

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN 420 VE 304L PASLANMAZ
ÇELİKLERİN TIG KAYNAĞI SONRASI
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Mustafa Gökhan MURAT

TEMMUZ 2018

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Mustafa Gökhan MURAT tarafından hazırlanan SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN 420 VE 304L PASLANMAZ ÇELİKLERİN TIG KAYNAĞI SONRASI KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin Yüksek Lisans Tezi olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Aziz Barış BAŞYİĞİT (Danışman):

Prof. Dr. Adem KURT

Doç. Dr. Osman BİCAN

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

SAVUNMA SANAYİNDE KULLANILAN 420 VE 304L PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN TIG KAYNAĞI SONRASI KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MURAT, Mustafa Gökhan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı,

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Aziz Barış BAŞYİĞİT

TEMMUZ 2018, 91 sayfa

Bu çalışmada savunma sanayinde roketlerin kanatları ve diğer aksamaları olmak üzere endüstriyel bıçaklar ve çeşitli makine parçalarında kullanılan AISI/SAE 420 kalite 3 mm kalınlıktaki martenzitik paslanmaz çelik saclar ile yine savunma sanayinde özellikle ağır silahların namlu yönlendirme yükseliş ve alçalış ayar milleri gibi çeşitli aksam parçalarında ve makine sanayinde tercih edilen AISI/SAE 304L kalite 3 mm kalınlıktaki düşük karbonlu ve östenitik paslanmaz çelik saclar TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir.

Çalışmada; kaynak bölgesi mikro-yapısını ve kimyasal içeriğini belirleyen ER312, ER316L, ve ER2209 olmak üzere üç farklı bileşime sahip TIG ilave telleri %100 argon koruma gazı altında kaynak işlemlerinde kullanılmıştır. Kaynak işlemi sonrası; bütün numunelerin kaynak metali, ısının tesiri altındaki bölge ile birlikte ana malzemenin gözle muayenesi, makroskobik ve mikroskobik muayenesi ile mikro yapısal gelişimi, mikro sertlik taramaları, radyografik muayenesi, korozyon testi ve Charpy V-çentikli darbe testleri yapılmıştır.

Kaynaklı numunelerin radyografik muayeneleri sonucunda bazı test numunelerinde bölgesel süreksizliklere rastlanmıştır. Tüm kaynaklı numuneler korozyon testinde yetersiz dayanım sergilemişler ve birbirlerine yakın sonuçlar vermişlerdir. Kaynaklı numunelerin darbe testi sonuçlarında en yüksek darbe dayanımını ER2209 kodlu ilave tel kullanılan numune gösterirken aynı zamanda ısının tesiri altındaki bölgede ve kaynak metalinde en düşük sertlik profil sonucu vermiştir. Kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi sertlik tarama sonuçlarının tamamı 420 Martenzitik paslanmaz çelik ana malzemedenden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Savunma Sanayinde Kullanılan malzemeler, 420 ve 304L Kalite Paslanmaz Çelikler, TIG Kaynağı.

ABSTRACT

INVESTIGATING THE CORROSION AND MECHANICAL PROPERTIES OF 420 WITH 304L STAINLESS STEELS THAT ARE USED IN DEFENSE INDUSTRIES AFTER TIG WELDING

MURAT, Mustafa Gökhan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defense Technologies, Master of Science Thesis

Supervisor: Dr. Academician Aziz Barış BAŞYİĞİT

July 2018, 91 pages

In this study, AISI/SAE420 quality martensitic stainless steel that preferred in defense industries especially rocket wings and other main parts is TIG welded with AISI/SAE304L quality low carbon austenitic stainless steel that used especially in defense industries heavy weapons barrel positioning rising and downswing adjusting mills and related parts with both thicknesses of 3 mm plates.

As filler metal determines the weld metals microstructures and chemical compositions, 3 different TIG welding rods of ER312, ER316L ve ER2209 with 3 different chemical composition are used in welding operations under %100 argon shielding gas.

Visual tests, macrostructural and microstructural analysis, microhardness tests, radiographic inspection, corrosion tests, Charpy V-notch impact tests are applied to all weldments weld metals, heat effected zones and also to base metals after welding operations.

Regional discontinuties are detected wtihin some test specimens by radiographic inspections. All of the weldments showed insufficient corrosion resistance in corrosion tests and exhibited close results within each other. The specimen that welded by ER2209 coded TIG welding rod executed the highest impact test results besides exhibiting the least micro-hardness profiles at heat effected zones and weld

metals. All of the welded specimens weld region hardness profiles are found to be lesser than 420 Martensitic stainless steel base metal.

Key Words: Materials Used in Defense Industries, 420 304L Quality Stainless Steels, TIG Welding.



TEŞEKKÜR

Bilimin ve bilgiye ulaşmanın önemi giderek arttığı çağımızda, benimde bilime katkıda bulunmamda yardımcı olan ve tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen tecrübesi ve fikirleriyle biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez danışmanı hocam, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Aziz Barış BAŞYİĞİT hocama, deneylerin yapılması için gerekli laboratuvar ortamının ve fiziksel ortamın sağlanmasında ellerindeki imkanı bizlere sağlayan Gazi Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Adem KURT'a; tez çalışmalarım esnasında, bilgi ve tecrübeleriyle malzemelerim tedariki konusunda yardımlarını esirgemeyen ve manevi desteğini hep hissettiğim değerli hocam, Gazi Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ'e;

Maddi manevi desteklerini esirgemedi yanımda olan yalnız olmadığımı hissettiren, uzun yıllar birlikte yürüdüğüm çok değerli dostlarım Mehmet Fatih SANVER, Şakir YAKIN ve Özhan ŞİRİN'e ;

Beni bu ana gelmeme vesile olan varlıklarını her daim hissettiren canım annem ve babam Selvinaz MURAT ile Yakup MURAT'a; çok değerli abim Muhammed Görkem MURAT'a ve kardeşim Furkan MURAT'a; kuzenim,değerli dostum Alperen LALE'ye sevgi ve desteğinin bu güne kadar benden hiç esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER	3
2.1. Paslanmaz Çelik Türleri.....	4
2.1.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	6
2.1.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	9
2.2. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	13
2.2.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	13
2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	14
2.3. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	15
2.3.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	17
2.3.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	17
2.4. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri.....	19
2.4.1. Tanelerarası Korozyon.....	20
2.4.2. Oyuklama (Çukurcuk) Korozyonu	20
2.4.3. Gerilmeli Korozyon Çatlağı	21
2.4.4. Aralık Korozyonu	22
2.4.5. Galvanik Korozyon.....	23
3. TIG KAYNAĞI	24
3.1. TIG Kaynak Yönteminin Uygulama Alanları.....	26
3.2. TIG Kaynak Yönteminin Avantaj Ve Dezavantajları	27
3.3. TIG Kaynak Yönteminde İlave TIG Teli Seçilmesinde Kullanılan Schaeffler Diyagramı	28

3.3.1. Schaeffler Diyagramında Kaynak Bölgesinin Bulunduğu Konuma Göre Özelliklerinin Belirlenmesi	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
4.1. Ana Malzemeler İlave Metaller ve Koruyucu Gaz	31
4.1.1. Ana Malzemeler.....	31
4.1.2. İlave Metaller	32
4.1.3. Koruyucu Gaz	34
4.2. Numune Hazırlanışı	34
4.2.1. Kesme işlemi	34
4.2.2. Kaynak Ağız Hazırlığı İşlemi	36
4.2.3. Kaynak Öncesi Tavlama İşlemi.....	37
4.2.4. Kaynak İşlemi	37
4.2.5. Gerilim Giderme Isıl İşlemi.....	40
4.2.6. Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Muayeneleri.....	41
4.2.7. Kaynaklı Numunelerin Taşlanması	41
4.2.8. Tel-erezyon Yöntemi ile Kaynaklı Bağlantılardan Test Numunelerinin Çıkarılışı.....	43
4.3. Mikro yapısal İncelemeler.....	45
4.4. Sertlik Testi	48
4.5. Çentikli Darbe Testi	48
4.6. Korozyon Testi.....	51
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	56
5.1. ER312, ER316 ve ER2209 TIG Teli Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Muayene Sonuçları	60
5.2. Mikro Yapı İncelenmesi.....	65
5.2.1. AISI/SAE304L (1.4307) ve AISI/SAE420 (1.4021) Ana Malzemelerin Mikro Yapıları.....	65
5.2.2. ER312 TIG Teli İle Birleştirilmiş Test Numunelerinin Mikro Yapıları.....	66
5.2.3. ER316 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Mikro Yapıları.....	69
5.2.4. ER2209 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Mikro Yapıları.....	72

5.3. Sertlik Testi	74
5.3.1. ER312 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Sertlik Taraması	74
5.3.2. ER316 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Sertlik Taraması	76
5.3.3. ER2209 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Sertlik Taraması	78
5.4. Çentikli Darbe Testi	80
5.5. Korozyon Testi.....	82
6. SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
2.1. Çeşitli paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom oranları [3].....	4
2.2. Schaeffler diyagramı [3]	5
2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler [3].....	7
2.4. Östenitik paslanmaz çeliklerde temel alaşım elementi ilaveleri [3].....	10
2.5. Östenitik paslanmaz çeliğin mikro-yapısı [16]	13
2.6. AISI304L'ün AISI12L13 lazer kaynağı [29].....	19
2.7. Taneler-arası korozyonun şematik gösterimi [32]	20
2.8. Oyuklanma korozyonunun şematik gösterimi [32].....	21
2.9. Gerilmeli korozyon çatlağı [32]	22
2.10. Aralık korozyonu şematik gösterimi [36]	23
3.1. TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi [37]	24
3.2. TIG kaynak donanım şema	26
3.3. Schaeffler diyagramı	29
4.1. Safan CNC Hidrolik Abkant	35
4.2. Kaynak öncesi deney numune ölçüleri	35
4.3. Kaynak ağzı ölçüsü ve kullanılan ekipmanları	36
4.4. Kaynak ağzı hazırlığı yapılmış numune.....	36
4.5. Isıl işlem fırını	37
4.6. Kaynak edilmek üzere konumlandırılmış 304L ve 420 paslanmaz çelik numunelerin ölçüleri.....	38
4.7. ESAB TIG 4300i /AC/DC Model kaynak makinesi	38
4.8. (a) (b) (c) Kök koruma gazı aparatı.....	40
4.9. Gerilim giderme işlemi sonrası kaynaklı numuneler	40
4.10. Radyografik muayene cihazı.....	41
4.11. Taksan TYT-400 Model taşlama tezgahı.....	42
4.12. Taşlama tezgahı numune bağlama aparatı	42
4.13. Çentik darbe, korozyon, sertlik ve mikro yapı numuneleri yerleştirme şeması	43
4.14. TS EN ISO 15614-1 Standardına göre test numunelerinin ölçülendirilmesi	44

4.15. Makıno U6 Telerezyon tezgahı.....	45
4.16. Kesilmiş numuneler	45
4.17. Bakalit kalıba alınan mikro-yapı inceleme numuneleri	46
4.18. Mikro-yapı çalışmalarında kullanılan parlatma cihazının görüntüsü.....	46
4.19. Elektrolitik dağlama cihazı	47
4.20. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik mikroskop	47
4.21. Emco test mikro-vikers sertlik ölçüm cihazı.....	48
4.22. Çentik darbe test numunesi ölçüleri.....	49
4.23. Darbe test cihazı.....	49
4.24. Darbe testi öncesi numuneler	50
4.25. Çentik darbe test numunelerin deney sonrası görüntüleri.....	50
4.26. Numunelerin korozyon testi öncesi ön yüzünden çekilmiş görüntü	51
4.27. Numunelerin korozyon testi öncesi arka yüzünden çekilmiş görüntü	51
4.28. 0.0001g Hassasiyetinde terazi.....	53
4.29. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ bileşimi ile hazırlanmış çözeltinin test öncesi görünümü	54
4.30. 72 Saat Sonra $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ Çözeltilisinin Görünümü	55
5.1. Schaeffler diyagramında ER312 kaynak bölgesinin yapısı	58
5.2. Schaeffler diyagramında ER316 kaynak bölgesinin yapısı	59
5.3. Schaeffler diyagramında ER2209 kaynak bölgesinin yapısı	60
5.4. ER312 TIG teli ile bileştirilmiş test numunelerinin radyografik muayenesi	62
5.5. ER316 TIG teli ile bileştirilmiş test numunelerinin radyografik muayenesi	63
5.6. ER2209 TIG teli ile bileştirilmiş test numunelerinin radyografik muayenesi	64
5.7. AISI/SAE 420Ana malzeme mikro-yapısı (200x)	65
5.8. AISI/SAE304L ana malzeme mikro-yapısı (200X).....	66
5.9. ER312 TIG teli ile kaynak yapılan numune 420-kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x).....	67
5.10. ER312 TIG teli ile kaynak yapılan numune kaynak bölgesi(200x).....	68
5.11. ER312 TIG teli ile kaynak yapılan numune 304L-kaynak metali geçişi- ITAB bölgesi(200x)	69
5.12. ER316 TIG teli ile kaynak yapılan numune 420 kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)	70

5.13. ER316 TIG teli ile kaynak yapılan numune kaynak bölgesi (200x).....	71
5.14. ER316 TIG teli ile kaynak yapılan numune 304L-kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)	71
5.15. ER 2209 TIG teli ile kaynak yapılan numune 420-kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)	72
5.16. ER2209 TIG Teli İle Kaynak Yapılan Numune Kaynak Bölgesi(200x)	73
5.17. ER2209 TIG teli ile kaynak yapılan numune 304L kaynak metali geçişi- ITAB bölgesi (200x)	73
5.18. Korozyon testi sonrası temizlenmiş numunelerin ön yüz görüntüleri	82
5.19. Korozyon testi sonrası temizlenmiş numunelerin arka yüz görüntüleri.....	82



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	Sayfa
2.1. Standart martenzitik paslanmaz çelikler [5].....	6
2.2. Martenzitik paslanmaz çelik tipleri [5]	8
2.3. Östenitik paslanmaz çelik türleri [8]	11
2.4. Martenzitik paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı mekanik özellikleri [5]	14
2.5. Bazı östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri [19]	15
4.1. AISI/SEA 304L Paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi	32
4.2. AISI/SEA 420 Paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi	32
4.3. AWS A5.9 ER312, EN ISO 14343-A W 29 9 TIG kaynak teli üretici kimyasal içeriği.....	33
4.4. AWS A5.9 ER312, EN ISO 14343-A W 29 9 Kaynak teli üretici mekanik dayanım değerleri (minimum)	33
4.5. AWS A5.9 ER316L, EN ISO 14343-A WZ 19 12 3L TIG kaynak teli üretici kimyasal içeriği.....	33
4.6. AWS A5.9 ER316L, EN ISO 14343-A WZ 19 12 3L TIG kaynak teli üretici mekanik dayanım değerleri.....	33
4.7. AWS A5.9 ER2209 EN ISO 14343-A W 22 9 3 N L TIG kaynak teli üretici kimyasal içeriği.....	34
4.8. AWS A5.9 ER2209 EN ISO 14343-A W 22 9 3 N L TIG kaynak teli üretici mekanik dayanım değerleri	34
4.9. Kaynak işlemi parametreleri	39
4.10. Korozyon testi için numune ebat ölçümleri	52
4.11. Korozyon testi deney öncesi ağırlık tartımları	54
5.1. Schaeffler Diyagramına göre krom nikel eşdeğer tablosu	57
5.2. ER312 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numune sertlik taraması	75
5.3. ER316 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numune sertlik taraması	77
5.4. ER2209 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numune sertlik taraması	79
5.5. Mikrovickers sertlik testi taraması aritmetik ortalamaları(Hv _{0.3})	80
5.6. Çentikli darbe test sonuçları.....	81
5.7. Kaynaklı numunelerin darbe enerjileri aritmetik ortalamaları.....	81
5.8. Korozyon testi deney sonrası ağırlık tartımları.....	83

5.9. Kaynaklı numunelerin korozyon hızları.....	84
5.10. Korozyon kaybı, korozyon hızı ve yüzey alanları aritmetik ortalamaları.....	85



SİMGELER DİZİNİ

γ	Östenit
α	Ferrit
σ	Sigma Fazı (Fe-Cr Bileşiğı)
δ	Delta Ferrit

KISALTMALAR DİZİNİ

TIG	Tunsten Inert Gaz
KHM	Kübik Hacim Merkez
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
KYM	Kübik Yüzey Merkez
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ELC	Ekstra Düşük Karbon (Extra Low Carbon)
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron And Steel Institute)
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
DKP	Soğuk Haddelenmiş Saç
ASTM	American Standard Test Method (American Society For Testing And Materials)

1. GİRİŞ

Yapı çeliklerinin çeşitli agresif korozyon ortamlarındaki zayıf korozyon direnci, düşük ve yüksek sıcaklık uygulamalarında yetersiz mekanik dayanım sergilemeleri nedeniyle, paslanmaz çelikler; günümüzde özellikle yüksek korozyon ve sıcaklık dayanımı talep eden çeşitli endüstriyel mühendislik uygulamalarının artan ihtiyaç kaynağı haline gelmektedir. Bu çeliklerin gün geçtikçe daha da ilgi çeken uygulama alanını savunma sanayinde kullanılan çeşitli imalat parçaları oluşturmaktadır. Bu çelikler kimyasal bileşenlerinden kaynaklanan baskın faz yapılarına göre östenitik, ferritik, ferritik-östenitik, martenzitik ve çökeltiyle sertleştirilebilen (PH) türler olmak üzere beş ana grupta sınıflandırılmaktadırlar. Bu farklı sınıfların çeşitli agresif korozif ortamlarda ve koşullarda gerek ekonomik gerekse teknik nedenlerle bir arada kullanılma zorunlulukları bu çeliklerin kimyasal içeriğine göre farklılaşan türlerinin fiziksel, mekanik ve korozyon özellikleri hakkında daha derin bilgi sahibi olmayı kaçınılmaz hale getirmektedir.

Bu farklı tür paslanmaz çelik grupları çeşitli imalat yöntemleri ile birleştirilmektedirler. Birleştirme yöntemi olarak ergitmeli kaynak tekniklerinin seçimi pratik tasarım imkânı sunmaktadır. Paslanmaz çeliklerin zengin alaşım elementi içerikleri çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri sırasında maruz kalınan sıcaklıklara bağlı olarak bazı zararlı bileşikler oluşturmaya yatkın olmalarından ve bu bileşiklerin bağlantının nihai yapısının hem korozyon direnci hem de mekanik dayanç değerlerini düşürmelerinden dolayı kaynak öncesinde, sırasında ve sonrasında bazı tedbirlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada; paslanmaz çeliklerin bu farklı iki türlerinin çeşitli savunma sanayi endüstrilerinde gerek yüksek/düşük sıcaklık dayanımı gerekse oksitleyici korozif atmosfer koşullarında yoğunlukla kullanılan SAE/AISI 304L östenitik paslanmaz çelikler ile bilhassa son yıllarda artarak tercih edilen martenzitik paslanmaz çelik grubuna ait SAE/AISI 420 paslanmaz çelikleri deneysel malzeme olarak tercih edilmiştir. Martenzitik paslanmaz çelikler tatminkar korozyon dirençlerinin yanında ısıtılma işlemi yoluyla dayanım kazanma özelliğini bir arada barındırmaktadırlar. Deneysel birleştirme yöntemi olarak hem hassas çalışma olanağı sunması hem de

uygulama yaygınlığı açısından TIG kaynak yöntemi tercih edilmiştir. TIG kaynağında ergimeyen tungsten elektrot ısı kaynağı olarak kullanılırken kaynak bölgesini atmosferin zararlı etkilerinden korumak amacıyla saf argon koruyucu gazı kullanılmaktadır. Bu farklı iki grup paslanmaz çeliklerin üç farklı kimyasal bileşime sahip ilave TIG teli ile birleştirilmeleri sonrası kaynaklı bağlantının korozyon ve mekanik dayanım özelliklerine etkileri incelenecektir.



2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Çelikler ve diğer demir alaşımlarının büyük çoğunluğu atmosferde oksitlenirlerken yüzeylerinde bir oksit tabakası meydana gelmektedir. Paslanmaz çeliklerde, korozyon direnci artıran krom miktarıyla orantılı olarak yükselmektedir. Krom oksit tabakasının paslanmaz çelik çevresinde olduğu gözlenmekte ve bu tabaka oksidasyona ve korozyonun oluşmasına engel olmaktadır. Hareketsiz film tabakası kaldırıldığında ve tekrardan oluşması için gerekli ortamda bulunmaması durumunda paslanmaz çelik korozyona uğrayabilmektedir [1].

Paslanmaz çeliklerin içersinde korozyona dayanım özelliğini sağlayan elementlerin yanı sıra, ilave edilen diğer alaşım elementleri ve empüriteler bulunmaktadır [2].

Karbür ve ferrit yapıcı element olan Krom, korozyon ve tufalleşme direncini sağlayan alaşım elementidir.

Nikel, kuvvetli östenit yapıcı ve dengeleyici alaşım elementidir. Yüksek kromlu ve düşük karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini engellemek ve mukavemeti artırmak için katılmaktadır. Sıfır altı sıcaklıklarda kaynak metalinin tokluğunu eksi yönde etkiler. Mangan, östenit yapıcıdır. Tam östenitik alaşımlarda kaynak metalinin çatlama direncini yükseltir.

Alüminyum, güçlü bir ferrit yapıcıdır. Yüksek sıcaklıkta oksitlenme direncini artırmaktadır.

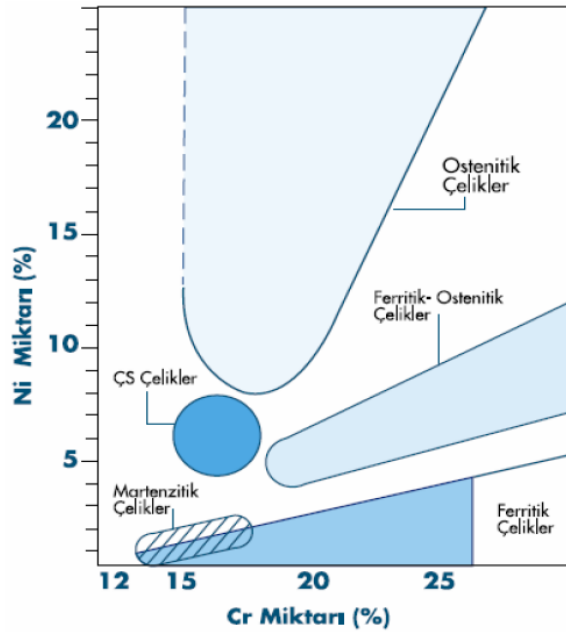
Titanyum ile birlikte bazı yüksek mukavemetli alaşımlara eklenerek yaşlanma sertleşmesi etkisini azaltır. Kuvvetli nitrür yapıcıdır. Niyobyum, kuvvetli bir karbür oluşturunucudur. Östenitik paslanmaz çelikleri krom karbür çökmesine karşı dengeleyici olarak kullanılır. Bazı martenzitik paslanmaz çelik türlerinde karbonu bağlayarak, çeliğin sertleşme eğilimini azaltmak amacıyla katılır.

Azot, kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini engellemek için eklenir. Mekanik dayanımı artırmaktadır. Sıfır altı sıcaklıklarda kaynak metali tokluğuna negatif yönde etkiler.

Kükürt, fosfor ve selenyum elementlerinden bir tanesi molibden ya da zirkonyum ile az miktarda katılarak paslanmaz çeliğin talaşlı imalata uygunluğunu artırır. Bu üç element de kaynaklı birleştirmede çatlak oluşumunu kaynakta meydana gelmesini sağlar.

Titanyum, östenitik paslanmaz çeliklerde krom karbür çökmesini önlemek için dengeleme elementi olarak katılır.

Tungsten bazı yüksek sıcaklık alaşımlarının mukavemet ve akışkanlık direncini arttırmak için kullanılır.

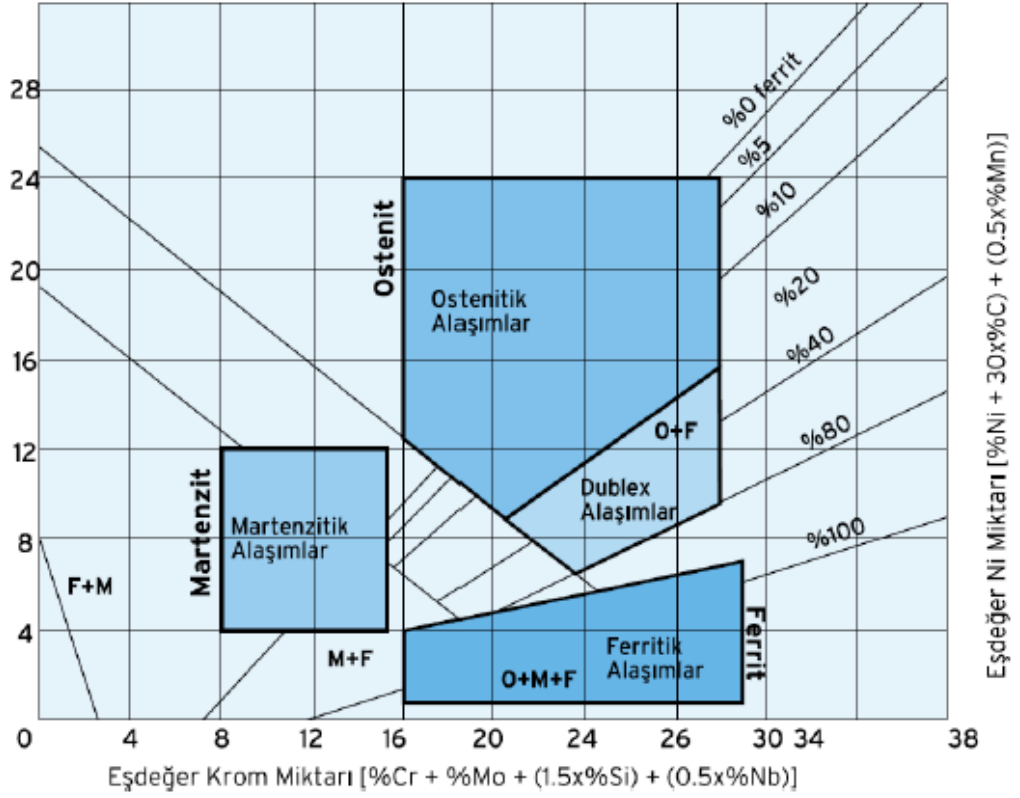


Şekil 2.1. Çeşitli paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom oranları [3]

2.1. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim oranları ve elementlerini değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar oluşturulmaktadır. Krom miktarı yükseltilerek ya da nikel ve molibden gibi alaşım elementleri eklenerek korozyon dayanımı yükseltilebilmektedir. Farklı olarak bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile istenilen özellikler elde edilebilmektedir. Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen krom, nikel, molibden ve mangandır. Krom ve nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler.

