %uzama değerinin diğer tüm numunelerden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum birbirinden farklı yapıların bir araya gelmesi sonucu birbirlerini uzama özelliği olarak olumsuz etkilediğini (mismatch etkisi) göstermektedir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLARIN YORUMLANMASI

- 150°C ön ısı ile yapılan kaynakta kaynak kökünün formu çok düzgün iken 200°C ön ısı ile yapılan kaynağın kök formunun bozulduğu, 250°C ön ısı ile yapılan kaynağın kök formunun ise çok daha bozuk olduğu görülmüştür. Aynı zamanda düşük ön ısı sıcaklığında kaynakçı ergime noksanlığı hatası bırakmaz iken ön ısı sıcaklığı arttıkça ergime noksanlıkları ve aşırı duruş kalkış nedeniyle kaynak formunda bozukluklar görülmüştür. Plaka kaynağında ön ısı sıcaklığı arttıkça kaynakçı kaynak eldiveni ve yanmaz battaniye kullanmasına rağmen elinin, kolunun sıcaklıktan etkilendiği ve kaynak banyosuna hakimiyetini kaybetmesi sonucu kaynak hataları bıraktığı görülmüştür.
- Ön ısı sıcaklığı arttıkça kaynak banyosu ile ana malzeme arasındaki kontrast farkının azaldığı ve kaynakçının ayırım yapmakta zorlandığı görülmüştür. Bu kontrast farkı azalmasının da kaynakçının kök kaynağında fazla süreksizlik bırakmasına neden olduğu görülmüştür. Kaynakçı bu durumu için “kaynak banyosunun çamur gibi bir görüntü aldığı” şeklinde yorum yapmıştır. Alaşım elementlerinin yüksek sıcaklıkta kontrastı düşürücü bir etkisi olduğu düşünülmektedir.
- Makroyapı incelemeleri neticesinde 150°C ve 200°C ön ısı sıcaklığında kaynatılan parçalarda ısıdan etkilenen bölge genişlikleri birbirine benzer (maksimum 3-3,6mm) iken 250°C ön ısı sıcaklığında kaynatılan numunede ısıdan etkilenen bölgenin çok daha geniş (maksimum 6,59mm) olduğu görülmüştür. Bu durumun kaynakçının yüksek ön ısı uygulamasında kaynak eldiveni ve yanmaz battaniye kullanmasına rağmen banyoya hakimiyeti zorlaştığı için tel verme süresinin uzaması ve bu nedenle ısı girdisinin artması ile ilişkilendirilmiştir

- Kesit üzerinden 3 er sıra şeklinde alınan sertlik değerlerinin ön ısı sıcaklığı artışı ile arttığı görülmüştür. Sertlik değerleri PWHT sıcaklığının arttırılması ile azalacağı düşünülse de mevcut durum modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliğinin ön ısı sıcaklığı artışı ile sertliğinin yükseldiğini göstermektedir. Bu durumun artan ön ısı sıcaklığı ile hem kalıntı gerilmelerin artması hem de karbür çökeltilerinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Sertlik değerleri incelendiğinde kaynak sonrası gerilim giderme tavlama (PWHT) sıcaklığının yetersiz kaldığı görülmüştür. Faz dönüşümü olmaması için PWHT sıcaklığının A_{c1} dönüşümünün altında olması gerekmektedir. PWHT sıcaklığı için malzeme sertifikasında belirtilen temperleme sıcaklığı olan 780°C 'ye kadar çıkılabileceği görülmektedir.
- Radyografik muayene bulgularında VT-PT-PAUT ile kök bölgelerinde tespit edilen ergime noksanlıklarının tespiti yapılamamıştır. Bu durum RT nin hacimsel hataların tespitinde daha uygulanabilir bir yöntem olduğunu fakat kılcal lineer hataların tespitinde yetersiz kaldığını göstermiştir.
- Üç nokta eğme deneyleri neticesinde her üç numunede de yırtılma, çatlak veya hacimsel boşluklar benzeri herhangi bir süreksizlik tespit edilmemiştir.
- 150°C ve 200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunelerden alınan mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde her iki numunede de benzer şekilde kaynak bölgesinde ve ergime çizgisinde tane irileşmesi görülmüştür. 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numuneden alınan mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde 150°C ve 200°C ön ısı ile kaynatılan numunelere göre kaynak bölgesinde ve ergime çizgisinde tane irileşmesinin çok daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca kaynaklı bölgenin ana malzeme tarafından alınan mikroyapı görüntüsünün de 150°C ve 200°C ön ısı ile kaynatılan numunelere göre daha büyük taneli olduğu görülmüştür. Bu durum ısı tesiri altında kalan bölgenin 250°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunede 150°C ve 200°C ön ısı uygulaması ile kaynatılan numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