Paslanmaz çeliklerde yer alan fazların oluşum mekanizmaları Şekil 2.2. Schaeffler-diagramında gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Schaeffler diyagramı [3]

Paslanmaz çelikler beş ana başlıkta toplanabilirler:

- 1-Martenzitik paslanmaz çelikler
- 2- Östenitik paslanmaz çelikler
- 3-Ferritik paslanmaz çelikler
- 4-Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler
- 5- Östenitik-Ferritik (Çift Fazlı) paslanmaz çelikler [4].

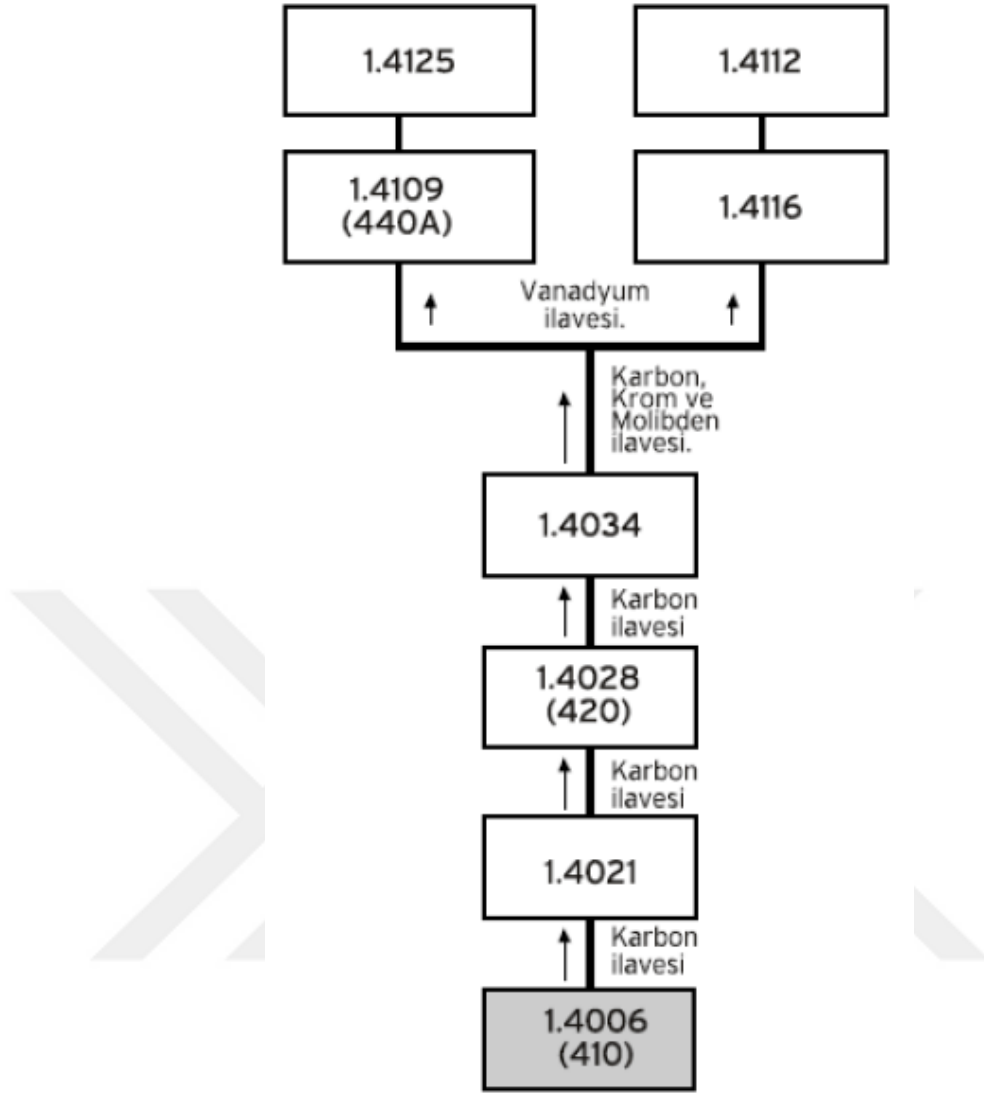
2.1.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, kübik hacim merkezli (KHM) ya da sertleştirilmiş durumda tetragonal kristal kafes sistemine sahip krom-karbon esaslı alaşımlardır. Isıl işlemle dönüşüm yoluyla sertleştirilebilirler. Martenzitik paslanmaz çelikler genellikle atmosferik korozyona karşı mukavemetlidirler. Cr içerikleri genellikle %11-18, C içeriği ise %1,2'ye kadar çıkabilir. Krom ve karbon oranları sertleştirme sonrası baskın martenzitik bir yapı elde etmek için dengelenmiştir. Çizelge 2.1.'de standart martenzitik paslanmaz çelikler verilmiştir [5].

Çizelge 2.1. Standart martenzitik paslanmaz çelikler [5]

Tipi	% Bileşim							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Diğer
403	0.15	1.0	0.5	11.5-13.0	-	0.04	0.03	-
410	0.15	1.0	1.0	11.5-13.0	-	0.04	0.03	-
414	0.15	1.0	1.0	11.5-13.0	1.25-2.25	0.04	0.03	-
416	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.15	0.6 Mo
416 Se	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.03	0.15 Se
420	Min 0.15	1.0	1.0	12.0-14.0	-	0.04	0.03	-
420 F	Min 0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.15	0.6 Mo
422	0.20-0.25	1.0	0.75	11.5-13.0	0.5-1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo
431	0.20	1.0	1.0	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	0.15-0.3 V
440 A	0.60-0.75	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo
440 B	0.75-0.95	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo
440 C	0.95-1.20	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo

Yaygın olarak kullanılan 410 tipi martenzitik paslanmaz çelik, %12 Cr içeriği ile yüksek mukavemet özelliğine sahiptir. Molibden, 422 tipi paslanmaz çeliklere mekanik özellikleri ve tane sınırı korozyonuna karşı korozyon direncini artırmak için katılmıştır. Nikel, 414 ve 431 tipi paslanmaz çeliklere yine aynı nedenlerle katılmaktadır.



Şekil 2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler [3]

Düşük karbonlu ve ortalama %13 Cr içeren paslanmaz çelikler süper martenzitik paslanmaz çelikler olarak isimlendirilir. Bu çelikler genellikle yağ ve gaz endüstrisinde tercih edilmektedir. Süper martenzitik paslanmaz çelikler, kaynak edilebilir martenzitik paslanmaz çelikler veya süper %13 Cr çelikleri olarak isimlendirilirler. Çizelge 2.2.'de süper martenzitik paslanmaz çelik türleri görülmektedir.

Çizelge 2.2. Martenzitik paslanmaz çelik tipleri [5]

Tipi	% Bileşim								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer
X80 11Cr-2Ni	<0.015	<2	0.15	11	2	<0.5	0.4	<0.012	-
HP 13 Cr	<0.03	0.4	<0.3	13	4	1	-	0.05	-
D 13.5.2N	0.02	0.7	0.3	13.3	4.8	1.6	0.1	0.08	-
X80 12Cr-4.5Ni	<0.015	<2	0.15	12	4.5	1.5	0.4	0.012	-
CRS	0.02	0.5	0.3	12.5	4.5	1.5	1.5	0.05	-
Super 13 Cr	0.02	0.5	0.2	12.2	5.5	2	0.2	0.02	0.2V
Super 13 C	0.02	0.4	0.2	12.5	5	2	-	<0.08	-
Super 13 Cr-6- 2.5-Ti	<0.01	0.4	0.3	12	6.2	2.5	-	<0.01	0.07 Ti
X80 12 Cr- 6.5Ni-2.5Mo	<0.015	<2	0.15	12	6.5	2.5	0.4	<0.012	-

Kaynak edilebilir martenzitik paslanmaz çelik türleri, yüksek dayanım, kimyasal olarak tatlı ve sıfır-altı sıcaklık ortamlarında iyi korozyon direnci ve -40 °C'nin altında tatminkar kırılma tokluğu gibi özellikleri sergilerler. Mikro-yapısı, yüksek dayanım ve tokluğa sahip düşük karbonlu temperlenmiş martenzitten meydana gelir. Çekme dayanımları, 780-1000 MPa arasındadır.

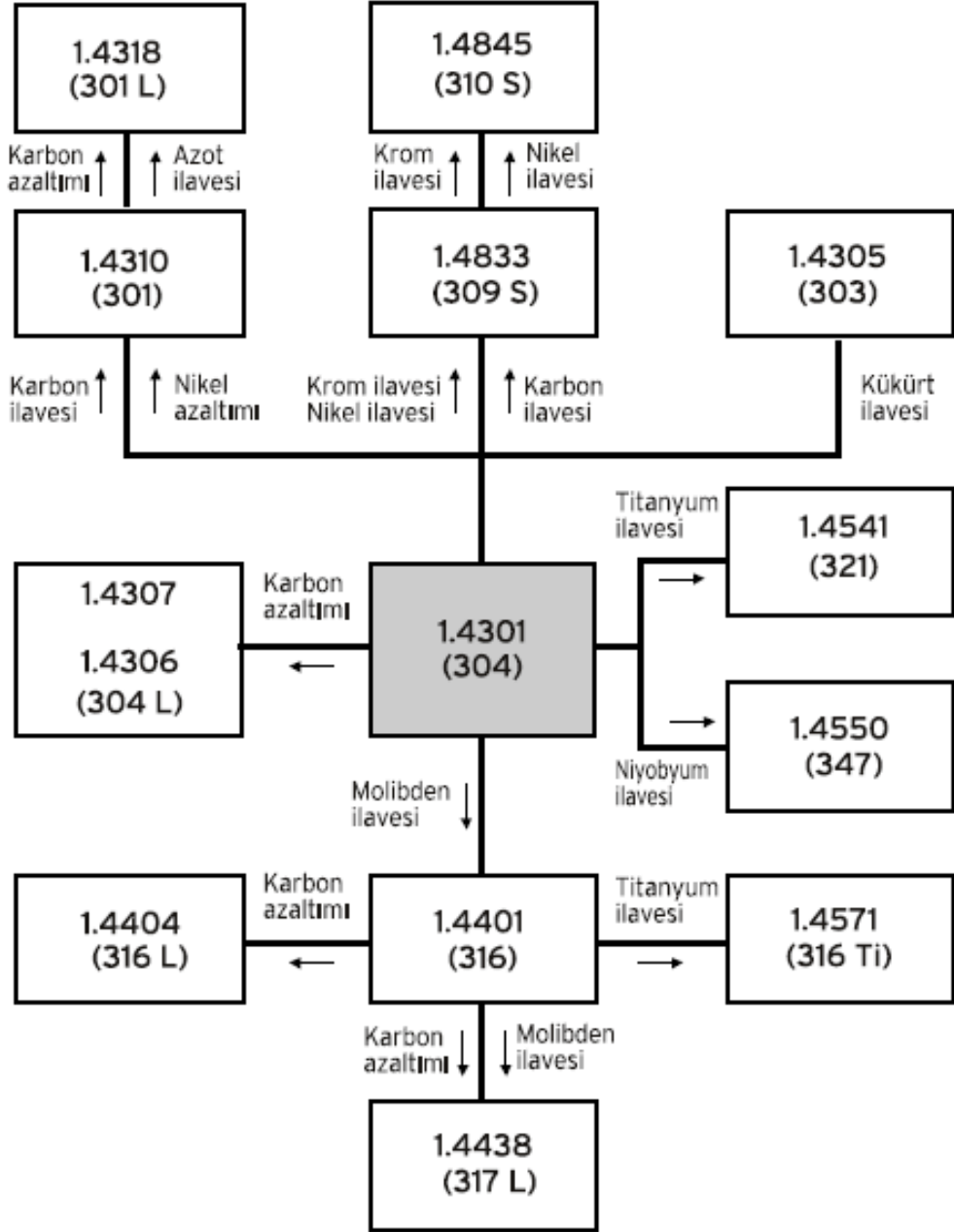
Kullanım yerleri;

Martenzitik paslanmaz çelikler, buhar tribünleri, jet motorları ve gaz tribünlerinde kullanılmaktadır. Daha fazla karbon içeriğine sahip martenzitik paslanmaz çelik, çatal-bıçak takımı, cerrahi dişçilik aletleri, makaslar, yaylar, valfler, dişliler, şaftlar, kamlar ve bilyeli yataklarda kullanılmaktadır [5].

Bununla birlikte; patentli (APX4(X4CrNiMo16-5-1) ve GKN® (33CrMoV12-2) alaşımları, çeşitli silahların namluları ile roket ve füzelerin kuyruk kısımlarında kullanılmaktadırlar. Yine patentli alaşım olan MLX ® 17, savunma sanayinde yorgunluk, stres, korozyon ve çatlamaya karşı yüksek dayanıklılık aranan uygulamalarda tercih edilen ve 1700 MPa bir çekme mukavemetine sahip olan bir martenzitik paslanmaz çelik alaşımı olarak kullanıma sahiptir [6].

2.1.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Kullanım ve alaşım çokluğu yönünde en zengin grup östenitik paslanmaz çelik grubudur. Manyetikleşmeyen östenitik çelikler; hem oda sıcaklığında, hem de yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik kafes sistemine sahip östenitik içyapılarını muhafaza ettiklerinden, normalleştirme ve sertleştirme ısı işlemleri tabi tutulamamaktadırlar. Tavlanmış durumda süneklikleri, toklukları ve şekillendirilebilme özellikleri düşük sıcaklıklarda iyidir. Mukavemetleri ancak, soğuk şekillendirme ile yükseltilebilir. Östenitik paslanmaz çelikler, genellikle %16 ile %26 krom, %35'e kadar nikel ve %20'ye kadar mangan içerebilirler. Nikel ve mangan temel östenit oluşturuç elementtirler. Östenitik paslanmaz çelikler yaklaşık ağırlıkça %18 krom ve %8 nikel içerirler. Bu çeliklerin, şekillendirilebilme, mekanik özellikleri ve korozyon dayanımları oldukça yüksektir. Manyetik özellik sergilemeyen östenitik paslanmaz çelikler, dönüşüm göstermediği için sertleştirme ısı işlemlerine de tabi tutulmazlar [7].



Şekil 2.4. Östenitik paslanmaz çeliklerde temel alaşım elementi ilaveleri [3]

Çizelge 2.3. Östenitik paslanmaz çelik türleri [8]

ASTM	EN	Kimyasal Bileşim (% ağırlık, en fazla)									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
201	14.372	0.15	5.5 7.5	1.00	0.06	0.03	16.0 18.0	3.5 5.5	-	0.25	-
301	14.310	0.15	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0 18.0	6.0 8.0	-	-	-
304	14.301	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0 20.0	8.0 10.5	-	-	-
304L	14.306	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0 20.0	8.0 12.0	-	-	-
304LN	14.311	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0 20.0	8.0 12.0	-	0.10 0.16	-
309	14.828	0.20	2.0	1.00	0.045	0.03	22.0 24.0	12.0 15.0	-	-	-
309S	14.833	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	22.0 24.0	12.0 15.0	-	-	-
310	14.841	0.25	2.0	1.00	0.045	0.03	24.0 26.0	19.0 22.0	-	-	-
310S	14.845	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	24.0 26.0	19.0 22.0	-	-	-
316	14.401	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0 18.0	10.0 14.0	2.0 3.0	-	-
316L	14.404	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0 18.0	10.0 14.0	2.0 3.0	-	-
316LN	14.406	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0 18.0	10.0 14.0	2.0 3.0	0.10 0.16	-
316Ti	14.571	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0 18.0	10.0 14.0	2.0 3.0	-	5x(C+N)Ti
321	14.541	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	17.0 19.0	9.0 12.0	-	-	(5xC)Ti
347	14.550	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	17.0 19.0	9.0 13.0	-	-	(10xC)Nb

Östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik dayanımları, genellikle soğuk şekillendirmeye yükseltilebilir. Alaşım katkıları ile özel alaşım bileşimi, kaynak edilebilirlik ve kaynak bölgesinin mikro-yapısı üzerine büyük bir etkiye sahiptir [9].

Östenitik paslanmaz çelik alaşımları arasında $X_{12}CrNi_{18.8}$ bulunmaktadır. Bu alaşım 1050 °C’ den suya atılır veya havada bekletilirse, ince östenit taneleri

oluşturmaktadır. Oda şartlarında çeliğin mikro-yapısı; ostenit + (δ)-ferrit ve $(Cr,Fe)_4C$ karbürlerinden meydana gelir. Bunun başka, σ -fazı da yapıda görülebilir [10].

Ni kuvvetli bir östenit meydana getirici olduğundan, bu çeliklerde katılaşma sırasında meydana gelen östenit oda şartları altındaki sıcaklıklarda bile dönüşmeden kalır. Soğuma esnasında, östenit-ferrit dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler su verme yolu ile sertleştirilemezler [11,12,13].

Östenitik paslanmaz çelikler, genellikle oksitleyici veya redükleyici ortamlarda mükemmel korozyon direncine sahip çeliklerdir. Östenitik paslanmaz çelikler, karbon yüksek karbon alaşımlı çeliklerden daha yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir.

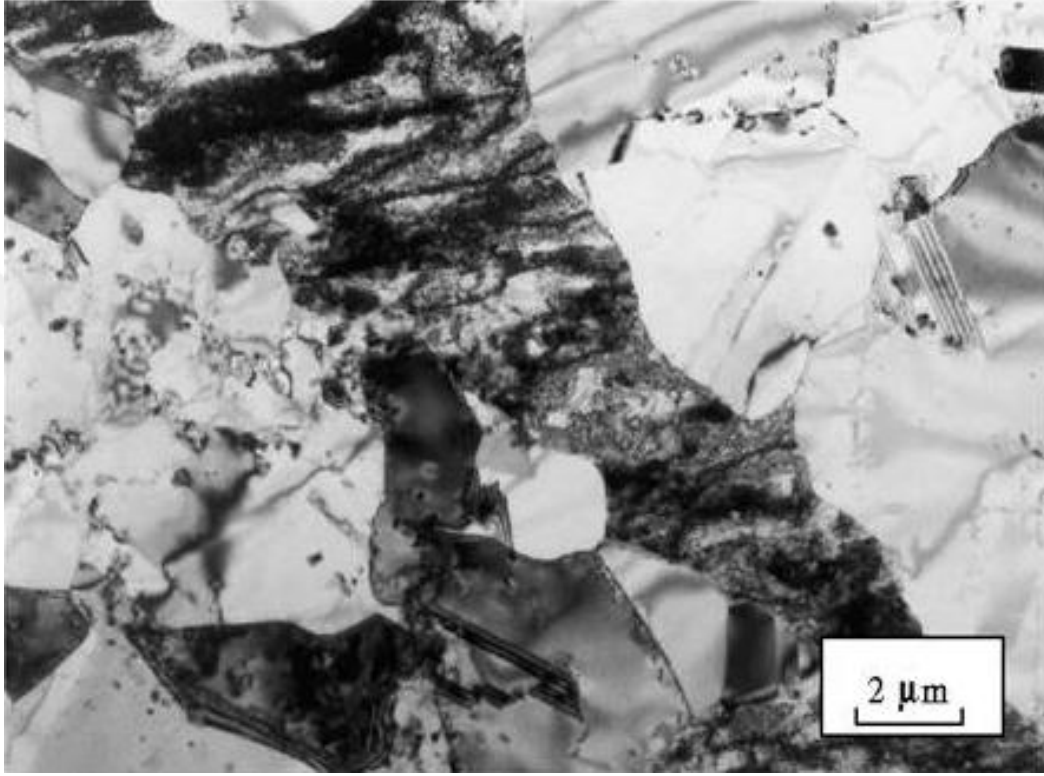
Genel özellikleri:

- İyi korozyon dayanımı sergilerler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri yüksektir.
- Sünek bir yapıya sahip olduğundan kolay şekillendirilebilirler,
- Hijyenik kullanım sergilerler.
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda yeterli mekanik özellikler gösterirler,
- Manyetik özellik göstermezler,
- Mukavemetleri yalnızca soğuk şekillendirme ile artırılabilir [14,15].

Bazı kullanım alanları:

Östenitik paslanmaz çelikler; makina sanayinde, gıda işleme ekipmanları, kimya endüstrisinde, tren yolu arabaları, asansörler, uçak parçaları, yaylar, antenler, ev aletleri, soğuk kaplar, mutfak gereçleri, yağmur olukları, sıvı gübreleme, lapa meyve tankları, fırın parçaları, pompa parçaları, ısı değiştiriciler, türbin kanatları, basınçlı kaplar, kaynatma kazanları, uçak egzost bacaları, jet motor parçaları, çatal, kaşık v.b. süt taşıma malzemelerinde kullanılırlar [14].

304L, A286, 718 paslanmaz çelik ve süper alaşımları; Uçak ve helikopter parça imalatında, donanmada (gemiler) S31266 deniz suyuna dayanıklı parçalarda, pistonlarda, 1.4404 (316L) su jeti türbinleri için şaftlarda, 1.3964 miller nükleer yakıt uygulamaları, 316L dövme boru basınç vericiler, 304L buhar jeneratörü için bölme plakaları, nükleer yakıt sistemleri için yayların imalatında kullanılmaktadır [6].



Şekil 2.5. Östenitik paslanmaz çeliğin mikro-yapısı [16]

2.2. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

2.2.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Martenzitik paslanmaz çelikler, ısı işlemleriyle 275 MPa'lık bir akma dayanımı sergilerler. Karbon içeriyle orantılı olarak sertleştirme ve temperleme sonucunda 1900 MPa'lık bir akma dayanımı seviyesine ulaşırlar. Martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri Çizelge 2.4.'de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Martenzitik paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı mekanik özellikleri [5]

Tipi	Uygulanan işlem	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik
403	Sertleştirilmiş	485	275	20	88 HRB
410	Sertleştirilmiş	485	205	20	95 HRB
410 S	Sertleştirilmiş	415	205	22	88 HRB
414	Temperlenmiş	795	620	15	-
416	Temperlenmiş	485	275	20	-
418	Temperlenmiş	965	760	15	-
420	Temperlenmiş	720	1480	20	52 HRC
422	Temperlenmiş	825	585	17	-
431	Sertleştirilmiş	795	620	15	-
440	Sertleştirilmiş	725	415	20	95HRB
440	Temperlenmiş	1790	1650	5	51 HRC

Bu alaşımlar yüksek karbon içerdiklerinden martenzit meydana getirmek için soğutma ve hemen arkasından temperleme işlemine tabi tutulurlar [17,18].

2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Östenitik paslanmaz çelikler bütün koşullarda östenitik yapıya sahip olduğundan ısı ile işlemle sertleştirilemezler. Buna karşılık soğuk deformasyona ile dayanımları bir miktar artırılabilir. Östenitik paslanmaz çelikler mikro-yapıda ki östenitin kararlı hale gelebilirliğine göre kararlı veya yarı kararlı östenitik çelikler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Kararlı östenitik çelikler mikro-yapıları soğuk deformasyondan sonra östenitik olarak kalmaktadır. Yarı kararlı östenitik paslanmaz çelikler ise soğuk deformasyondan sonra az miktar bir yapı martenzite dönüşebilmektedir [18, 19]. Tavlanmış şartlardaki bazı östenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında mekanik özellikleri Çizelge 2.5.'de verilmiştir.

Karbon içeriğinde az bir değişikliğin akma davranışını üzerindeki etkisi AISI 304 ve AISI 304L alaşımlarının akma dayanımları anlaşılmaktadır. Yaklaşık %0.08 karbon içerikli AISI 304 östenitik paslanmaz çelikler 290 N/mm² akma dayanımı mevcut iken daha düşük %0.03 karbon içeren AISI 304L tipi östenitik paslanmaz çeliğin akma dayanımı 269 N/mm² dir. Kararlı ve yarı kararlı östenitik paslanmaz çelikler

arasındaki fark, tavllanmış malzemelerin çekme dayanımındaki kararlılık net bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 2.5. Bazı östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri [19]

Çelik Türü (AISI)	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı % 0.2 (MPa)	Uzama (%)	% Kesit Daralması	Sertlik (Rockwell)
304	Tavlı	586	241	55	65	B 80
304L	Tavlı	552	207	55	65	B 76
309	Tavlı	620	276	45	65	B 85
310	Tavlı	655	276	45	65	B 87
316	Tavlı	586	241	55	70	B 80
316L	Tavlı	538	207	55	65	B 76
317	Tavlı	620	276	50	55	B 85
317L	Tavlı	586	241	50	55	B 80
321	Tavlı	599	241	55	65	B 80
347/348	Tavlı	634	241	50	65	B 84

Çeşitli östenitik paslanmaz çeliklerin farklı koruyucu gazlar altında birleştirilmesi ile yapılan bir çalışmada, koruyucu gaz bileşimlerinin kaynaklı bağlantının çekme mukavemetine ve % uzama değerlerine etki ettiğini ortaya koyarak kaynaklı birleştirmelerin sertlik ölçümleri sonucunda koruyucu gaz bileşiminin sertlik değerlerine etkisi de ortaya koyulmuştur [20].

2.3. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Kaynak edilebilirlik genel olarak; dayanım, süneklik ve çentik darbe dayanımı gibi mekanik özellikler ile kırılma, gerilme korozyon kırılması, genel korozyon dayanımı ve düşük sıcaklıklarda gösterilen çeşitli mekanik özellikleri kapsamaktadır [21, 22]. Bir malzemenin yüksek kaynak kabiliyetine sahip olması; kaynak şartları geniş bir aralıkta değişirken hiçbir önleme gerek kalmadan yeterli derecede bir kaynak kalitesinin elde edilebilmesi manasına gelmektedir. Düşük seviyede kaynak kabiliyeti tatminkâr bir sonuç alabilmek için özel tedbirlere ihtiyaç olduğunu ve

kaynak şartlarının kontrollü sınırlar arasında tutulmasının gerektiğini ifade edilmektedir.

Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti açısından bazı özelliklerini dikkate alınması gerekmektedir. Bu özellikler; Paslanmaz çeliklerin ısı iletim katsayıları oda sıcaklığında düşük alaşımlı ve sade karbonlu çeliklerin sahip olduğu değerlerin 1/3'ne yakındır. Paslanmaz çeliklerin ısı genleşme katsayıları sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin yaklaşık olarak bir buçuk kat kadardır. Diğer bir deyişle %50 daha yüksektir. Sade karbonlu çelikler düşük elektrik aktarma direncine sahip olmalarına karşılık bu değer paslanmaz çelik malzemelerde beş ile yedi kat daha büyüktür. Bahsedilen bu özellikler nedeni ile paslanmaz çeliğin kaynağında kendini çekme olayı sade karbonlu çeliklerin kaynağına göre daha fazladır. Kaynak dikişinin soğuması anında büyük oranda büzülme meydana gelmekte böylece kaynaklı bölgede oluşan yüksek gerilmeler çatlama tehlikesine yol açmaktadır. Bundan dolayı paslanmaz çeliklerin iki taraflı iç köşe dikişlerinde sıcak çatlakların meydana gelme olasılığı fazladır [20, 23].

Östenitik paslanmaz çeliklerin mevcut olan düşük ısı ve elektrik iletkenliği kaynak edilebilirlik açısından genellikle yararlı olup, kaynak esnasında düşük ısı girdisi ile çalışılması tavsiye edilmektedir. Kaynak sırasında oluşan ısı, kaynak bölgesinden, düşük karbonlu çelikte olduğunun aksine yavaş bir şekilde uzaklaşmaktadır. Malzemenin ısı direnci yüksek olduğundan direnç kaynaklarında daha düşük akım değerleri ile birleştirilebilmektedir [20, 24].

Östenitik paslanmaz çelikler oksitleyici ve redükleyici ortamlarda yeterli korozyon direnci göstermektedir. Kaynakla birleştirilen paslanmaz çelik imalatlarında östenitik paslanmaz çeliklerin tercih edilmelerinin en önemli nedenlerinden biri bu tip çeliklerin iyi kaynaklanabilirlik özellikleridir. Östenitik paslanmaz çelikler çeşitli kaynak yöntemleri kullanılarak kaynak edilebilirler [20, 25]. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak edilerek birleştirilmesinde çeşitli metalürjik etkenler korozyon davranışına karşı önemli rol oynamaktadır. Bunlar arasında başlıca; δ -ferrit oluşumu, taneler arası korozyona duyarlılık, gerilmeli korozyona duyarlılık ve sigma fazının oluşması yer almaktadır [25,26].

2.3.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Martenzitik paslanmaz çelikler %11-18Cr, %1.2'ye kadar karbon ve düşük miktarlarda Mn ve Ni içerirler. Bu çelikler tavlanaarak östenit meydana getirilmesi ve oluşan östenitin soğutma esnasında martenzite dönüştürülmesiyle sertleştirilmiş olurlar. Soğuma esnasında sert ve kırılgan martenzitik yapı meydana geldiğinde kaynak dikişinde çatlama eğilimi oluşur. Tercih edilen dolgu metalinin krom ve karbon içeriğinin ana malzemeninkine yakın olmasında fayda vardır. 410 türü dolgu malzemeleri örtülü elektrot, dolu tel ve özlü tel olarak üretilirler ve 402, 410, 414 ve 420 türü çeliklerin kaynağında kullanılabilirler.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin genellikle ön tavlama sıcaklığının ve pasolar arası sıcaklığın 205-315 °C arasında tutulması gerekmektedir. Ağırlıkça %0.2' nin üzerinde karbon bulunan martenzitik paslanmaz çeliklere kaynak dikişinin sünekliğini ve tokluğunu arttırmak amacıyla kaynak sonrasında genellikle ısıtım işlemi uygulanmalıdır [27].

2.3.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Bu tür çelikler yeterli derecede kaynak kabiliyetine sahiptirler. Ancak kaynak öncesi belirtilen mekanik ve korozyon dayanımı özelliklerini kaynak sonrası da dikkate almak gerekir. Zira bu çeliklerin kaynağında sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekme meydana gelir. Bu tip paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak metalinin faz içeriğinin saptanmasında Schaffler diyagramı ve bu diyagramın geliştirilmiş şekli olan De Long diyagramı kullanılır. Bu diyagramlar yardımıyla kaynak metalinin yapısında bulunabilecek δ-ferrit miktarının saptanması için ferrit yapıcı elementler Mo, Cr, Si, Nb krom eşdeğeri olarak yatay eksen, östenit yapıcı elementler Ni, Mn, C, N nikel eşdeğeri olarak dikey eksen, yerleştirilmiştir. De Long diyagramında ferrit sayıları ve buna bağlı olarak δ -ferrit yüzdesi bulunabilir. Bu diyagramların kullanılmasıyla kaynak metalinde ortaya çıkabilecek çeşitli fazlarla bağlantılı problemler önceden bilinerek gereken önlemler alınabilir.

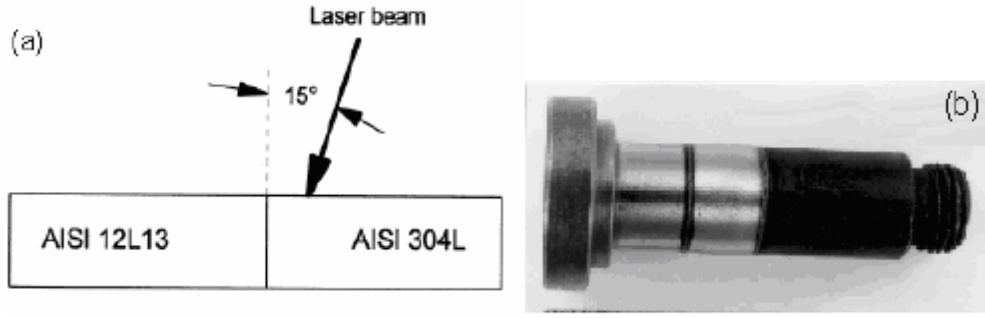
Östenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin kaynağında en önemli metalurjik problemlerden birisi de ITAB' da bu bölgenin 500-900 °C arasında uzun süre tavlı

kalması sonucu oluşan krom karbür çökmesidir. Bu krom karbürler tane sınırlarında çökeler ve çeliği taneler arası korozyona karşı hassas hale getirirler. Bu bakımdan kaynak ile birleştirilmesi gereken östenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin C içeriğinin en çok %0.06, optimum %0.03 civarında olması gerekir. Bu amaçla üretilen türlerde C miktarı düşürülerek korozyon direncinin artırılması ön görülmüştür. Krom karbür çökmesini önlemek için uygulanan bir başka yöntem de çeliğin bileşimine Ti, Nb ve Ta gibi stabilizasyon elementlerinin katılmasıdır.

Kaynak esnasında tane sınırları boyunca karbür çökmesi meydana gelirse, bir ısıtma işlemiyle etkileri azaltılabilir. Bunun için gerekli olan ısıtma işlemi, parçanın 1100 °C'ye kadar ısıtılıp sonra suda soğutulmasından ibarettir. Böylece meydana gelen krom karbürler östenit içerisinde çözünür dolayısıyla hızlı soğutulmakla karbür teşekkülü önlenmiş olur [28].

Östenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin ark kaynağında kullanılmak üzere rutil ve bazik örtülü elektrotlar geliştirilmiştir. Bunlar örtülerinde stabilizasyon elementleri içerirler. Burada da bazik örtülü elektrotları kullanırken C'lu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılan bazik elektrotlarda olduğu gibi, 300 °C gibi bir sıcaklıkta ısıtılarak içerdiği nem alınmalıdır. Östenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin örtülü elektrotlarla ark kaynağında mümkün olan en düşük çaplı elektrot seçilmeli ve mümkün olan en düşük akım şiddeti tercih edilmelidir. Ayrıca elektrod salınım hareketinden kaçınılmalıdır. Çok pasolu kaynakta ise her paso uygulaması sonrası oda sıcaklığına kadar soğutulmalı, ikinci paso daha sonra uygulanmalı ve hızlı soğutma yapılmalıdır.

0.9 mm kalınlığında ve 18 mm çapındaki AISI 304L ve AISI 316L valf tüplerinin lazer kaynağı ile birleştirilebilirliği araştırılmış, lazer ısısının 15 derece açıyla (Şekil 2.6.) ve 0.12-0.14 mm AISI 304L'e doğru hareketi ile gerçekleştirdiği kaynak sonucunda hem sıcak çatlak ve mikro çatlak oluşumu önlemiş hem de iyi sonuçlar elde edildiği ileri sürülmüştür [29].



Şekil 2.6. AISI304L’ün AISI12L13 lazer kaynağı [29]

2.4. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Özellikleri

Korozyon, metalin başka bir metalle ya da bulunduğu ortamla arasında kimyasal ya da elektrokimyasal etkileşim göstererek oksitlenmesine denir. Kimyasal korozyonda metal ile ortam arasında elektron alışverişi sonucu yüzeyde farklı özelliklerde bir oksit tabakası meydana gelmektedir. Elektrokimyasal korozyon ise potansiyel farkı olan iki yüzey arasında ya da bir yüzeyde potansiyel farkı bulunan farklı bölgeler arasında meydana gelmektedir. Genellikle paslanmaz çeliklerde elektrokimyasal korozyon oluşur [30].

Paslanmaz çeliklerde ortam korozyonuna karşı koruyucu bir oksit film tabakası oluşmaktadır. Bu oksit film tabakası aynı zamanda bir korozyon sonucudur. Paslanmaz çeliklerde korozyon, sadece bu tabakanın ortadan yok edilmesi veya zarar görmesiyle meydana gelmektedir. Ortam koşulları neticesinde yüzeyde meydana gelen korozyonun şekline göre paslanmaz çeliklerde yaygın görülen korozyon türleri arasında oyuk korozyonu ve çatlak korozyonu yer almaktadır.

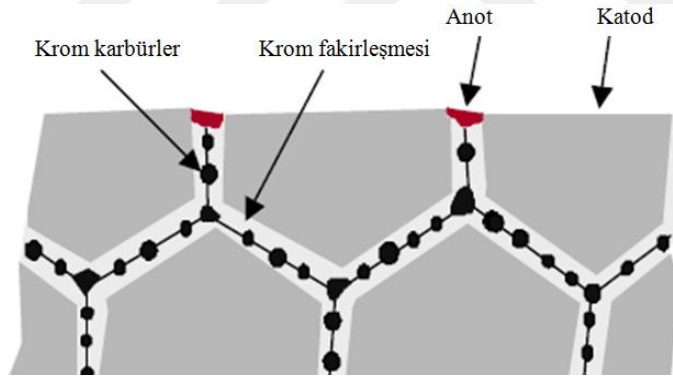
Paslanmaz çeliklerde meydana gelen korozyon çeşitleri;

1. Tanelerarası korozyon
2. Oyuklanma korozyonu
3. Gerilmeli yorulmalı korozyon
4. Aralık korozyonu
5. Galvanik korozyondur.

2.4.1. Tanelerarası Korozyon

Taneler-arası korozyon, karbür yapıcılar ile karbon miktarı fazla olan çeliklerde meydana gelmektedir. Bu durumda krom karbür, bilinen bir sıcaklık aralığında (500–800° C) tane sınırlarında çökelti şeklinde oluşacaktır. Çökelti oluşumu karbür çevresinde krom değerinin kritik değer olan ağırlıkça %10,5 değerinin altında olması sonucunda meydana gelmektedir.

Şekil 2.7.'de örnek olarak verilen taneler-arası korozyonu engelleyebilmek için krom karbür meydana gelmesi engellenmeli ya da en azından minimum seviyeye düşürülmelidir. Çeliğe eklenecek molibden miktarıyla ısıl işlem süreci artırılabilir. Ayrıca meydana gelmiş olan karbürler yüksek sıcaklıklara ulaşır çözündürülebilir ve hızlı soğutma ile tekrar oluşmaları önlenir. Kromdan daha etkin karbür yapıcıların eklenmesi de farklı bir yöntemdir. Örnek olarak; titanyum veya niyobyum krom ile tepkimeye girerler ve krom karbür oluşturmada önce kendi karbürlerini meydana getirmektedirler [31].

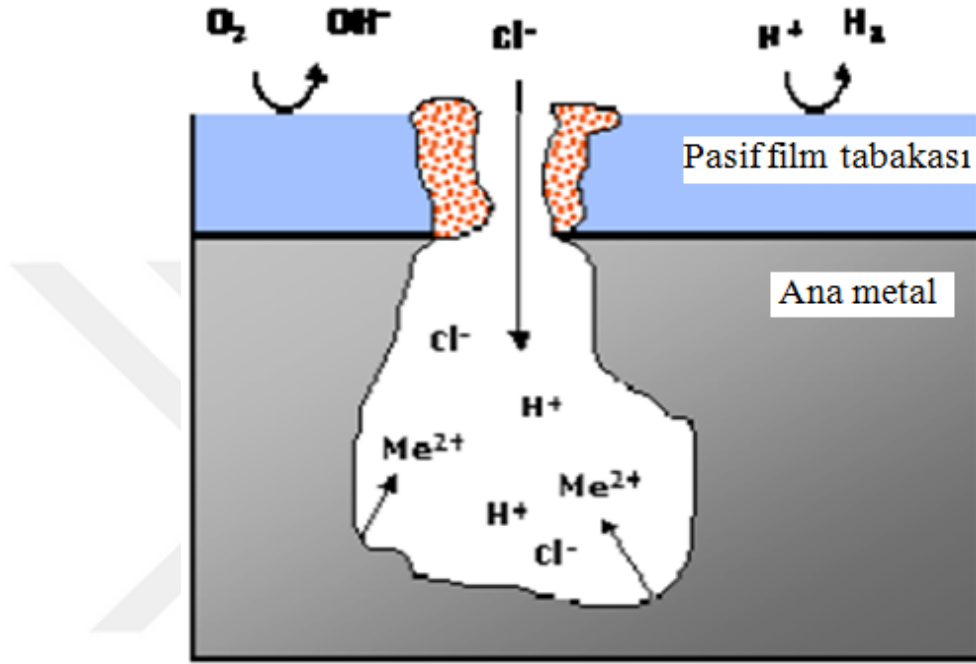


Şekil 2.7. Taneler-arası korozyonun şematik gösterimi [32]

2.4.2. Oyuklama (Çukurcuk) Korozyonu

Oyuklanma korozyonu, metal çevresinde kısmi bölgesel olarak oyuklar ya da delikler meydana getirir. Çelikler tam olarak inklüzyonlardan arındırılmış olmamalarından dolayı paslanmaz çeliklerin yüzeyinde oluşan pasif film yapısında çeşitli inklüzyonlar bulunmaktadır. Korozyon direnci üzerinde aktif olmayan bu durum, Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere ortamda klorür iyonları gibi halojenlerin bulunmasında paslanmaz çelik yüzeyinde belirli alanlarda pasif filme duyarlı hale getirir ve bu

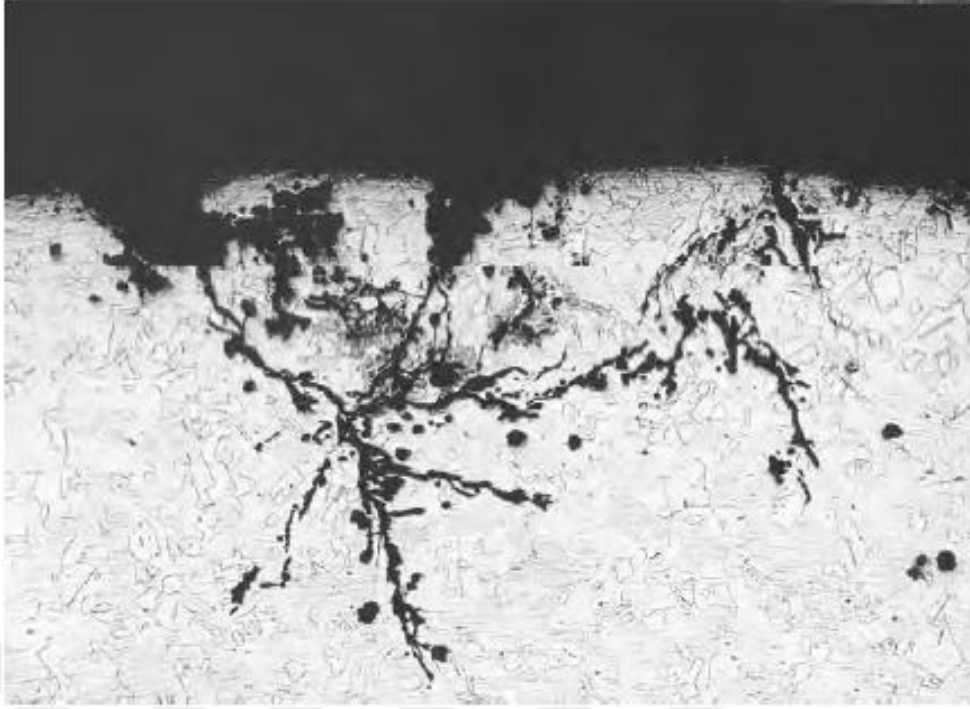
sayede oyuklanma korozyonu oluşur. Klorür iyonları pasif filmin yapısını bozarak tekrar meydana gelmesini de engellemiş olur [33]. Bununla birlikte oyuklar genişlemeye başladığında, oyuk dibinde pH miktarını azaltırlar ve klorür iyonlarının oyuklara dolmasına neden olurlar [34]. Krom, molibden ve azot, paslanmaz çeliklerin oyuklanma direncini yükseltirler.



Şekil 2.8. Oyuklanma korozyonunun şematik gösterimi [32]

2.4.3. Gerilmeli Korozyon Çatlağı

Gerilmeli korozyon çatlağı, çekme gerilmesi ve korozyonun aynı anda gerçekleşen çatlamadır. Farklı işlemlerde kullanılan paslanmaz çelikler iç ve dış gerilmelere maruz bırakıldıklarında bu gerilmeler nedeniyle korozyon, Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi paslanmaz çeliklerde çatlak başlangıcına ve ilerlemesine sebebiyet verir. Gerilmeli korozyon çatlaması, korozyon meydana geldiği takdirde çekme dayanımı altındaki gerilme değerlerinde de oluşabilmektedir [35]. Gerilmeli korozyon çatlamasına, klorür iyonları benzer halojenlerin bulunduğu ortamlarda daha sık rastlanmaktadır. Gerilmeli korozyon çatlamasını artıran diğer bir sebep ise yüksek sıcaklıkta olmasıdır. Çatlamalar genellikle $60^{\circ}C$ üstünde meydana gelmekte, daha düşük sıcaklıklarda ise fazla görülmemektedir [33].

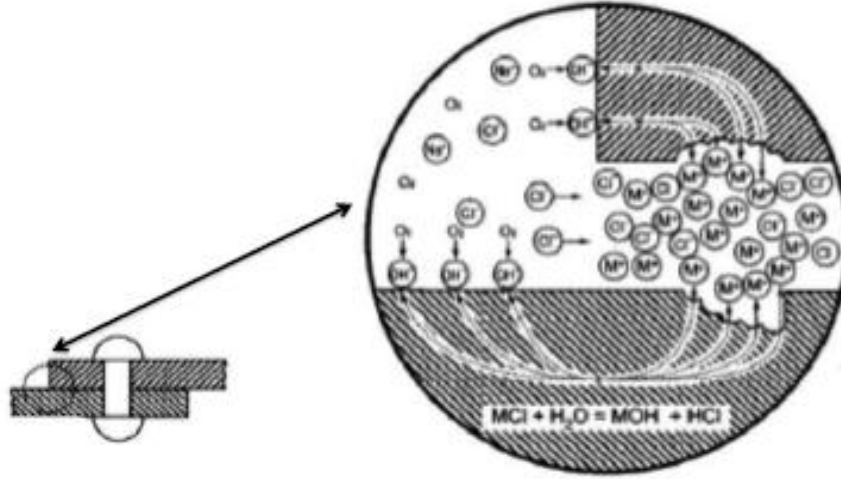


Şekil 2.9. Gerilmeli korozyon çatlağı [32]

2.4.4. Aralık Korozyonu

Aralık korozyonu; aynı veya farklı türde iki metalin fiziki olarak birleştirilmesinde, bağlantı bölgelerinde ya da aralıklarda meydana gelen korozyon çeşididir. Bu bölgelerde atmosfer ile temasın kesilmesi veya yeterli temasta bulunamaması durumunda oksijen yetersizliğinden yüzeyde meydana gelen pasif film onarılamaz ve malzemede korozyon meydana gelir [33].

Aralık korozyonu oyuk korozyonuna andıran reaksiyon ile oluşmaktadır. İki farklı yüzey arasında elektrolitik özellikte çözelti bulunması durumunda meydana gelmektedir. Aralık korozyonu korozyon ürünlerini korozyonun başladığı aralıktan uzaklaşmadığı sürece sürekli olarak gerçekleşmektedir. Aralık bölgesinde çözünmeye uğrayan metal ortamdaki pozitif katyon miktarını artırarak aralık bölgesi dışında negatif iyonları ve korozyon miktarını arttırmaktadır. Aralık korozyonu, oyuk korozyonuna oranla daha yavaş ilerlemektedir. Akışkan ortamlarda korozyon ürünlerinin ortamdaki uzaklaşması ile aralık korozyonunun hızı düşmektedir. Şekil 2.10.'da aralık korozyonun şematik gösterimi verilmiştir [36].



Şekil 2.10. Aralık korozyonu şematik gösterimi [36]

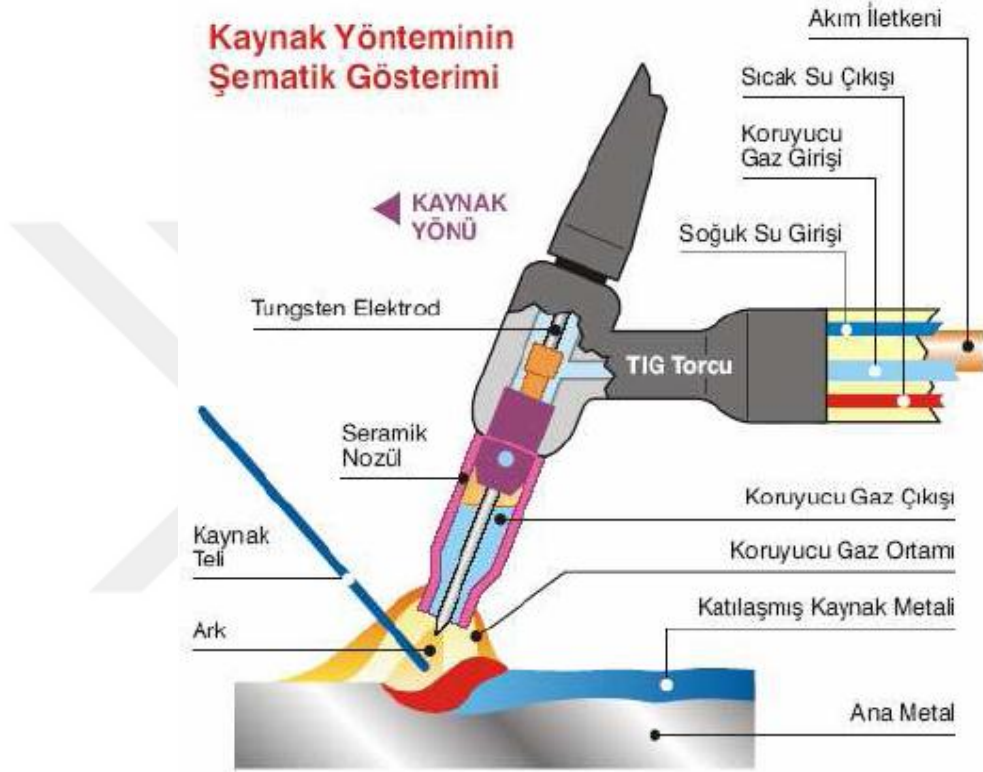
Aralık korozyonunun oluşması için iki yüzeyinde metal olmasına gerek yoktur. Yüzeylerden biri cam, polimer ya da lastik olabilir. Bu sebeple aralık korozyonu en çok makine bağlantı elemanlarında, kimyasal depolama tanklarında, koruyucu kaplama içeren metal yüzeylerinde ve yüzeylerde oluşan kılcal çatlaklarda gerçekleşmektedir. Kapalı yüzeylerde meydana geldiğinden dolayı geç fark edilmektedir.