- 200°C ön ısı uygulanan numunenin ITAB bölgesinden ve kaynaktan boyuna yönde çıkartılan çekme test numunelerinin uzama değerlerinin diğerlerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum 200°C ön ısı uygulanan plakadan enine yönde çıkartılan numunenin %uzama değerinin diğerlerinden daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bu durum en iyi %uzama değerinin 200° ön ısı uygulanan numunede sağlandığını göstermiştir.
- ASME BPVC Sec II Part D’de ASTM SA-387 Grade 91 malzeme için minimum çekme dayancı 585 Mpa, minimum akma dayancı 415 MPa olması gerektiği belirtilmekte olup yapılan çekme testlerinin sonuçları değerlendirildiğinde tüm numunelerin bu değerlerin üzerinde olduğu görülmüştür.
- Kaynaklı plakalardan enine yönde çıkartılan çekme numunelerinin %uzama değerlerinin diğer tüm numunelerden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum birbirinden farklı yapıların bir araya gelmesi sonucu birbirlerini uzama özelliği olarak olumsuz etkilediğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Alexandrov, B., et al. (2011). Phase transformations in creep strength enhanced ferritic steel welds. Proceedings of the VIII International Congress “Machines, Technologies, Materials”, Varna, Bulgaria.

American Petroleum Institute – API. API Technical Report 938-B: Use of 9Cr-1Mo-V (Grade 91) steel in the oil refining industry. 1st ed. Washington: API; 2008

ANSI/NACE MR 0175 /ISO 14156-1:2015 Part 2 Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons

ANSI/NACE MT 0103 / ISO 17495-1:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Metallic materials resistant to sulfide stress cracking in corrosive petroleum refining environments

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec II Part D Materials – Properties

ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section V Nondestructive Examination

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec VIII-1 Rules for Construction of Pressure Vessels

ASME B31.3 Process Piping

ASM Handbook, Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering

ASM Handbook, Volume 13A Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection

ASTM E407 – Standard Practice for Microetching Metals and Alloys

ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

AWS A5.28 / ASME SFA 5.28 Specification for low-alloy steel electrodes and rods for gas shielded arc welding

ASTM SA 387, Specification for pressure vessel plates, Alloy steel, Cr-Mo

AWS D1.1 2020 Structural welding code – steel

AWS Guide to Weldability Carbon and Low Alloy Steels

American Welding Society, The practice reference guide to welding metallurgy, 1999

Carrizo, D. A., et al. (2019). "Characterization of an ASTM A335 P91 ferritic-martensitic steel after continuous cooling cycles at moderate rates." Journal of Materials Research and Technology 8(1): 923-934.

David, S. A., et al. (2013). "Welding and weldability of candidate ferritic alloys for future advanced ultrasupercritical fossil power plants." Science and Technology of Welding and Joining 18(8): 631-651.

Erdoğan Tekin, “Metalografi” kitabı s.309, TUDÖKSAD, 2013

EN 1011-1 Welding - Recommendations for welding of metallic materials Part 1: General guidance for arc welding

EN ISO 3452-1 Tahribatsız muayene- Penetrant muayenesi- Bölüm 1: Genel kurallar

EN ISO 3452-5, Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 5: Penetrant testing at temperatures higher than 50 degrees C

EN ISO 3452-6, Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 6: Penetrant testing at temperatures lower than 10 degrees C

EN ISO 17637 Non-destructive testing of welds — Visual testing of fusion-welded joints

Ferrophosphorus - <https://en.wikipedia.org/wiki/Ferrophosphorus>

Francis, J., et al. (2009). "Effects of weld preheat temperature and heat input on type IV failure." *Science and Technology of Welding and Joining* 14(5): 436-442.

Iron(II) sulfide - [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(II\)_sulfide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(II)_sulfide)

Mayr, P. (2007). Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9% chromium steels, na.

Srivastava, B. K., et al. (2010). "A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on mechanical behavior of ferrous metals." *International Journal of Engineering Science and Technology* 2(4): 625-631.

Vimalan, G., et al. (2017). "Phase transformation behaviour in P91 during post weld heat treatment: a gleeble study." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 70(3): 875-885.

YELBAY, H. İ., (2008). Tahribatsız yöntemlerle kalıntı gerilim ölçümündeki gelişmeler.