2.4.5. Galvanik Korozyon

Galvanik korozyon; farklı iki metalin birbiri ile teması neticesinde gerçekleşen korozyon çeşididir. Gerçekleşen reaksiyonda metallerden biri daha aktif iken diğeri daha pasiftir. Daha aktif olan metal ile ikinci metal arasında bir potansiyel fark meydana gelerek oluşmaktadır. Paslanmaz çeliklerin galvanik korozyon direnci aynı zamanda da içerdikleri karbon miktarına da bağlıdır. Kromun yakınlarında karbür çökmesi taneler-arası ve oyuklanma korozyonunu artırır [33].

3. TIG KAYNAĞI

TIG kaynağı; kaynak için gerekli ısı enerjisi tungsten bir elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan ark tarafından sağlanan ve kaynak bölgesinin de elektrodu çevreleyen bir nozuldan gönderilen asal gaz tarafından korunarak uygulandığı kaynak yöntemidir [37,38].



Şekil 3.1. TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi [37]

Koruyucu bir asal gaz atmosferi altında kaynak yöntemi uygulaması ilk kez İkinci Dünya savaşında uçaklarda bulunan bazı magnezyum alaşımlı parçaların birleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Hızlı bir şekilde bu yöntemin çeşitli sahalarda da faydalanılmaya ve farkı yöntemlerle kaynatılması zor metal ve alaşımların kaynağı da verimli ve ideal bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [39].

TIG kaynağında ilk denemelerde helyum gazı kullanılmış ancak ilerleyen zaman içerisinde ise argon gazı kullanımı tercih edilmiştir. Saflık oranı düşük argon gaz içerisinde bulunabilecek su buharı, oksijen ve azot vb. safsızlığı etkileyen elementler kaynak kalitesini düşürmektedir [39,40].

TIG kaynak makinesi donanımı elemanları:

1-Kaynak torcu.

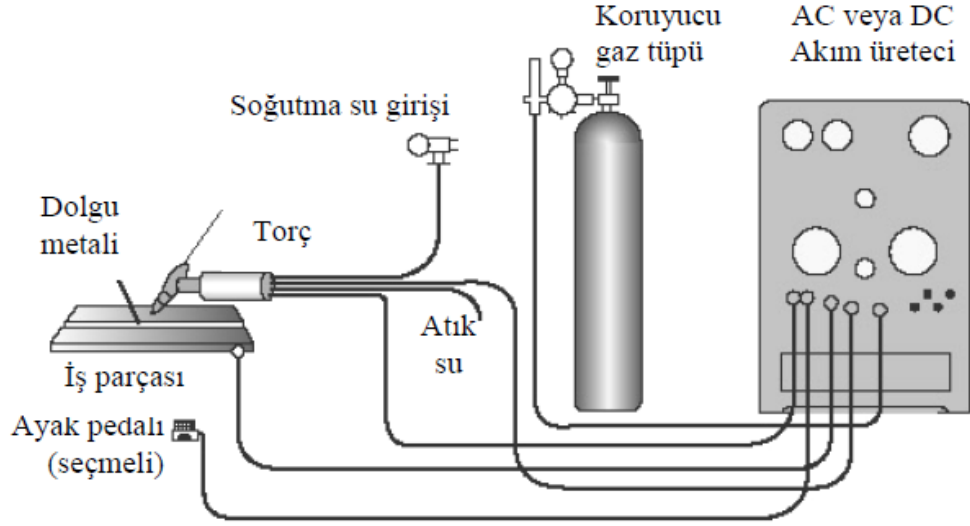
2-Kaynak akım ve kumanda şalter kablosunu, gaz hortumunu ve gerektiğinde soğutma suyu giriş ve çıkış hortumlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli, torç bağlantı paketi.

3-Kaynak akımının, gaz akışının ve gerektiğinde soğutma suyunun devreye giriş ve çıkışını, yüksek frekans ünitesini, arkın tutuşmasını ve alternatif akım ile çalışma halinde arkın sürekliliğini sağlayan devreleri de bünyesinde toplayan kumanda dolabı.

4-Kaynak akım üretici.

5-Üzerinde basınç düşürme ventili ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan koruyucu gaz tüpü [41].

TIG kaynak yöntemi prensip olarak her kalınlık ve birçok pozisyonda imalat parçalarına uygulanabilmekte olup, daha kalın parçalar için uzun süreli işlemler gerektiğinden ekonomikliği azalmakta ve dolayısıyla tercih edilmemektedir. Bundan dolayı 7 mm'den daha kalın parçaların birleştirilmesinde önerilmemekle beraber bu kaynak yöntemi ile kaliteli ve emniyetli birleştirmeler sağlanabilmektedir. Bu nedenle uçak ve uzay endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulmaktadır. Akım şiddeti azaltılarak diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor olan ince saclar bu yöntemle birleştirilebilmektedir. Şekil 3.2.'de TIG kaynak donanımının şeması verilmektedir.



Şekil 3.2. TIG kaynak donanım şema

3.1. TIG Kaynak Yönteminin Uygulama Alanları

TIG kaynak yöntemi genellikle hafif metallerin birleştirilmesinde tercih edilmektedir. TIG kaynak yöntemi; yukarıdan aşağıya doğru dikey ve tavan pozisyonlarına da uygulanabilmektedir. Yüksek miktarda çinko ihtiva eden bronzlar, titanyum alaşımları, zirkonyum, uranyum gibi kaynak kabiliyetleri zayıf metaller de bu yöntemle gözenek oluşturmada birleştirilebilmektedir.

TIG kaynak yönteminin kullanım alanları:

1-Alüminyum konstrüksiyonlar, gemi inşaatı, ameliyat el aletleri boru tesisatları, tanklar, taşıt imalatı, teleferik kabinleri,

2-Paslanmaz çelikler; kimya ve gıda sanayinde kullanılan cihazlar, buzdolabı, boru tesisatı, tıbbi aletler, ısı eşanjörleri, tanklar, gaz ve buhar türbinleri, uçak motorları, çamaşır makineleri,

3-Dezokside edilmiş bakır ve alaşımları; kimya endüstrisinde ve elektro-teknikte kullanılan bakır donanımlar,

4-Sert tabaka dolgu kaynağı; subapların oturma yüzeyleri, aşınan parçaların doldurulması,

5-DKP çelik saclar; karoseri işleri, çok ince saclarla yapılan konstrüksiyonlar, uçak inşaatı

6-Özel işler; transformatör sacları, çinko kaplı saclar, reaktör inşasında kullanılan çeşitli parçaların imalatı

3.2. TIG Kaynak Yönteminin Avantaj Ve Dezavantajları

TIG kaynak yönteminin avantajları;

1-Birçok metal ve alaşımları birleştirilebilir. (Paslanmaz çelikler, ısıya dayanıklı çelikler dökme demir ve çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımları, titanyum, nikel, molibden, niyobyum, tungsten v.b.)

2-TIG kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklarda dayanımı ve kalitesi bakımından mükemmel birleştirmeler sağlanabilir.

3- Kaynak dikişleri genellikle ikinci bir operasyon yapmadan kullanılabilir

4- Minimum alanın ısıtılması ve ısının sürekli transferinden dolayı diğer yöntemlere göre çarpılmalar daha azdır.

5- Tungsten elektrotla dikişte çok az bir karbür ayrışması sebebiyet verir.

6- Kaynak torcu hafiftir olmasından dolayı rahat bir çalışma olanağı sağlar.

7- Bu yöntem sayesinde farklı cins metalleri ve alaşımları birbirleriyle birleştirme sağlanabilir.

8- TIG kaynak yönteminde çoğunlukla koruyucu argon gazı kullanılmaktadır

9- Kaynak dikişi üzerinde kaba cüruf oluşmaz.

TIG kaynak yönteminin dezavantajları ;

1- TIG kaynağının metal yığma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşüktür.

2- Kalın kesitli malzemelerin kaynağında ekonomik bir yöntem değildir.

3- Koruyucu argon v.b. gaz gerekir.

4- Kaynak yüzey temizliği gerekmektedir.

5- Açık ortamlarda hava akımından dolayı kaynak banyosunu koruma işlemi açısından verimli bir şekilde kullanılamaz [41,42].

3.3. TIG Kaynak Yönteminde İlave TIG Teli Seçilmesinde Kullanılan Schaeffler Diyagramı

Östenitik paslanmaz çelikler genel olarak östenit fazını baskın bir şekilde içerseler de kaynak metalinde az miktarlarda ferrit içerirler. Bu ferrit genellikle ‘delta ferrit’ bir diğer ifadeyle ‘yüksek sıcaklık ferriti’ olarak bilinir. Çünkü bu artan sıcaklıklarda oluşur ve demir esaslı alaşımlardaki düşük sıcaklık halindeki α -ferritten biraz farklılık gösterir.

Bu alaşım sınıfında, kaynaklanabilirlik, kaynak mikro yapı gelişimi ve kaynak mikro yapısının etkisini tahmin edebilmek amacıyla birtakım ampirik bağıntılar ve yapı diyagramları geliştirilmiştir. Tüm durumlarda ferrit oluşturu elementler ile östenit oluşturu elementlerin etkilerini tahmin edebilmek için Cr ve Ni eşdeğerleri kullanılmaktadır.

1949’da Anton Schaeffler, ‘Schaeffler Diyagramı’ olarak bilinen diyagramı yayınlamıştır. Bu diyagram; ferrit oluşumunu destekleyen alaşım elementleriyle östenit oluşumunu destekleyen alaşım elementleri arasında bir bağıntı ileri sürmektedir. Bu diyagramın kullanılabilmesi için verilmiş kaynak pasosuna ait bileşimden krom ve nikel eşdeğerleri hesaplanmakta ve daha sonra Schaeffler diyagramında koordinatlarına göre tespit edilmektedir. Bu, diyagramda verilen sınırlardan elde edilen kaynak metali mikro yapısı hakkında bilgi elde edilmektedir.

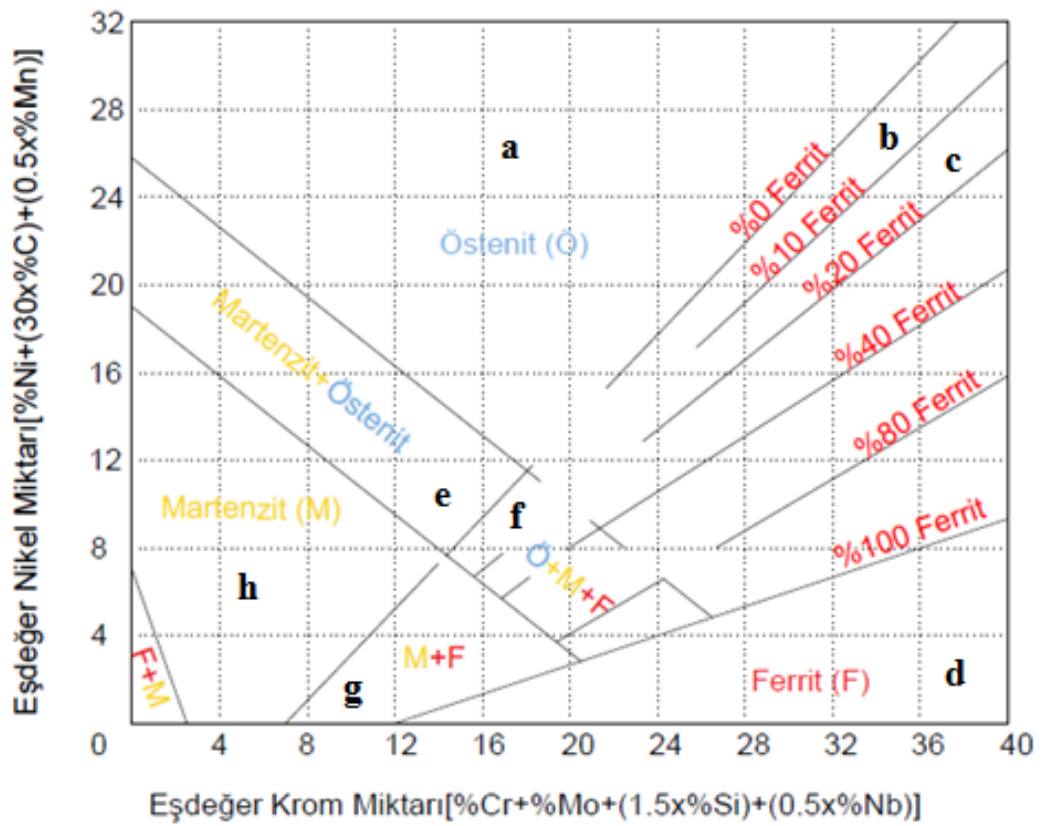
Bu diyagramı kullanıp kaynak metali yapısını saptamak için bilmemiz gerekenler;

1. Dolgu ilave malzeme bileşimi
2. Ana metalin bileşimi

Kaynak metalinin ana metale eklenmesi sonrası ortaya çıkan karışımın ne olabileceğini tahmin etmemizi sağlar [43].

3. Çalışmalar göstermiştir ki; Schaeffler diyagramı sadece mikro yapıdaki ferrit miktarını saptamakta kalmaz, paslanmaz çelik kaynak metali bileşimini bulmada da kolaylık sağlamaktadır [44].

3.3.1. Schaeffler Diyagramında Kaynak Bölgesinin Bulunduğu Konuma Göre Özelliklerinin Belirlenmesi



Şekil 3.3. Schaeffler diyagramı

a) Östenit: Sıcaklık ve korozyona karşı dayanımı yüksektir. Sıcak çatlak oluşum riski muhtemeldir.

b) Östenit +%5-10 ferrit: Korozyon dayanımı yüksektir. Çatlamaya karşı hassasiyeti yoktur.

- c) Östenit+%15-30 ferrit: Korozyon dayanımı normal seviyededir. Yüksek sıcaklıklarda ise çatlamaya karşı hassas bir yapı oluşumu meydana getirir.
- d) Ferrit: Yüksek sıcaklıklarda tane büyüme ihtimali vardır.
- e) Östenit+martenzit: Çatlama ihtimali vardır. Öntav uygulaması tercih edilir.
- f) Östenit+martenzit+ferrit: Çatlama ihtimali vardır. Öntav uygulaması tercih edilir.
- g) Martenzit+ferrit: Çatlama ihtimali vardır. Öntav uygulaması tercih edilir.
- h) Martenzit : çatlama ihtimali fazladır. Kırılgan yapıya bulunmaktadır [19].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Savunma sanayinde östenitik 304L paslanmaz çelik ile martenzitik 420 paslanmaz çelik kullanım ihtiyaçları artmakta ve bu çeliklerin kaynağı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada; TIG kaynak yöntemiyle üç farklı kimyasal içeriğe sahip ER312, ER316 ve ER2209 TIG telleriyle kaynaklı bağlantının yapısında meydana gelebilecek çeşitli metaller arası faz ve bileşikler ile birlikte farklı oranlarda oluşabilecek martenzit, ferrit, östenit gibi muhtemel oluşabilecek fazların gözlenmesi ve neticesinde bu fazların kaynaklı bağlantının mekanik ve korozyon dayanımlarına etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Östenitik 304L paslanmaz çelik ile martenzitik 420 paslanmaz çelik üç farklı bileşimdeki ilave TIG tellerinin birleşiminden meydana gelen kaynak metalinde oluşan bu fazların miktarının, birleştirmenin mekanik ve korozyon özelliklerine etkilerinin incelenmesi temel olarak amaçlanmıştır.

Kaynak metalindeki fazların kaynak metalinin darbe dayanımına etkisi Charpy V-çentikli darbe testi ile belirlenmiştir. Ayrıca birleştirmelerin ana malzeme kaynak metalleri ve her iki ITAB bölgelerinde sertlik taramaları da gerçekleştirilmiştir.

Bununla birlikte çalışmada farklı oranlarda oluşturulan fazlar ile bileşiklerin, elde edilen kaynaklı deney numunelerinin korozyon özelliklerine etkileri korozyon testi ile belirlenmiştir.

4.1. Ana Malzemeler İlave Metaller ve Koruyucu Gaz

4.1.1. Ana Malzemeler

AISI/SAE304L (1.4307) ve AISI/SAE420 (1.4021) paslanmaz çelik malzemeler 1200x1200x3 mm boyutlarında temin edilmiştir. Deneylerde kullanılacak olan 304L ve 420 paslanmaz çeliğin kimyasal içeriği AMETEK Spectromax optik emisyon argon spektrometresinde analizi yapılmış ve sonuçlar % ağırlıkça olarak Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2. de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AISI/SEA 304L Paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Element (% ağırlığı)												
Ölçüm No	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	N %	Fe %	Diğerleri %
1	0,0272	0,381	1,19	0,0212	0,0029	18,22	0,0546	8,01	0,102	0,0688	71,6	0,3223
2	0,0278	0,383	1,19	0,0204	0,0025	18,20	0,0545	8,01	0,102	0,0713	71,6	0,3385
3	0,0241	0,374	1,18	0,0216	0,0037	18,26	0,0534	8,00	0,102	0,0684	71,6	0,3128

Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi 304L paslanmaz çelik malzemenin kimyasal bileşiminde yaklaşık %18.20 Cr, %8 Ni, %0,005Mo ve %0.023 N bulunmaktadır.

Çizelge 4.2. AISI/SEA 420 Paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Element (% ağırlığı)												
Ölçüm No	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	N %	Fe %	Diğerleri %
1	0,238	0,512	0,631	0,0136	0,0023	13,37	0,0068	0,146	0,0418	0,0238	84,9	0,1147
2	0,231	0,504	0,629	0,0131	0,0019	13,34	0,0067	0,138	0,0417	0,0223	84,9	0,1723
3	0,235	0,503	0,625	0,0133	0,0020	13,36	0,0067	0,140	0,0418	0,0223	84,9	0,1509

Çizelge 4.2.'de görüldüğü gibi 420 paslanmaz çelik malzemenin kimyasal bileşiminde yaklaşık %13.35 Cr, %0,142 Ni, %0,0068Mo ve %0.023 N bulunmaktadır.

4.1.2. İlave Metaller

Farklı kaynak metali bileşimi oluşturmak amacıyla kaynak işleminde kullanılan üç TIG telinin fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği aşağıda verilmektedir.

- a. 2.4 mm çapında AWS A5.9 ER312, EN ISO 14343-A W 29 9 kodlu TIG kaynak ilave telinin üretici firma kimyasal içeriği Çizelge 4.3.'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. AWS A5.9 ER312, EN ISO 14343-A W 29 9 TIG kaynak teli üretici kimyasal içeriği

Element (% ağırlıkça)						
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
0.15<	1.6	0.4	8.8	30.7	0.2	0.14

AWS A5.9 ER312, EN ISO 14343-A W 29 9 TIG Kaynak Telinin üretici firma mekanik dayanım değerleri Çizelge 4.4.'de verilmektedir.

Çizelge 4.4. AWS A5.9 ER312, EN ISO 14343-A W 29 9 Kaynak teli üretici mekanik dayanım değerleri (minimum)

Akma Dayanımı	Gerilme Dayanımı	Uzama	Darbe Enerjisi 20 °C (joule)
610MPa	770MPa	%20	50

- b.** 2 mm çapında AWS A5.9 ER316L, EN ISO 14343-A WZ 19 12 3L kodlu TIG kaynak ilave teli kullanılmıştır. Kaynak ilave telinin üretici firma kimyasal bileşimi Çizelge 4.5.'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. AWS A5.9 ER316L, EN ISO 14343-A WZ 19 12 3L TIG kaynak teli üretici kimyasal içeriği

Element (% ağırlıkça)								
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	N	FN (WRC-92)
0.01<	1.7	0.4	12	18.2	2.6	0.10	0.04	7

AWS A5.9 ER316L, EN ISO 14343-A WZ 19 12 3L TIG Kaynak Telinin üretici firma minimum mekanik dayanım değerleri Çizelge 4.6.'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. AWS A5.9 ER316L, EN ISO 14343-A WZ 19 12 3L TIG kaynak teli üretici mekanik dayanım değerleri

Akma Dayanımı	Gerilme Dayanımı	Uzama	Darbe Enerjisi 20 °C (joule)
470MPa	600MPa	%32	175

- c. 2 mm çapında AWS A5.9 ER2209 EN ISO 14343-A W 22 9 3 N L kodlu TIG kaynak ilave teli kullanılmıştır. Kaynak ilave telinin kimyasal bileşimi izelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. AWS A5.9 ER2209 EN ISO 14343-A W 22 9 3 N L TIG kaynak teli üretici kimyasal içeriği

Element (% ağırlıkça)						
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	N
0.01<	1.5	0.5	8.5	22.7	3.2	0.17

AWS A5.9 ER2209 EN ISO 14343-A W 22 9 3 N L TIG Kaynak Telinin mekanik dayanım değerleri izelge 4.8.'de verilmektedir.

Çizelge 4.8. AWS A5.9 ER2209 EN ISO 14343-A W 22 9 3 N L TIG kaynak teli üretici mekanik dayanım değerleri

Akma Dayanımı (MPa)	Gerilme Dayanımı (MPa)	%Uzama	Darbe Enerjisi 20 �C (joule)
600	765	28	100

4.1.3. Koruyucu Gaz

Kaynak işleminde %99.998 saflıkta argon gazı birinci pasoda ve kök pasosunda koruma gazı olarak kullanılmıştır.

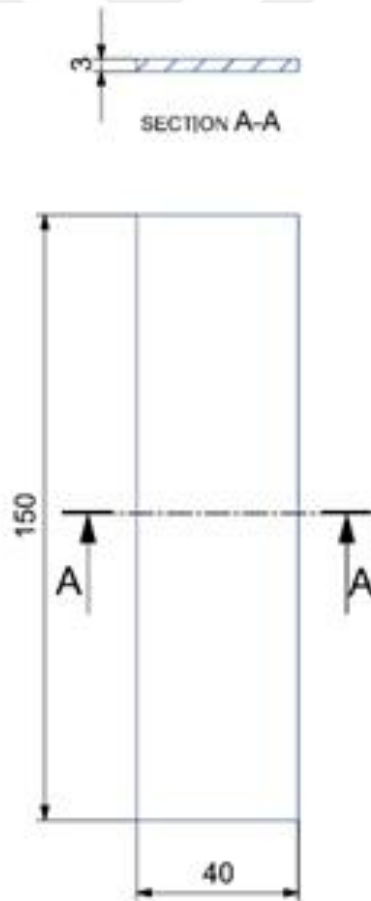
4.2. Numune Hazırlanışı

4.2.1. Kesme işlemi

304L ve 420 kalite paslanmaz elik saclar kaynak işlemi öncesinde onbeş adet 150x40x3 mm ebatlarında şekil 4.1.'de gösterilen CNC hidrolik abkant ile şekil 4.2.'deki ölçülerde ısınmaya maruz bırakılmadan kesilmiştir.



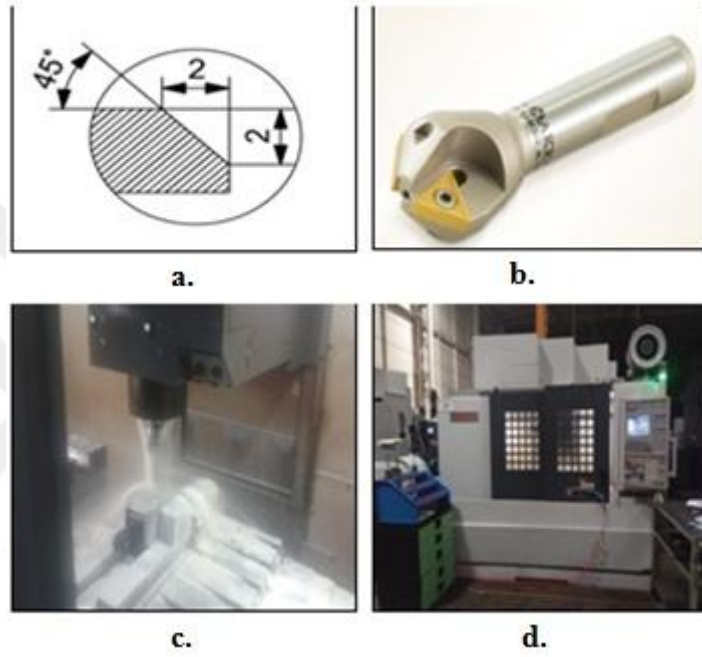
Şekil 4.1. Safan CNC Hidrolik Abkant



Şekil 4.2. Kaynak öncesi deney numune ölçüleri

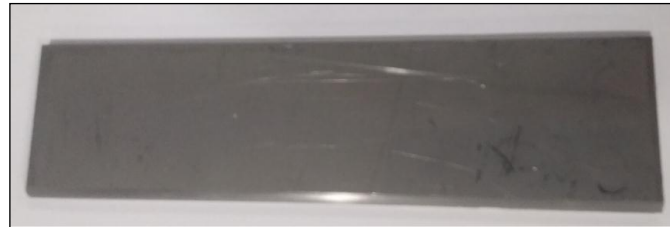
4.2.2. Kaynak Ağzı Hazırlığı İşlemi

Bütün numunelerin kaynak ağız hazırlıkları; Şekil 4.3.a.'daki ölçülerde, Şekil 4.3.b.'de verilen geometriye sahip kesici takım ile Şekil 4.3.c.'de görüldüğü gibi Şekil 4.3.d.'de verilen Mori Seiki CNC freze ile yapılmıştır. Numuneler kesim sırasında termal ısınmaya maruz bırakılmadan soğutucu sıvı bor yağı (%7B % 93 H₂O) ile soğutulmuştur.



Şekil 4.3. Kaynak ağız ölçüsü ve kullanılan ekipmanları

Kaynak ağız hazırlığı yapılmış numunenin görüntüsü Şekil 4.4.' de verilmektedir.



Şekil 4.4. Kaynak ağız hazırlığı yapılmış numune

4.2.3. Kaynak Öncesi Tavlama İşlemi

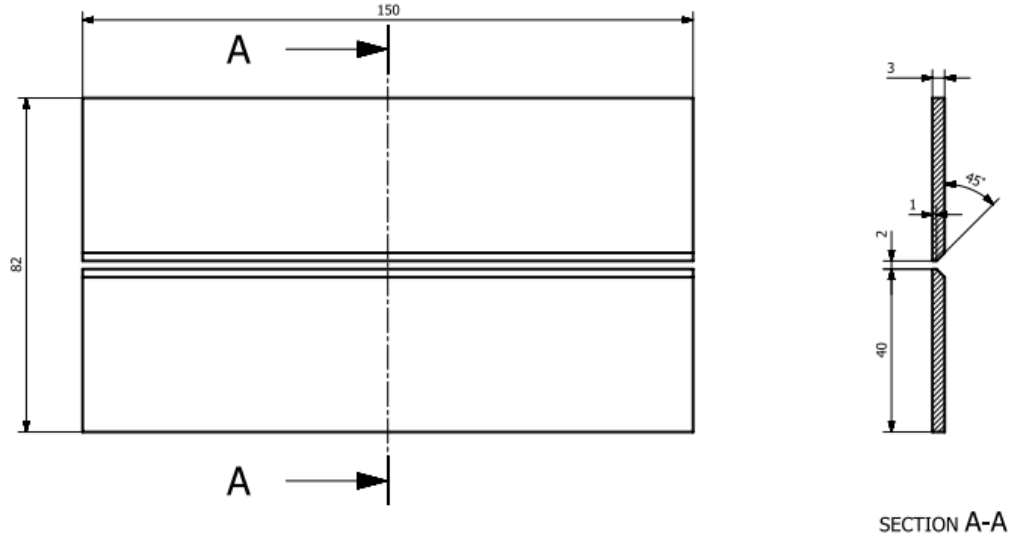
420 kalite Martenzitik paslanmaz çelik saca kaynak öncesi tavlama işlemi Şekil 4.5.'de verilen ısıtım fırınında 300 °C de 45 dakika süreyle uygulanmıştır.



Şekil 4.5. Isıtım fırını

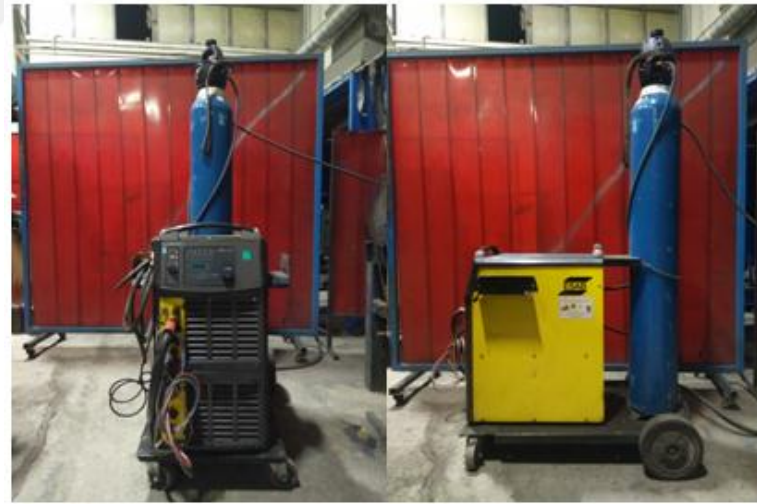
4.2.4. Kaynak İşlemi

304L ve 420 paslanmaz çelik malzemeler kaynak öncesi Şekil 4.6.'da gösterilen ölçülerde konumlandırılarak hazırlanmıştır.



Şekil 4.6. Kaynak edilmek üzere konumlandırılmış 304L ve 420 paslanmaz çelik numunelerin ölçüleri

Kaynak işlemi Şekil 4.7.'deki ESAB TIG 4300i /AC/DC model kaynak makinesi ile kök ve kapak paso olmak üzere iki aşamalı olarak yapılmıştır.



Şekil 4.7. ESAB TIG 4300i /AC/DC Model kaynak makinesi

Kaynak işlemi Çizelge 4.9.'de verilen parametrelere uygun olarak yapılmıştır. Kaynak işleminde ısı girdisi;

$$H_{net} = (\eta \cdot E \cdot I) / V \quad (4.1.)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır [9].

Burada; ‘ η ’ ifadesi kaynak verimini, E; kaynak gerilimini (volt), I: kaynak akımını (Amper), V ise kaynak işlemi ilerleme hızını (mm/saniye) belirtmektedir.

Kaynak işlemi kök ve son (ikinci) paso olmak üzere iki pasoda gerçekleştirildiğinden her iki paso için net ısı girdisi (4.1.) bağıntısı yardımıyla;

‘ η ’ katsayısı TIG kaynağı DC(-) akım türü için %70 (0.7) alınmıştır [9].

$$H_{net-kök\ paso} = (0.7 \times 9V \times 67,5A) / (2.29mm/sn) = 185.70 \text{ joule/mm}$$

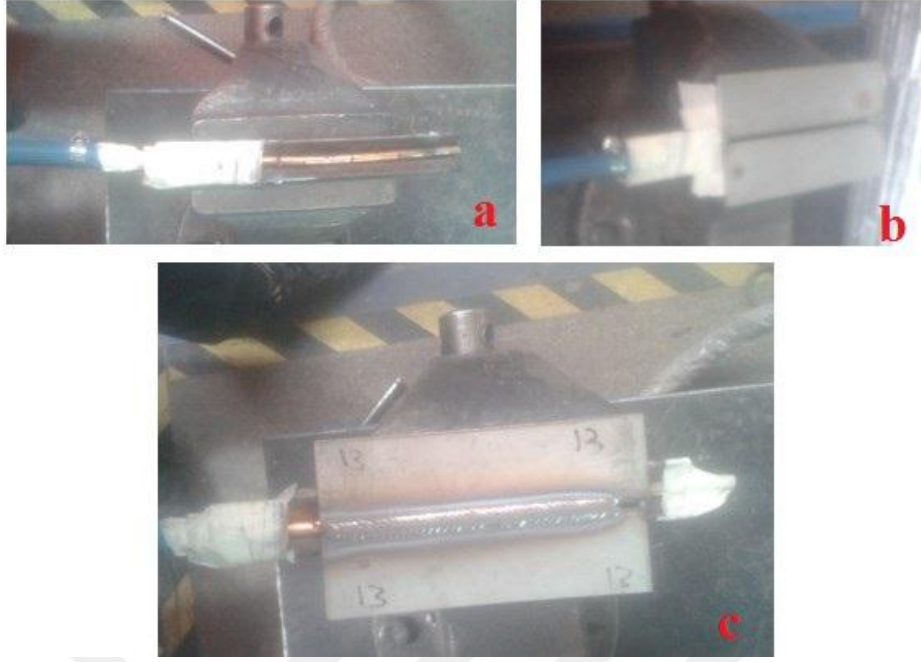
$$H_{net-son\ paso} = (0.7 \times 11V \times 92,5A) / (2.18mm/sn) = 326.72 \text{ joule/mm}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.9. Kaynak işlemi parametreleri

İlave Tel	Kaynak Akımı- DC(-) (Amper)		Kaynak Gerilimi (Volt)		Koruyucu Gaz (%100 Argon) Debisi (lt/dk)		Kaynak İlerleme Hızı (mm/sn)		Kaynak Isı Girdisi (Joule/mm)		Tungsten Elektrod
	Kök Paso	2. Paso	Kök Paso	2. Paso	Kök Paso	2. Paso	Kök Paso	2. Paso	Kök Paso	2. Paso	
ER312	65-70	90-95	9	11	10	6	2.33	2.16	185.70	326.72	WT 20 (%2 Th içeren) Ø2.4 mm kırmızı,
ER316							2.29	2.18			
ER2209							2.25	2.20			

Kaynak işlemi sırasında numunelerin ortamdaki havanın zararlı etkileriyle arka taraflarından oksitlenmemeleri amacıyla Şekil 4.8.’deki aparat yardımıyla saf argon gazı ile kök koruması sağlanmıştır.



Şekil 4.8. (a) (b) (c) Kök koruma gazı aparatı

4.2.5. Gerilim Giderme Isıl İşlemi

Kaynak işleminin hemen ardından Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi 360 °C' de 45 dakika süreyle kaynaktan dolayı oluşabilecek gerilimleri azaltmak amacıyla gerilim giderme tavlaması uygulanmıştır. Gerilim giderme ısıl işlemi sonrası kaynaklı numuneler Şekil 4.9.'da görülmektedir.



Şekil 4.9. Gerilim giderme işlemi sonrası kaynaklı numuneler

4.2.6. Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Muayeneleri

Onbeş adet kaynaklı bağlantının radyografik muayeneleri X-ışını tüpü ile çalışan MEDEX GEMX-G200 model radyografik muayene cihazı ile numune yüzeylerine dik olacak şekilde pozlama ile Şekil 4.10.'da görüleceği gibi çekim yapılmıştır. Muayenede 1.2 mA 100kV şiddetinde 20 saniye süreli ışınlar kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Radyografik muayene cihazı

4.2.7. Kaynaklı Numunelerin Taşlanması

Kaynakla birleştirilmiş numuneler Şekil 4.11.'de görülen Taksan TYT-400 model taşlama tezgahında yüzeyleri düzleştirmek amacıyla taşlanmıştır.

Numunelerin taşlanması esnasında ısınmamaları amacıyla %7 oranında bor yağı içeren saf su çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Taksan TYT-400 Model taşlama tezgahı

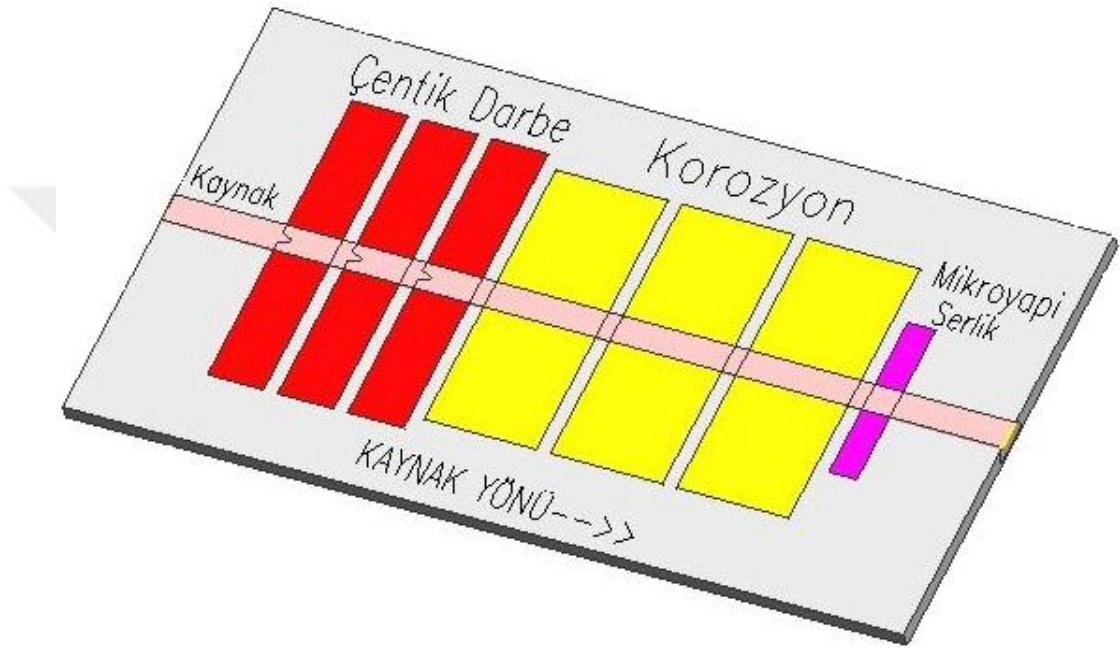
304L östenitik paslanmaz çeliğin manyetik özellikte olmamasından dolayı taşlama tezgâhının manyetik sabitleme tablası kullanılamamıştır. Bu amaçla; Şekil 4.12.'de görülen aparat yardımıyla taşlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Taşlama tezgâhı numune bağlama aparatı

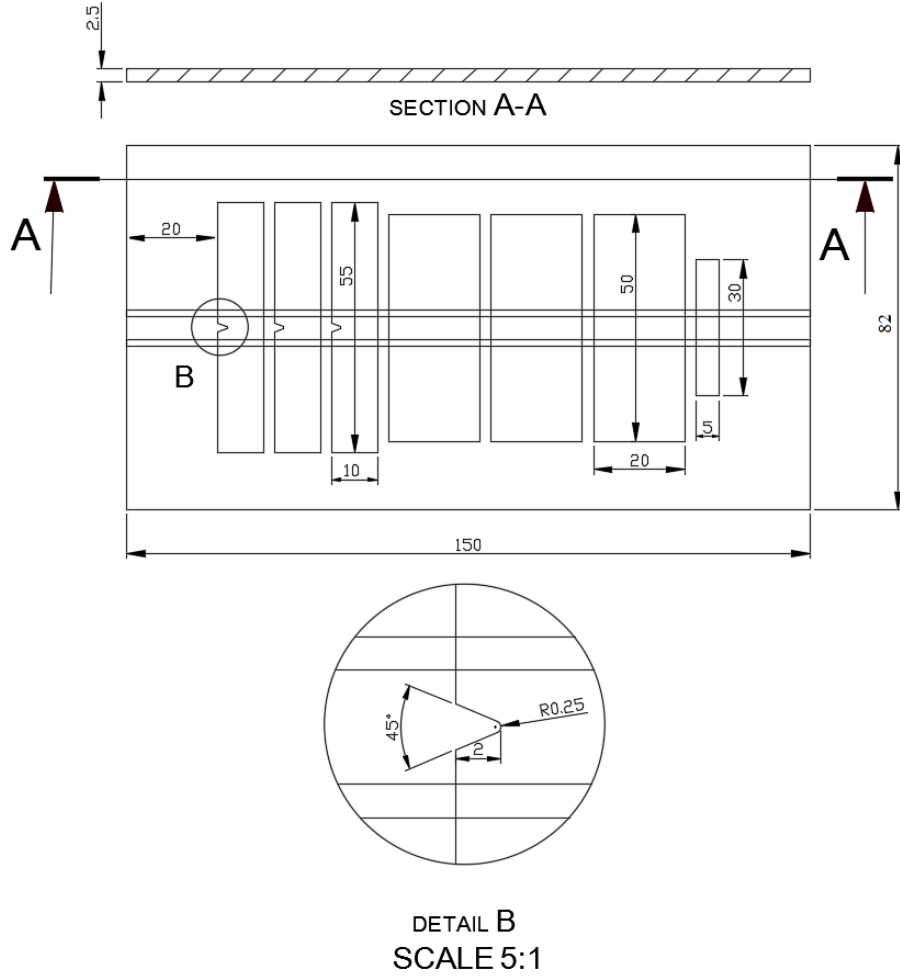
4.2.8. Tel-erezyon Yöntemi ile Kaynaklı Bağlantılardan Test Numunelerinin Çıkarılışı

Tel-erezyon ile kesme işleminde pirinç tel (% 65-70 bakır %35-40 kalay karışımı) kullanılmıştır. Test numuneleri tel-erezyon kesme tezgahında saf su içerisinde Şekil 4.13.'de verilen resimde görüleceği gibi TS EN ISO 15614-1 standardına göre şematik olarak planlanmıştır.



Şekil 4.13. Çentik darbe, korozyon, sertlik ve mikro yapı numuneleri yerleştirme şeması

Kaynaklı test numuneleri Şekil 4.14.'deki detayda görülen ölçülerde kesilmiştir.

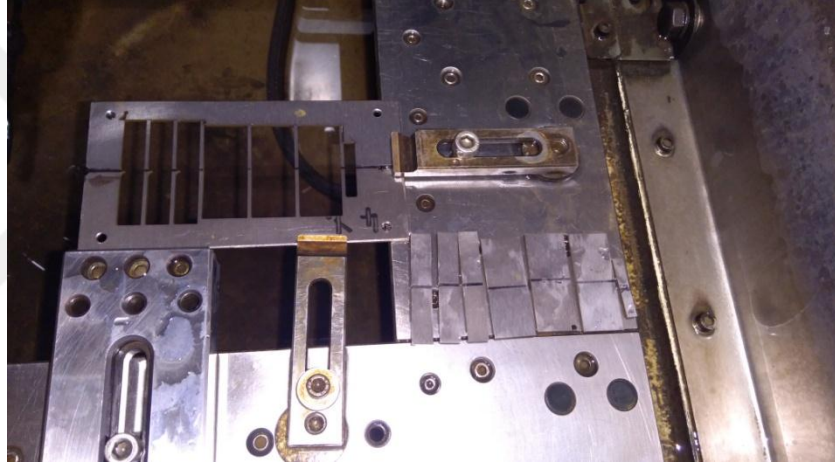


Şekil 4.14. TS EN ISO 15614-1 Standardına göre test numunelerinin ölçülendirilmesi

Kaynaklı numuneler taşlama sonrasında Şekil 4.15.’deki Makino U6 Tel erezyon tezgâhında Şekilde 4.16.’da görüldüğü üzere kesilmiştir.



Şekil 4.15. Makino U6 Tel-erezyon tezgâhı



Şekil 4.16. Kesilmiş numuneler

4.3. Mikro yapısal İncelemeler

Üç farklı ilave TIG kaynak teli ile birleştirilmiş numunelerin mikro-yapısal değişimlerini incelemek amacıyla her bir koşul için mikro-yapı inceleme numunesi oluşturulmuş ve zımparalama ile parlatma işlemini kolaylaştırmak amacıyla numuneler Şekil 4.17.'de görüldüğü üzere kolay zımparalama ve parlatma amacıyla bakalit kalıba alınmıştır.



Şekil 4.17. Bakalit kalıba alınan mikro-yapı inceleme numuneleri

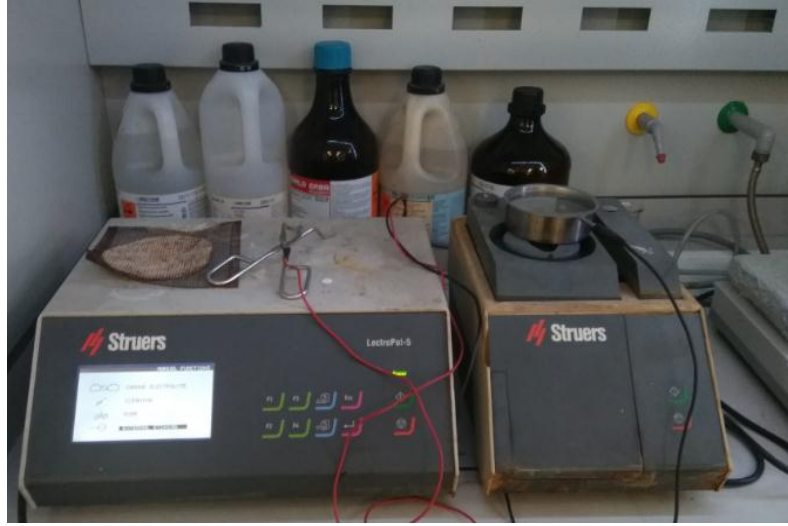
Mikro-yapı inceleme numuneleri sırasıyla; 240, 320, 400, 600 ve 1200 elek numaralı zımparalarla zımparalanmış, ardından 6 μm ve 3 μm tane boyutundaki elmas parlatıcı solüsyon ile parlatma çuhasında parlatılmışlardır.

Şekil 4.18.'de deneysel çalışmaların mikro-yapı incelemelerinde kullanılan zımparalama ve parlatma cihazının görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.18. Mikro-yapı çalışmalarında kullanılan parlatma cihazının görüntüsü

Zımparalama ve parlatma işlemi sonrasında mikro-yapı inceleme numuneleri literatürde belirtilen [45] %20 derişimli sodyum hidroksit (NaOH)-saf su dağlama çözeltisi içerisinde 1.6 Amp/cm² akımda 11 saniye bekleme süresinde elektrolitik dağlama yöntemi ile dağlanmış ve mikro-yapıları Metalürji mikroskopunda incelemeye hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.19.'da elektrolitik dağlama işleminde kullanılan cihaz görölmektedir.



Şekil 4.19. Elektrolitik dağlama cihazı

Elektrolitik dağlanmış numuneler, 1000X büyütme kapasiteli LEICA DM 4000M marka optik metalürji mikroskobu ile; ana malzemeler, kaynak metali ve ITAB (ısının tesiri altındaki bölge) bölgelerinden mikro-yapı fotoğrafları alınmıştır. Şekil 4.20.'de mikro-yapı çalışmalarının yapıldığı optik metalürji mikroskobunun fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.20. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik mikroskop

4.4. Sertlik Testi

Birleştirilmiş kaynaklı numunelerin sertlik taramaları, Emco Test Durascan Mikro-vickers sertlik ölçüm cihazı ile HV_{0.3} biriminden yapılmıştır. Şekil 4.21.'de sertlik ölçümü yapılan cihazın fotoğrafı verilmektedir.

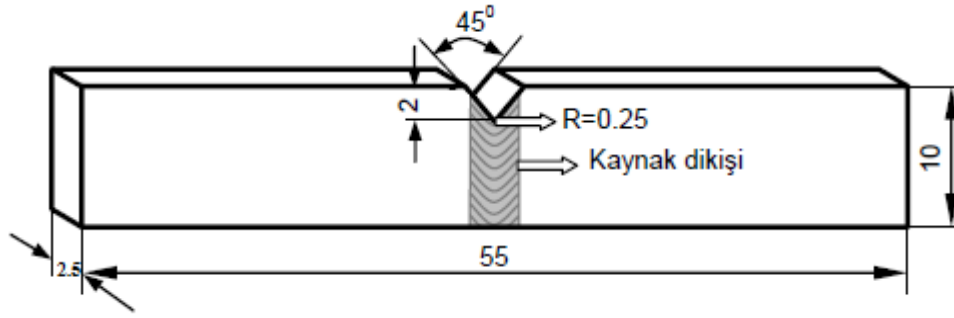


Şekil 4.21. Emco test mikro-vickers sertlik ölçüm cihazı

Sertlik ölçümlerinde 300g hücre yükü kullanılmış ve kaynak metali merkezi, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ile her iki ana malzeme üzerinde üç farklı bağımsız ölçüm taraması yapılmıştır.

4.5. Çentikli Darbe Testi

Çentik darbe numuneleri TS 269'a göre kaynak metali merkez hattından enine konumda üç farklı ilave TIG teli başına sekizer adet olmak üzere Şekil 4.22.'de verilen ölçülerde hazırlanmıştır.



Şekil 4.22. Çentik darbe test numunesi ölçüleri

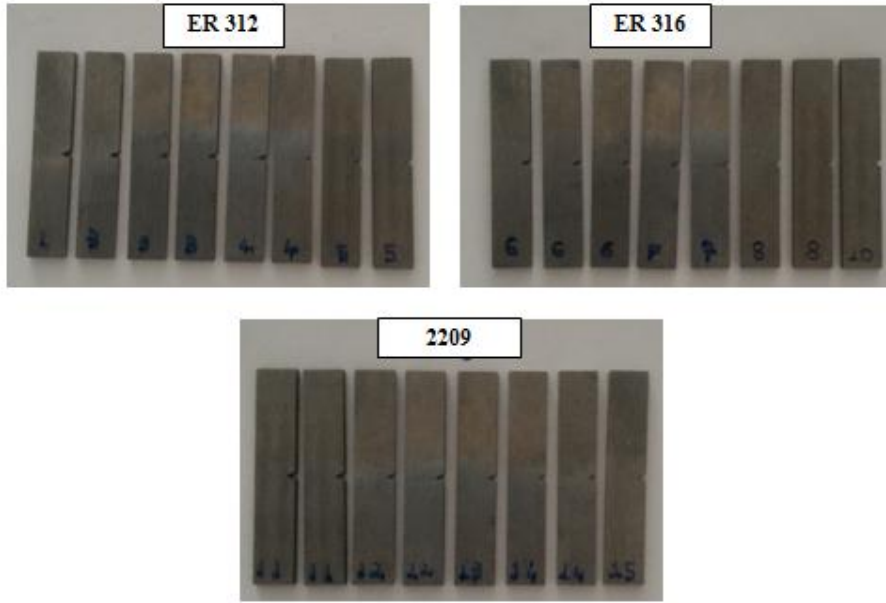
Kaynaklı numunelerin kaynak kepleri ve kökleri talaşlı imalat yöntemi ile 2.5mm kalınlığa homojen ölçü sağlamak amacıyla işlenmiştir.

Tel-erezyon tezgâhında açılan Charpy-V çentikten sonra darbe testi Şekil 4.23.'de verilen Avery Impact Tester England marka cihaz ile oda sıcaklığında (22°C' de) ASTM A 370 standardı kapsamında uygulanmıştır.



Şekil 4.23. Darbe test cihazı

Darbe testi öncesi numunelerin görüntüsü Şekil 4.24.'de verilmektedir.



Şekil 4.24. Darbe testi öncesi numuneler

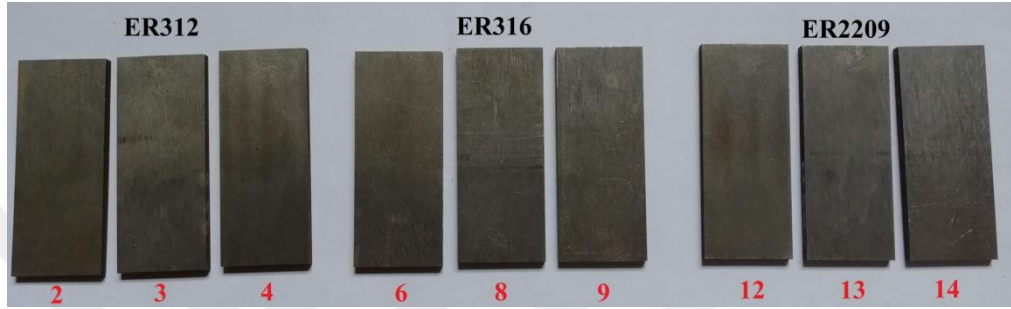
Numunelerin deney sonrası görüntüleri Şekil 4.25.'de verilmiştir.



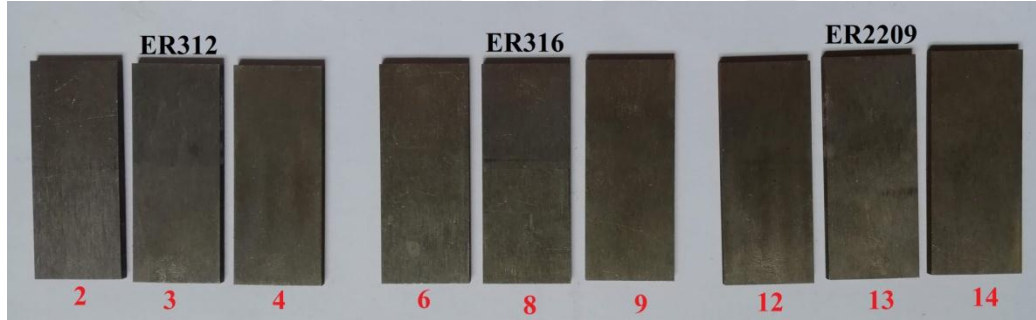
Şekil 4.25. Çentik darbe test numunelerin deney sonrası görüntüleri

4.6. Korozyon Testi

Birleştirme sonrası kaynaklı numunelere ve ana malzemeye ASTM G48 ve ASTM G1 standardı kapsamında korozyon (ağırlık kaybı) testi uygulanmıştır. üç farklı ilave TIG teli için üçer adet olmak üzere hazırlanan korozyon test numunelerinin test öncesi ön ve arka yüzeylerinin görünüşleri sırasıyla Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de görülmektedir.



Şekil 4.26 Numunelerin korozyon testi öncesi ön yüzünden çekilmiş görüntü



Şekil 4.27. Numunelerin korozyon testi öncesi arka yüzünden çekilmiş görüntü

Test numunelerinin bütün yüzeyleri kesme işlemi sonrası taşlanmıştır. Çizelge 4.10.'de verilen her bir numunenin üç boyutları (uzunluk, genişlik, kalınlık) ASTM G48 standardında belirtilen şekilde ölçülüp kayıt altına alınmıştır.

Boyutları tespit edilen numunelerin her birinin toplam yüzey alanları;

Toplam Yüzey Alanları:

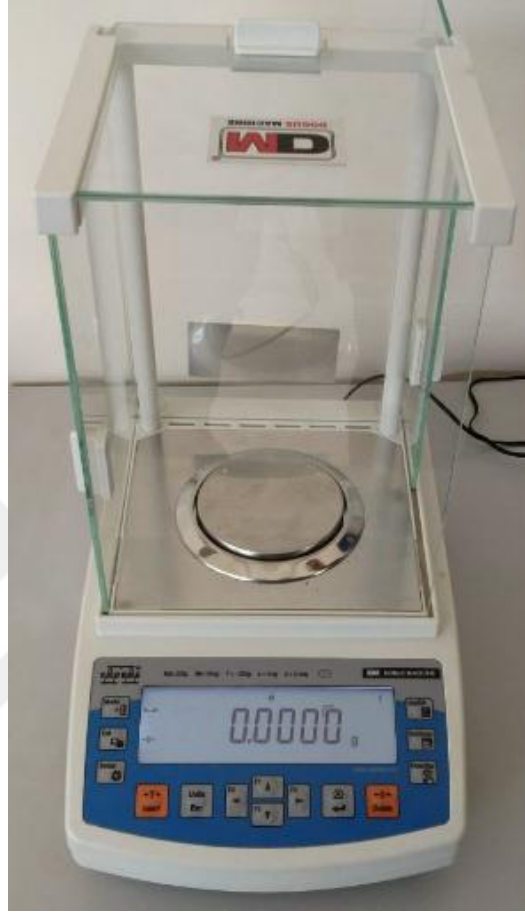
$$2 \times [(Kalınlık) \cdot (boy) + (kalınlık) \cdot (genişlik) + (boy) \cdot (genişlik)] \quad (4.2)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10. Korozyon testi için numune ebat ölçümleri

ER312 TIG TELİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ KAYNAKLI NUMUNELER							
KOD	A (mm)	B (mm)	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	C ₃ (mm)	C _{Ort.} (mm)	YÜZEY ALANI (mm ²)
2	50.07	20.00	2.47	2.44	2.46	2.4567	2346.6281
3	50.00	20.00	2.52	2.48	2.50	2.5000	2353.6000
4	50.07	20.06	2.65	2.61	2.63	2.6300	2378.5998
ER316 TIG TELİ KAYNAKLI NUMUNELER							
KOD	A (mm)	B (mm)	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	C ₃ (mm)	C _{Ort.} (mm)	YÜZEY ALANI (mm ²)
6	50.06	20.05	2.56	2.59	2.58	2.5767	2370.5163
8	50.08	20.07	2.55	2.64	2.61	2.6000	2375.4446
9	50.09	20.09	2.59	2.58	2.54	2.5700	2373.3414
ER2209 TIG TELİ KAYNAKLI NUMUNELER							
KOD	A (mm)	B (mm)	C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	C ₃ (mm)	C _{Ort.} (mm)	YÜZEY ALANI (mm ²)
12	50.10	20.03	2.45	2.48	2.50	2.4767	2354.3833
13	50.09	20.06	2.57	2.64	2.66	2.6233	2377.6645
14	50.09	20.06	2.56	2.60	2.63	2.5967	2373.9231

Korozyon dayanımının hesaplanması amacıyla her kaynaklı numune ASTM G48’de belirtilen test öncesi 0.0001g hassasiyetinde Şekil 4.28.’de gösterilen terazide tartılmıştır.



Şekil 4.28. 0.0001g Hassasiyetinde terazi

Tartım güvenilirliğini sağlamak amacıyla her korozyon test numunesi aynı tartım koşullarında üçer defa tartılmıştır. Her korozyon test numunesinin ölçülen üç farklı ağırlık değerlerinin ortalaması alınarak kayıt edilmiştir. Ağırlık ölçüm sonuçları Çizelge 4.11.’de verilmektedir.

Çizelge 4.11. Korozyon testi deney öncesi ağırlık tartımları

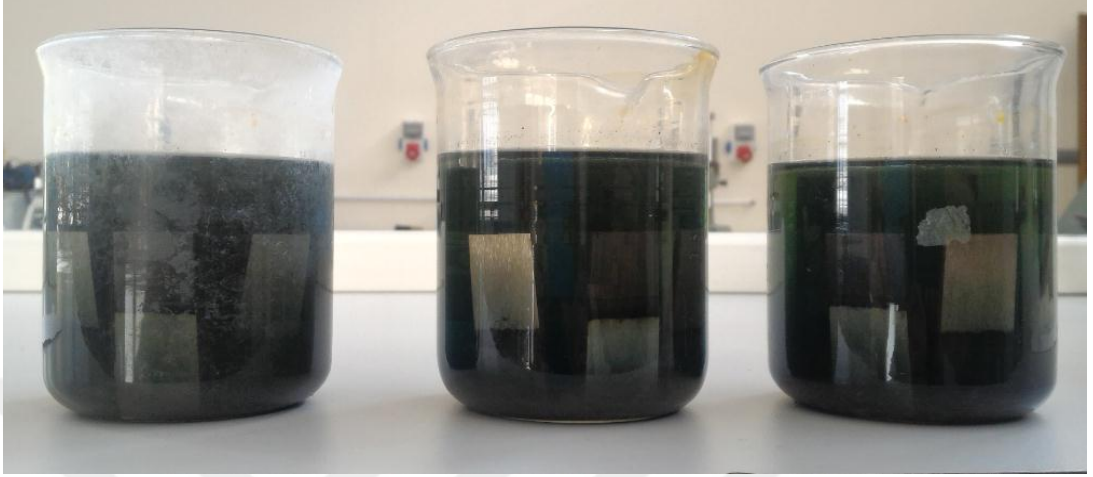
ER312 TIG Teli Kaynaklı Numuneler				
Kod	1. Tartım	2. Tartım	3. Tartım	Ortalama
2	19.2563	19.2563	19.2563	19.2563
3	18.8518	18.8519	18.8518	18.8518
4	20.1589	20.1589	20.1590	20.1589
ER316 TIG Teli Kaynaklı Numuneler				
Kod	1. Tartım	2. Tartım	3. Tartım	Ortalama
6	19.8835	19.8835	19.8834	19.8835
8	20.0930	20.0930	20.0929	20.0930
9	19.8983	19.8983	19.8982	19.8983
ER2209 TIG Teli Kaynaklı Numuneler				
Kod	1. Tartım	2. Tartım	3. Tartım	Ortalama
12	19.0771	19.0772	19.0771	19.0771
13	20.3113	20.3112	20.3112	20.3112
14	19.9246	19.9245	19.9246	19.9246

Korozyon test çözeltisi, ASTM G48’de verilen $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ bileşimde PH derecesi 1.3 olacak şekilde hazırlanan korozyon test çözeltisi Şekil 4.29.’da görülmektedir.



Şekil 4.29. $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ bileşimi ile hazırlanmış çözeltinin test öncesi görünümü

Korozyon test numuneleri 72 saat süreyle 22°C sıcaklıkta çözelti içerisinde bekletilmiştir. Test sonrası numunelerin bulunduğu beherler Şekil 4.30.'da görülmektedir.



Şekil 4.30. 72 Saat Sonra $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ Çözeltisinin Görünümü

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Deneysel çalışmada kullanılan AISI/SAE 420 martenzitik paslanmaz çelik ile AISI/SAE304L östenitik paslanmaz çelik malzemelerin ve üç farklı ilave TIG telleri ile birleştirme işlemi sonrasında oluşan kaynak metallerrinin faz içeriklerinin neler olabileceğini anlamak maksadıyla bu amaçla kullanılan Schaeffler Diyagramındaki konumlarını belirlemek için krom ve nikel eşdeğerleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlıkça \%Cr Eşdeğeri} = \%Cr + \%Mo + 1.5x\%Si + 0.5x\%Nb \quad (5.1)$$

$$\text{Ağırlıkça \%Ni Eşdeğeri} = \%Ni + 30x\%C + 0.5x\%Mn \quad (5.2)$$

bağıntılarından;

304L ana malzeme için;

$$\text{Ağırlıkça \%Cr Eşdeğeri} = 18.22 + 0.0545 + 1.5x0.383 + 0.5x0 = 18.9$$

$$\text{Ağırlıkça \%Ni Eşdeğeri} = 8.01 + 30x0.0276 + 0.5x1.19 = 9.4$$

420 ana malzeme için;

$$\text{Ağırlıkça \%Cr Eşdeğeri} = 13.35 + 0.0067 + 1.5x0.235 + 0.5x0 = 14.1$$

$$\text{Ağırlıkça \%Ni Eşdeğeri} = 0.142 + 30x0.234 + 0.5x0.629 = 7.6$$

ER312 ilave TIG teli için;

$$\text{Ağırlıkça \%Cr Eşdeğeri} = 30.7 + 0.2 + 1.5x0.4 + 0.5x0 = 31.5$$

$$\text{Ağırlıkça \%Ni Eşdeğeri} = 8.8 + 30x0.15 + 0.5x1.6 = 9.9$$

ER316 ilave TIG teli için;

$$\text{Ağırlıkça \%Cr Eşdeğeri} = 18.2 + 2.6 + 1.5x0.4 + 0.5x0 = 21.4$$

$$\text{Ağırlıkça \%Ni Eşdeğeri} = 12 + 30x0.01 + 0.5x1.7 = 13.2$$

ER2209 ilave TIG teli için;

Ağırlıkça %Cr Eşdeğeri= $22.7+2.6+1.5\times0.4+0.5\times0=26.7$

Ağırlıkça %Ni Eşdeğeri= $8.5+30\times0.01+0.5\times1.5=9.6$

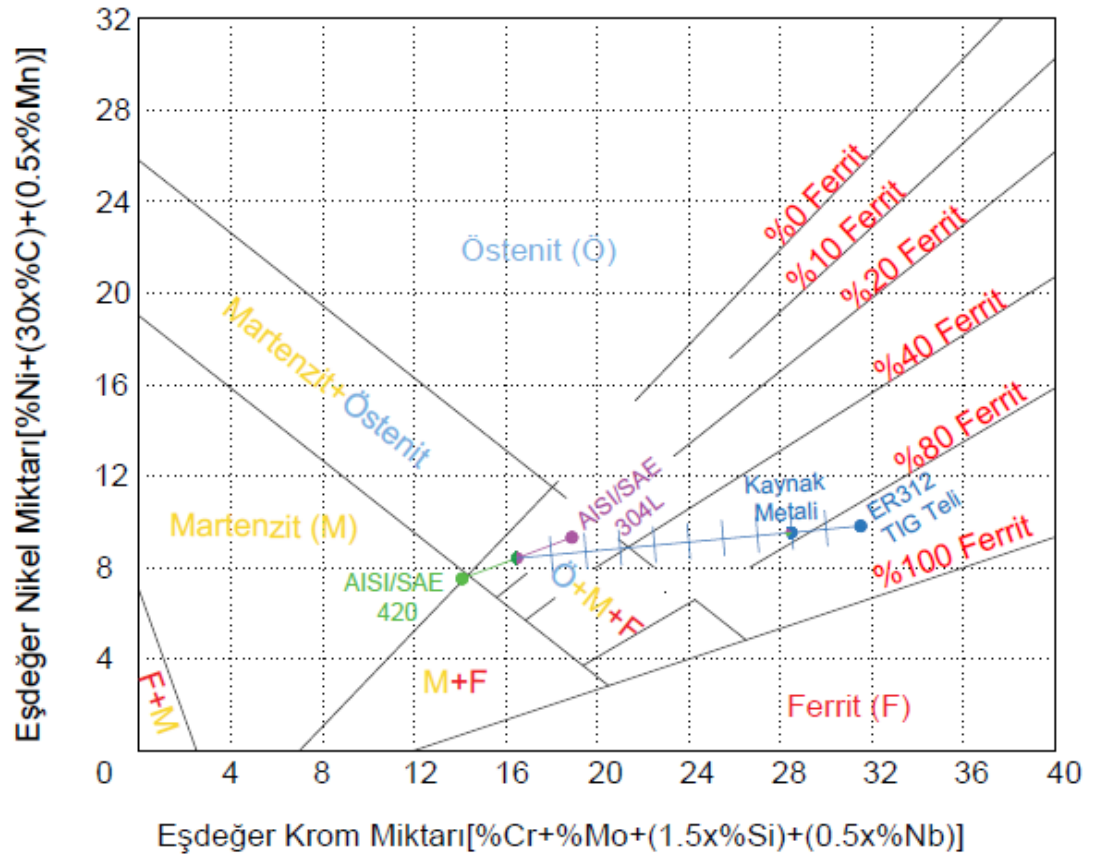
Nikel ve krom eşdeğerlikleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan krom ve nikel eşdeğerlikleri Çizelge 5.1.'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Schaeffler Diyagramına göre krom nikel eşdeğer tablosu

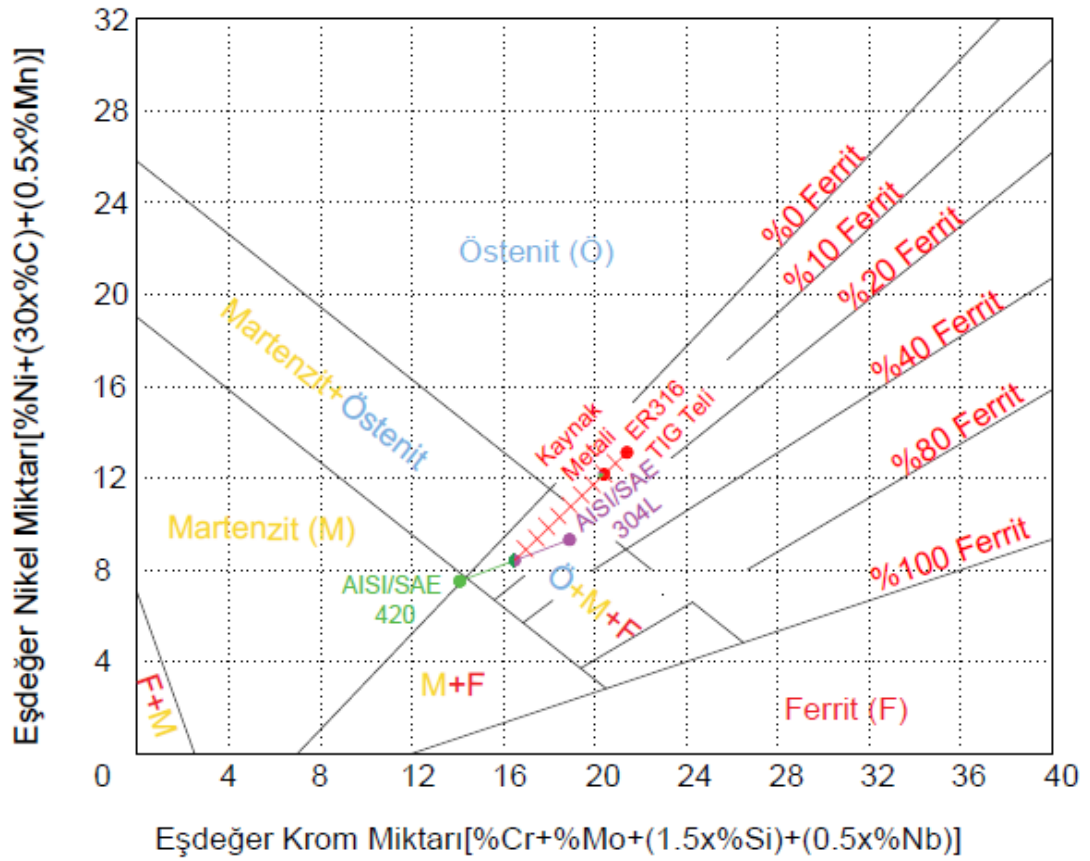
MALZEME	KROM EŞDEĞERİ	NİKEL EŞDEĞERİ
1.4307(304L)	18.9	9.4
1.4020(420)	14.1	7.6
ER312	31.5	9.9
ER316	21.4	13.2
ER2209	26.7	9.6

Çizelge 5.1.'de verilen eşdeğerlikler Şekil 5.1.-5.3.'de gösterilen Schaeffler Diyagramına yerleştirilmiş ve ana malzemeler ile birlikte üç farklı kaynak metali bileşimlerinin konumları işaretlenmiştir.



Şekil 5.1. Schaeffler diyagramında ER312 kaynak bölgesinin yapısı

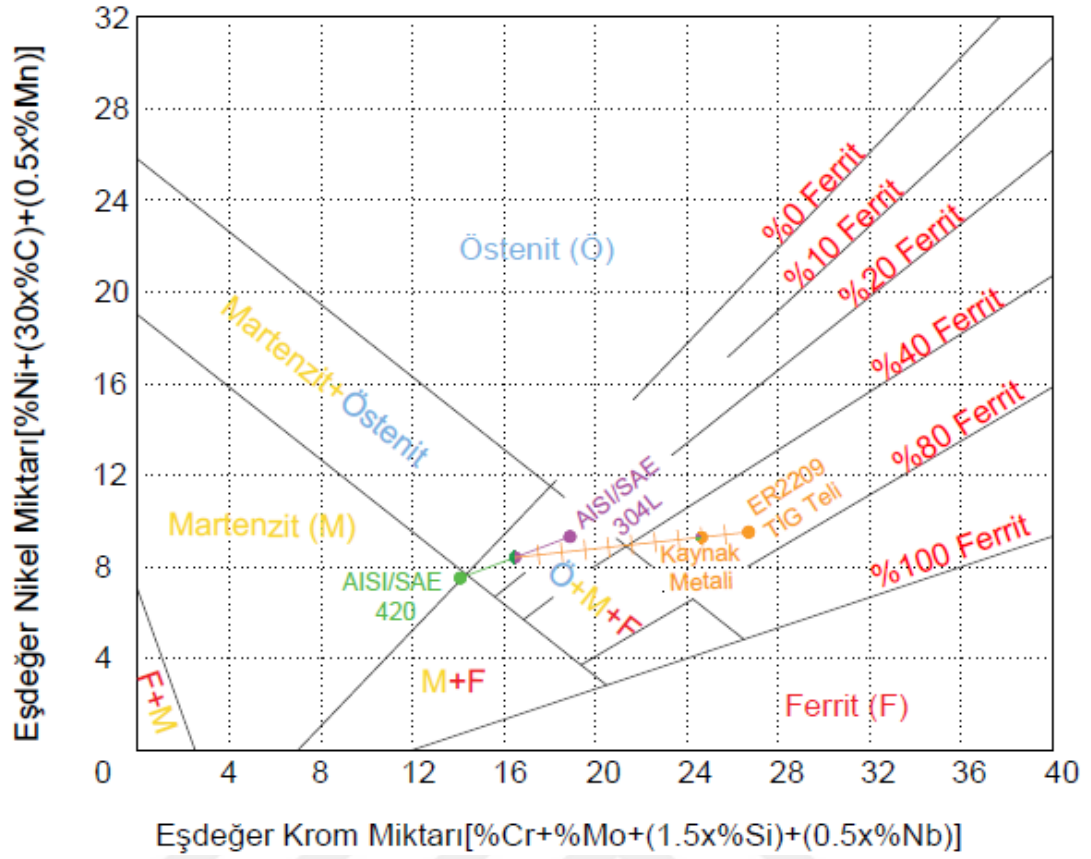
Şekil 5.1.'de, SAE/AISI 420 Martenzitik paslanmaz çelik ile SAE/AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ana malzemelerin sırasıyla baskın martenzitik ve östenitik mikro-yapıya sahip oldukları ve ER312 kodlu TIG ilave telinin baskın yaklaşık hacimsel olarak %85 oranında delta-ferrit mikro-yapı bileşimine sahip olduğu ve kaynak metalinin yaklaşık hacimsel olarak %78 oranında delta-ferrit içerdiği Schaeffler Diyagramındaki konumlarından anlaşılmaktadır.



Şekil 5.2. Schaeffler diyagramında ER316 kaynak bölgesinin yapısı

Şekil 5.2.'de, ER316 kodlu TIG ilave telinin ve kaynak metalinin yaklaşık hacimsel olarak %10 oranında delta-ferrit mikro-yapı bileşimine sahip olduğu Schaeffler Diyagramındaki konumlarından anlaşılmaktadır.

Şekil 5.3.'de, ER2209 kodlu TIG ilave telinin yaklaşık hacimsel olarak %66 oranında delta-ferrit mikro-yapı bileşimine sahip olduğu ve kaynak metalinin yaklaşık hacimsel olarak %56 oranında delta-ferrit içerdiği Schaeffler Diyagramındaki konumlarından anlaşılmaktadır.



Şekil 5.3. Schaeffler diyagramında ER2209 kaynak bölgesinin yapısı

5.1. ER312, ER316 ve ER2209 TIG Teli Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Muayene Sonuçları

Üç farklı bileşime sahip ilave TIG teli ile birleştirilen numuneler kaynak bölgesinde çatlak, boşluk, gözenek gibi kaynak işleminden ortaya çıkabilecek muhtemel kusurları tespit edebilmek amacıyla X-ışınları tüpü radyografisine tabi tutulmuştur.

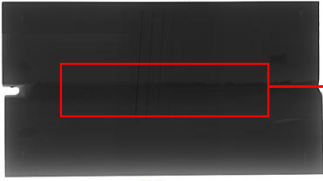
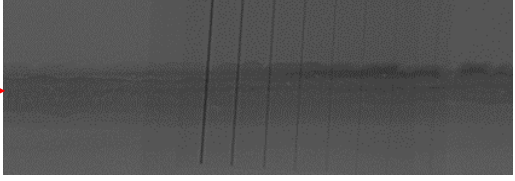
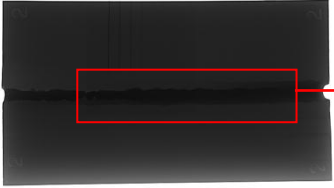
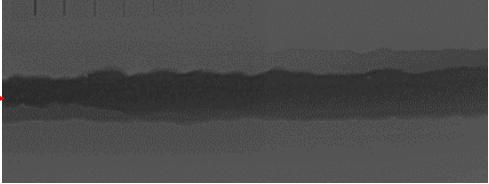
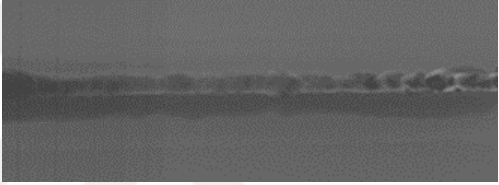
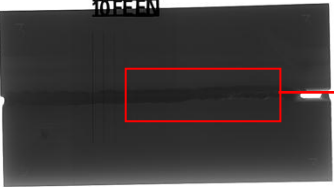
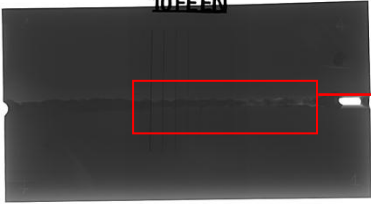
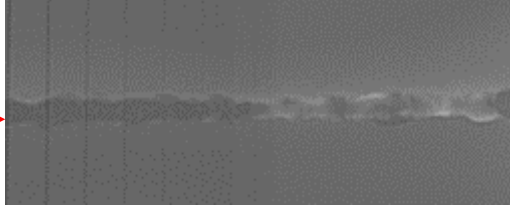
ER312 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı test numunelerinin radyografıları Şekil 5.4.'de görülmektedir. Beş adet kaynaklı numunede çeşitli boyutlarda 70 mm' ye kadar mesafelerde kesintili süreksizlikler tespit edilmiştir. Numunelerin ikisinde hiçbir birleşme kusuru görülmemiştir.

ER316 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı test numunelerinin radyografıları Şekil 5.5.'de görülmektedir. İncelenen beş adet kaynaklı numunenin birisinde kaynak metalinde sağ bitiş kısmında yaklaşık üç dört adet 0.5 mm çapında süreksizliklere rastlanmıştır. Yine kaynak metalinin sağ tarafında 60 mm boyutunda muhtemel

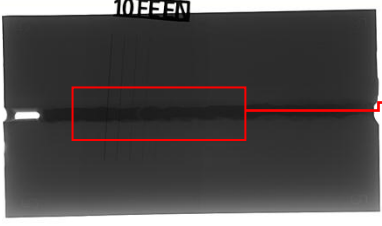
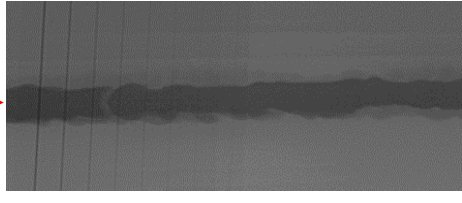
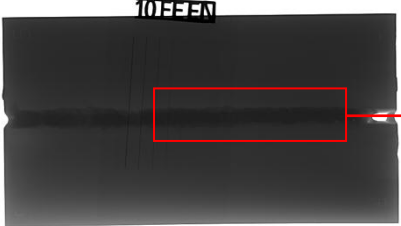
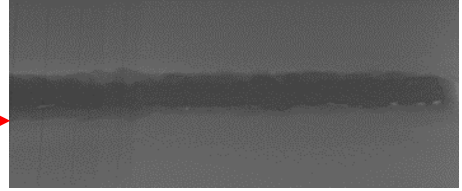
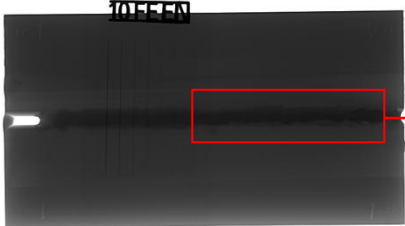
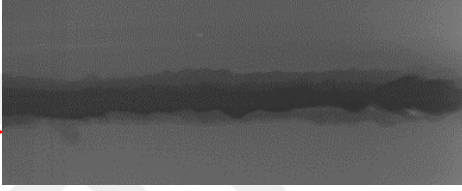
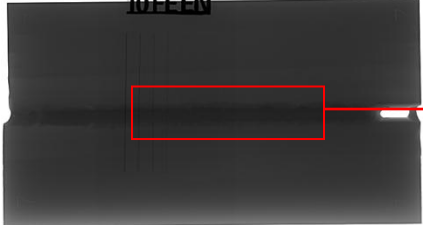
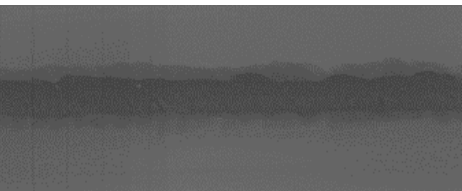
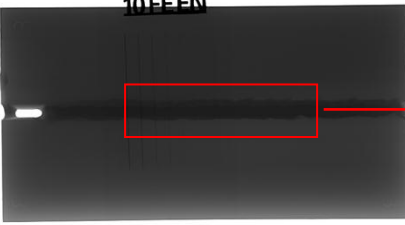
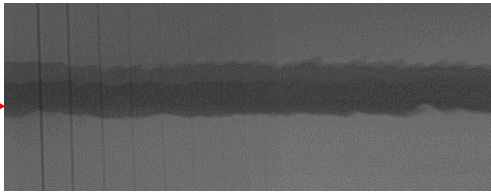
kaynak ilerleme hızı değişikliğinden dolayı kısmi dikiş genişlik farklılığı tespit edilmiştir. Numunelerin üçünde hiçbir birleşme kusuru görülmemiştir.

ER2209 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı test numunelerinin radyografları Şekil 5.6.'da görülmektedir. Beş adet kaynaklı numunede çeşitli boyutlarda ve mesafelerde kesintili süreksizlikler tespit edilmiştir. Numunelerin birinde hiçbir birleşme kusuru görülmemiştir.

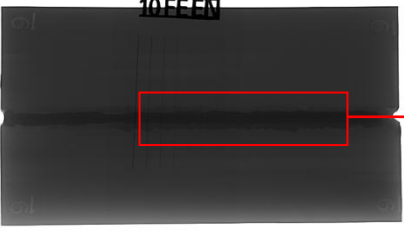
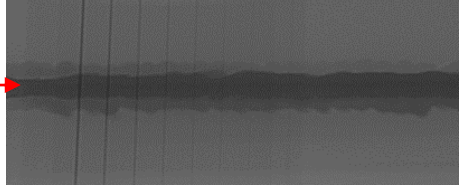
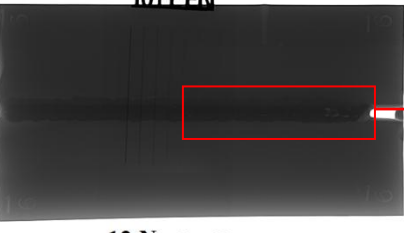
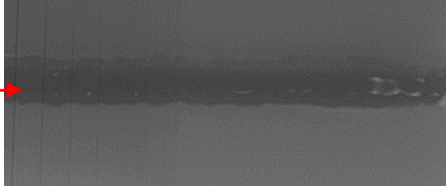
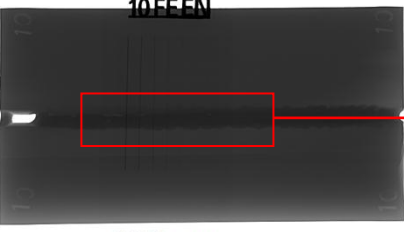
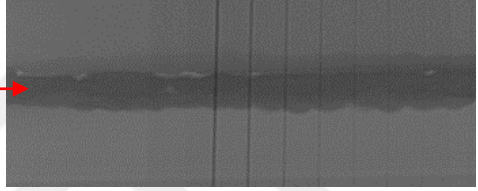
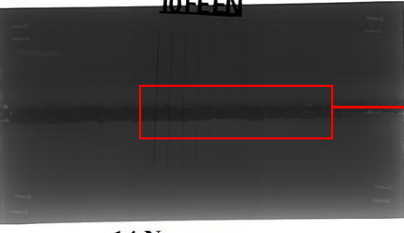
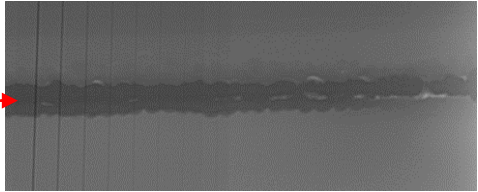
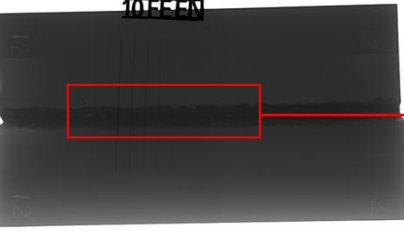
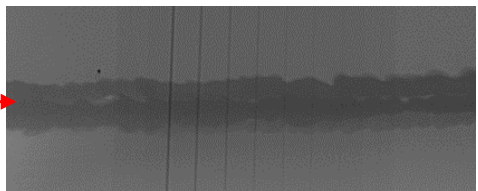
Kaynak Metalinde sağ bitiş kısmında yaklaşık üç dört adet 3mm, iki adet 1mm boyunda doğrusal süreksizliklere rastlanmıştır. Kaynak metalinin sağ tarafında 2 mm, 8 mm, 10 mm boyunda muhtemel kaynak ilerleme hızı değişikliğinden dolayı kesintili süreksizlikler tespit edilmiştir. Kaynak metalinde iki adet 2.4 mm, üç adet 4mm, bir adet 28 mm uzunluğunda doğrusal kesintili süreksizlikler tespit edilmiştir. Kaynak metalinde 2.4 mm, 8 mm ve iki adet 4 mm boyunda doğrusal kesintili süreksizlikler tespit edilmiştir.

Kaynaklı Numune	Tespit Edilen Bulgular
 10FEEN 1.Numune	 → Kaynak Metalinde süreksizliğe rastlanmamıştır.
 10FEEN 2.Numune	 → Kaynak Metalinde süreksizliğe rastlanmamıştır
 10FEEN 3.Numune	 → Kaynak metalinin sağ tarafında yaklaşık 70 mm boyutunda kısmi birleşme kusuru tespit edilmiştir.
 10FEEN 4.Numune	 → Kaynak metali sağ tarafı yaklaşık 10 mm boyunca kesintili birleşme kusuru tespit edilmiştir.
 10FEEN 5.Numune	 → Kaynak metali sağ tarafı yaklaşık 40 mm boyunca kesintili birleşme kusuru tespit edilmiştir.

Şekil 5.4. ER312 TIG teli ile bileştirilmiş test numunelerinin radyografik muayenesi

Kaynaklı Numune	Tespit Edilen Bulgular
 6.Numune	 → Kaynak Metalinde süreksizliğe rastlanmamıştır.
 7.Numune	 → Kaynak Metalinde sağ bitiş kısmında yaklaşık üç dört adet 0.5 mm çapında süreksizliklere rastlanmıştır.
 8.Numune	 → Kaynak metalinin sağ tarafında 60 mm boyutunda kesintili, muhtemel kaynak ilerleme hızı değişikliğinden dolayı kısmi dikiş genişlik farklılığı tespit edilmiştir.
 9.Numune	 → Kaynak metalinde kayda değer birleşme kusuru tespit edilmemiştir.
 10.Numune	 → Kaynak metalinde birleşme kusuru tespit edilmemiştir.

Şekil 5.5. ER316 TIG teli ile bileştirilmiş test numunelerinin radyografik muayenesi

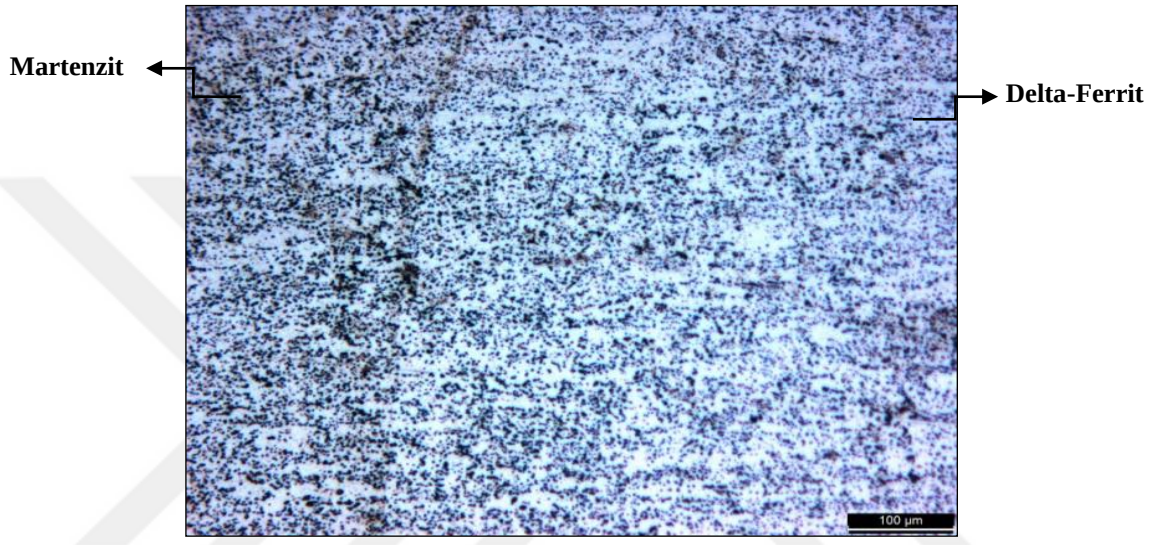
Kaynaklı Numune	Tespit Edilen Bulgular
 11.Numune	 → Kaynak Metalinde süreksizliğe rastlanmamıştır.
 12.Numune	 → Kaynak Metalinde sağ bitiş kısmında yaklaşık üç dört adet 3mm, iki adet 1mm boyunda doğrusal kesintili süreksizliklere rastlanmıştır.
 13.Numune	 → Kaynak metalinin sağ tarafında 2 mm, 8 mm, 10 mm boyunda kesintili, muhtemel kaynak ilerleme hızı değişikliğinden dolayı süreksizlikler tespit edilmiştir.
 14.Numune	 → Kaynak metalinde iki adet 2.4 mm, iki adet 4mm, bir adet 28 mm uzunluğunda doğrusal kesintili süreksizlikler tespit edilmiştir.
 15.Numune	 → Kaynak metalinde 2.4 mm, 8 mm ve iki adet 4 mm boyunda doğrusal kesintili süreksizlik tespit edilmiştir.

Şekil 5.6. ER2209 TIG teli ile bileştirilmiş test numunelerinin radyografik muayenesi

5.2. Mikro Yapı İncelenmesi

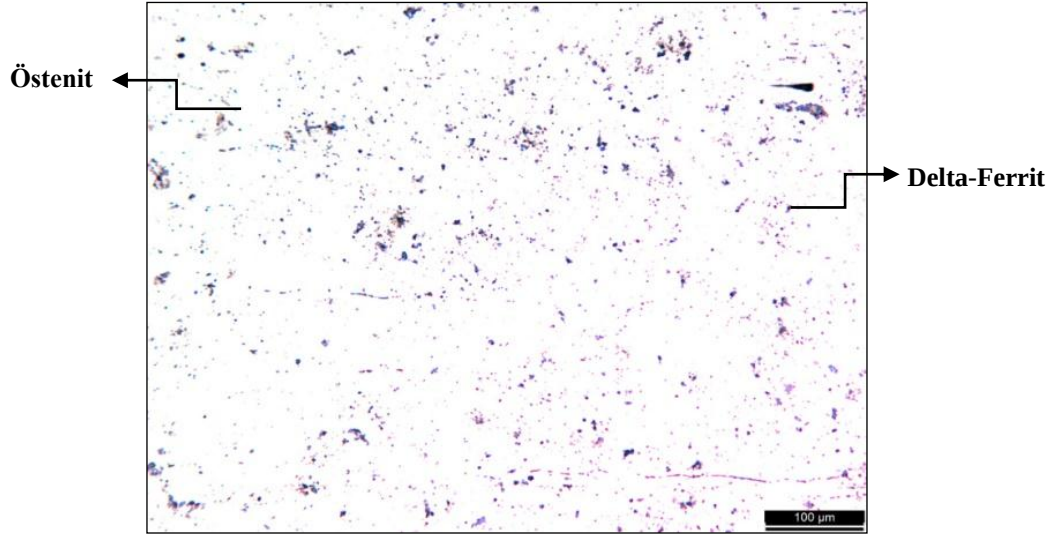
5.2.1. AISI/SAE304L (1.4307) ve AISI/SAE420 (1.4021) Ana Malzemelerin Mikro Yapıları

Şekil 5.7.'de AISI/SAE 420 Martenzitik paslanmaz çeliğin ana malzeme mikro-yapısı görülmektedir.



Şekil 5.7. AISI/SAE 420 ana malzeme mikro-yapısı (200x)

Yapıda baskın faz olan martenzit içeriğinden dolayı büyük oranda karbon çeliklerine benzer kontrast sergileyen deneysel çalışmada kullanılan AISI/SAE 420 kalite paslanmaz çelik levhada koyu kontrast martenziti, açık kontrast delta-ferriti ifade etmektedir.

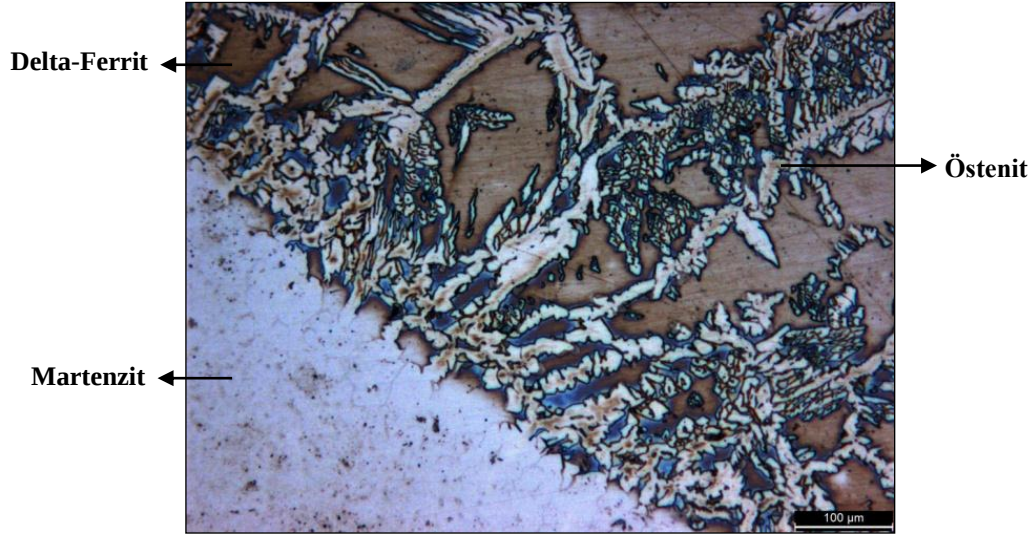


Şekil 5.8. AISI/SAE304L ana malzeme mikro-yapısı (200X)

Şekil 5.8.'de AISI/SAE 304L östenitik paslanmaz çelik levhanın ana malzeme mikro-yapısını göstermektedir. Burada baskın olan tamamen östenitik faz içeriği görülmektedir. Açık kontrast östeniti, az oranda kısmen koyu kontrast ise tane sınırı delta-ferritini belirtmektedir.

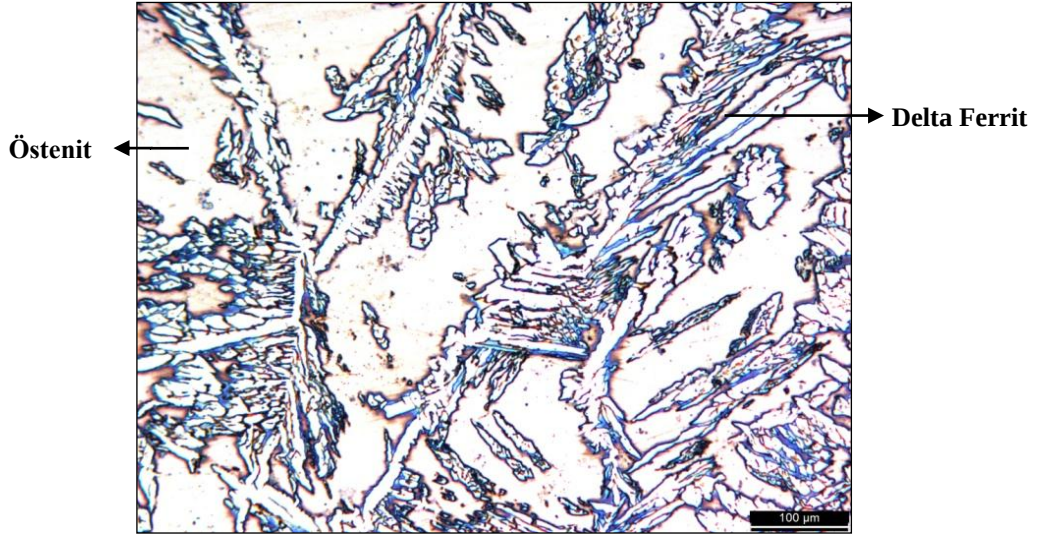
5.2.2. ER312 TIG Teli İle Birleştirilmiş Test Numunelerinin Mikro Yapıları

Şekil 5.9.'da ER312 TIG teli ile birleştirilmiş 420 ve 304L paslanmaz çelik kaynaklı numunelerin 420 kaynak metali geçiş bölgesi ITAB mikro-yapıları görülmektedir.



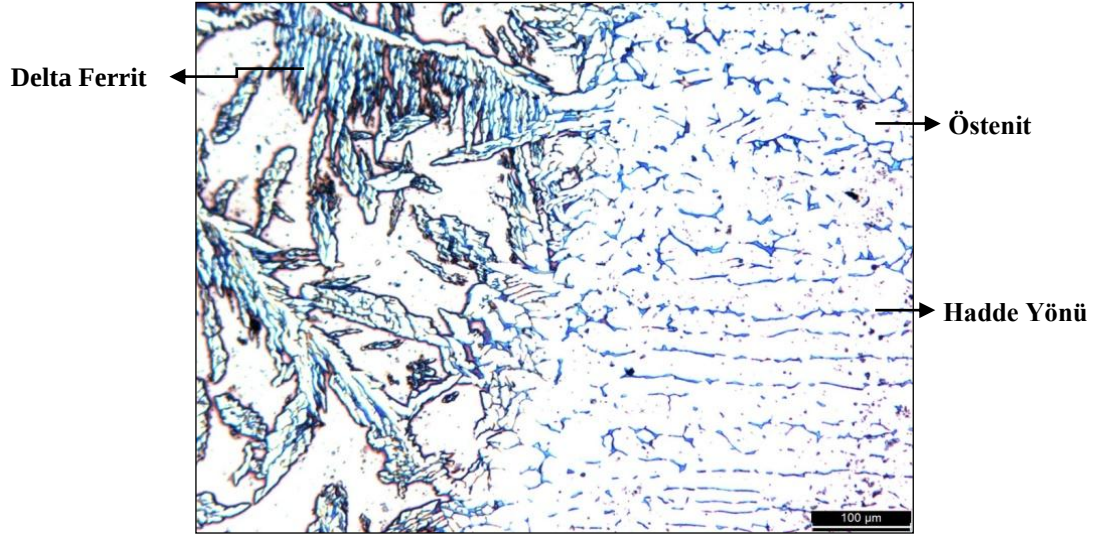
Şekil 5.9. ER312 TIG teli ile kaynak yapılan numune 420-kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)

Şekil 5.9.'da ITAB-kaynak metali arasındaki keskin geçiş sınırları öne çıkmakta, kaynak metali tarafında kahverengi bölge delta ferriti, açık (beyaz) renk ise östeniti ifade etmektedir. 420 paslanmaz çelik tarafında (sol taraf) ise baskın olarak martenzitik mikro-yapıyı görülmektedir. NaOH dağlayıcı çözelti martenzit fazını etkileyebilmesi için daha fazla süreye ihtiyaç duyulmakta ancak bu durumda kaynak metali bileşimi kararabileceğinden martenzitik paslanmaz çelik tarafı kimyasal dağlayıcıya yeterli tepkiyi verememiştir. Bununla birlikte kaynaklı bağlantının 420 tarafının baskın oranda martenzit ve eser miktarda delta ferritten meydana geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.10. ER312 TIG teli ile kaynak yapılan numune kaynak bölgesi(200x)

Şekil 5.10.'da ER312 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunenin kaynak metali mikro-yapısı verilmektedir. İğnesel yapılar östeniti ifade ederken matriste ise delta ferrit görülmektedir. Bununla birlikte 312 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunenin kaynak metalinin mikro-yapısal faz analizi sonucunda; yaklaşık olarak hacimce %78 delta-ferrit geri kalanı östenitten meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 5.11.'de ER312 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numunenin ITAB 304L geçiş mikro-yapısı verilmektedir. Görüntüde sağ taraf haddelenmiş 304L yapısını ifade ederken haddelenmiş yapının ITAB' a yaklaşırken bozulduğu anlaşılmaktadır.

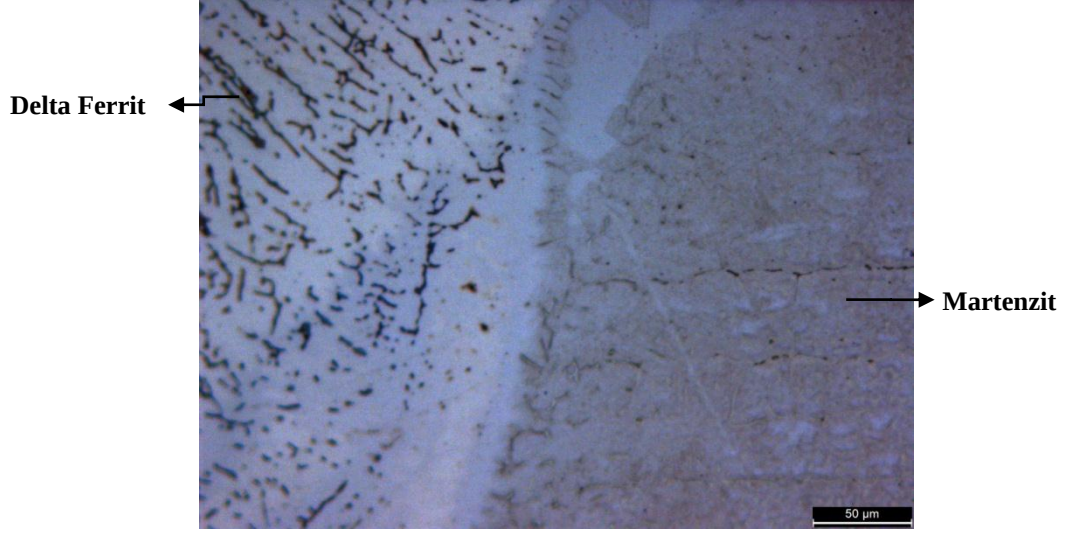


Şekil 5.11. ER312 TIG teli ile kaynak yapılan numune 304L-kaynak metal geçiş-ITAB bölgesi(200x)

Sağ kısımda yer alan 304L östenitik faz bölgesinden ITAB' a doğru yaklaştıkça bozulan haddelenmiş yapı dendritik tanelere dönüşmekte ve kaynak metalinde dallantılı delta-ferrit östenit taneciklerine doğru gelişmektedir. Bu duruma kaynak metaline doğru ilerledikçe artan kaynak ısı girdisiyle birlikte tane kabalaşması ve ardından soğuma hızına bağlı olarak katılaşma koşullarının neden olduğu düşünülmektedir.

5.2.3. ER316 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Mikro Yapıları

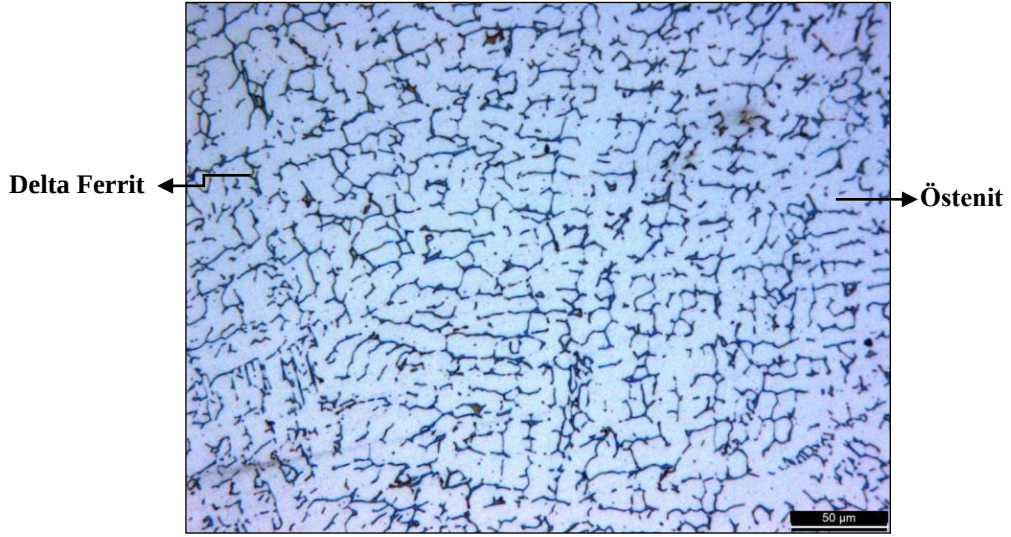
Şekil 5.12.'de ER316 TIG teli ile birleştirilmiş 420 ve 304L kaynaklı numunelerin mikro-yapıları verilmektedir.



Şekil 5.12. ER316 TIG teli ile kaynak yapılan numune 420 kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)

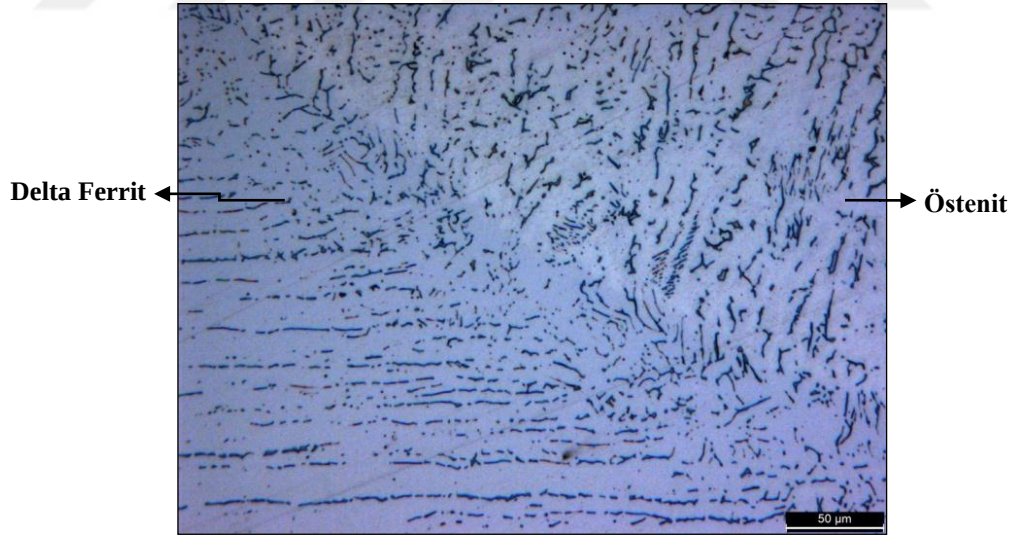
Mikro yapı incelendiğinde; sağ tarafta kısmen dağlanmış baskın martenzitik (kısmen koyu) yapı ile birlikte azınlıkta delta-ferrit taneleri yer almaktadır. Sol tarafta kaynak metalinde ise 316 TIG telinin kimyasal bileşiminden dolayı nihai yapı baskın östenit (açık renkli dağlanmamış bölgeler) fazının yanında bir miktar delta-ferrit içermekte olduğu anlaşılmaktadır. 316 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metaline uygulanan mikro-yapısal faz analizlerine göre delta ferrit oranı yaklaşık hacimsel olarak %10, östenit oranı ise %90 tespit edilmiştir.

316 TIG teli ile birleştirilen numunenin kaynak metalini gösteren Şekil 5.13. bu durumu desteklemektedir. Şekil 5.13.'de görülen beyaz bölgeler östeniti, koyu renkli bölgeler ise tane sınırı delta-ferritini ifade etmektedir.



Şekil 5.13. ER316 TIG teli ile kaynak yapılan numune kaynak bölgesi (200x)

Şekil 5.14.'de ER316 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin 304L-Kaynak metali geçiş bölgesi mikro-yapısı verilmektedir. Mikro-yapıda hem kaynak metalinde hem de ITAB bölgesinde baskın olan faz (beyaz renk) östenit, koyu çizgiler ise tane sınırı delta-ferritini göstermektedir.

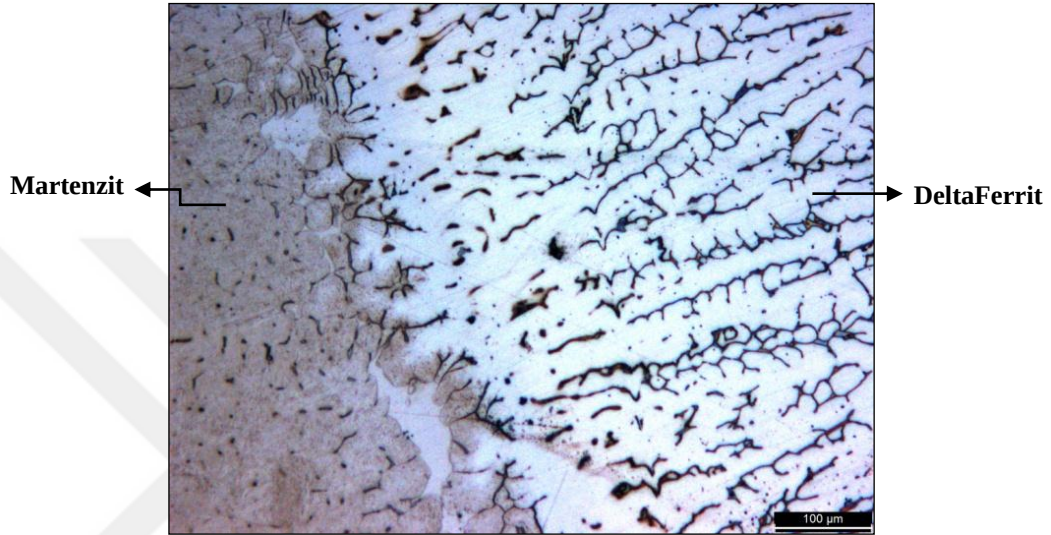


Şekil 5.14. ER316 TIG teli ile kaynak yapılan numune 304L-kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)

304L ana malzeme tarafındaki (görüntüde sol taraf) haddelenmiş faz yapısı ITAB' a doğru yaklaştıkça doğrusallığı bozulmakta kısmen dallantılı bir yapıya doğru gelişmektedir.

5.2.4. ER2209 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Mikro Yapıları

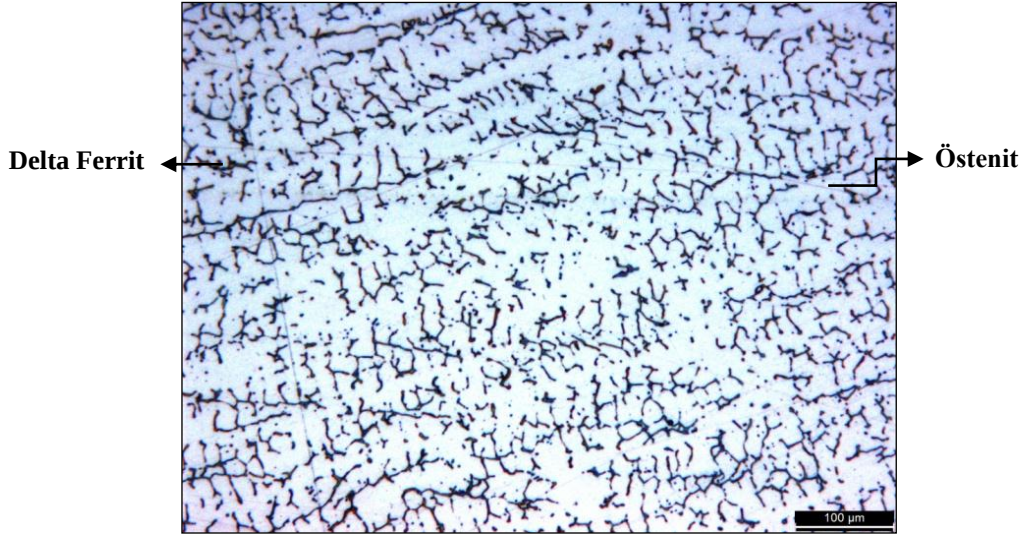
Şekil 5.15.'de ER2209 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunelerin 420-Kaynak Metali ITAB geçiş bölgesi mikroyapısı görülmektedir. Mikro-yapıda sağ tarafta yer alan kaynak metalinde beyaz renkli faz östeniti, koyu çizgisel bölgeler taneler arası delta-ferriti göstermektedir.



Şekil 5.15. ER 2209 TIG teli ile kaynak yapılan numune 420-kaynak metali geçişi ITAB bölgesi (200x)

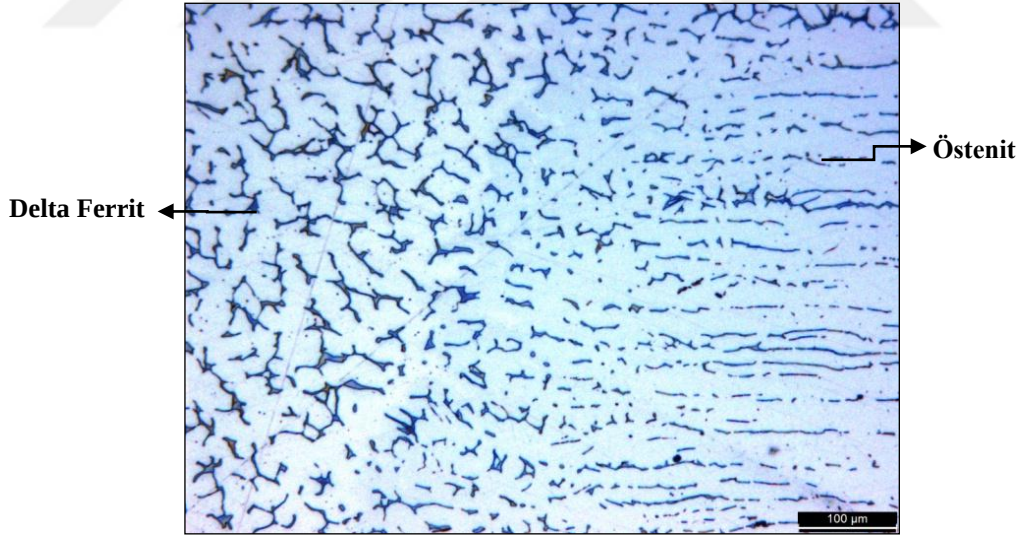
Sol tarafta yer alan 420 paslanmaz çelik mikroyapısı ise baskın olarak martenzitten ve eser miktarda delta-ferritten meydana gelmektedir. Mikro-yapıda; kısmen dağlanmış kahverengiyi andıran bölgeler martenziti, daha koyu bölgeler ise delta-ferriti ifade etmektedir.

Şekil 5.16.'da ER 2209 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metali merkezinin mikroyapısı görülmektedir. Mikro-yapıda beyaz renkli bölgeler östeniti, koyu çizgisel renkli bölgeler ise tane sınırı delta-ferritini göstermektedir. Yapılan mikro-yapısal faz analizlerinde yapının yaklaşık olarak hacimce %56 delta-ferrit, %44 östenitten meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.16. ER2209 TIG Teli İle Kaynak Yapılan Numune Kaynak Bölgesi(200x)

Şekil 5.17.'de ER 2209 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin 304L-Kaynak metali geçişi ITAB mikro-yapısı görülmektedir. Mikro-yapının tamamen östenitik fazdan meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapıda beyaz renkli bölgeler östeniti koyu çizgisel uzantılı bölgeler ise tane sınırı delta-ferritini ifade etmektedir.



Şekil 5.17. ER2209 TIG teli ile kaynak yapılan numune 304L kaynak metali geçişi-ITAB bölgesi (200x)

304L ana malzemenin haddelenmiş yapısından kaynak metaline doğru yaklaştıkça hadde yapısının bozulduğu kaynak metalinde östenitin küresel forma dönüştüğü görülmektedir.

5.3. Sertlik Testi

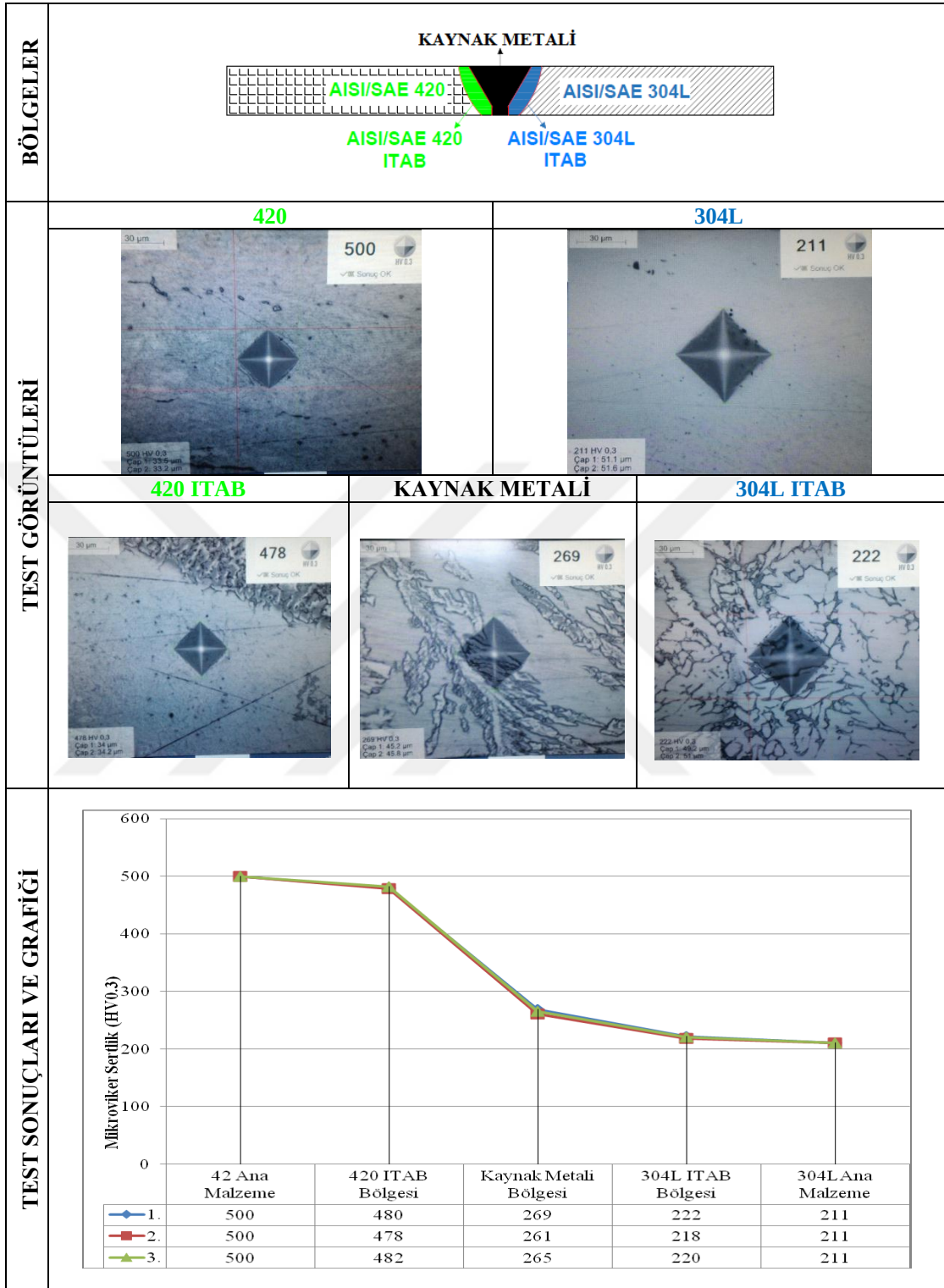
5.3.1. ER312 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Sertlik Taraması

Çizelge 5.2.'de göröleceği üzere dönüşüm yoluyla sertleşme yeteneği bulunmayan östenitik paslanmaz çelik tarafı 211 HV düşük sertlik profili sergilemiş ancak dönüşüm yoluyla sertleştirilebilen martenzitik paslanmaz çelik tarafı ise 500 HV sertlik değerine ulaşmıştır.

420 ITAB bölgesinde sertlik profili 304L ITAB bölgesinden daha yüksek sertlik profili sergilemiştir.

Kaynak metalinin sertliği ise her iki ana malzemeden eşit oranda kimyasal bileşim olarak ortalama 265 HV olarak kayıt edilmiştir.

Çizelge 5.2. ER312 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numune sertlik taraması



5.3.2. ER316 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Sertlik Taraması

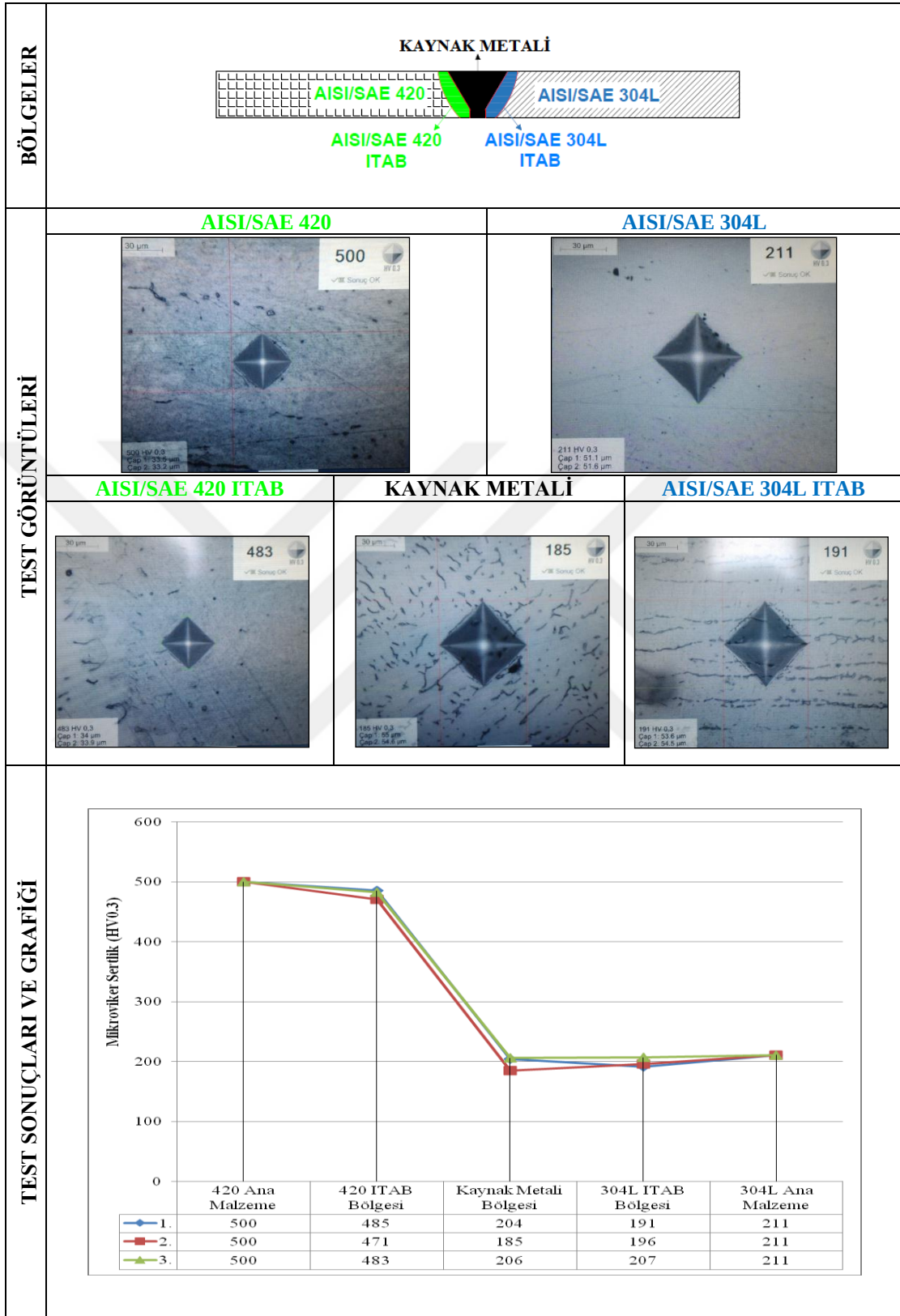
Çizelge 5.3.'de görüleceği üzere dönüşüm yoluyla sertleşme yeteneği bulunmayan östenitik paslanmaz çelik tarafı 211 HV gibi düşük sertlik profili sergilemiş ancak dönüşüm yoluyla sertleştirilebilen martenzitik paslanmaz çelik ana malzeme tarafı ise 500 HV sertlik değerine ulaşmıştır.

420 ITAB bölgesinde sertlik profili 483HV olarak tespit edilirken 304L ITAB bölgesinden (191HV) daha yüksek sertlik profili sergilemiştir.

Kaynak metalinin sertliği ise her iki ana malzemedен eşit oranda kimyasal bileşim olarak ortalama 185 HV kayıt edilmiştir.



Çizelge 5.3. ER316 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numune sertlik taraması



5.3.3. ER2209 TIG Teli ile Birleştirilmiş Test Numunelerinin Sertlik Taraması

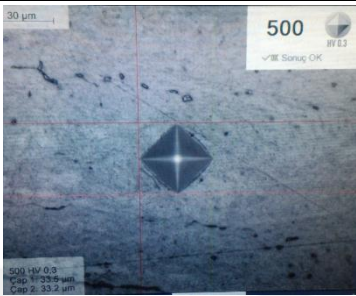
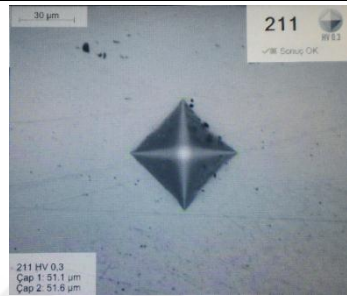
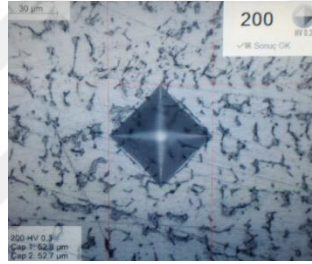
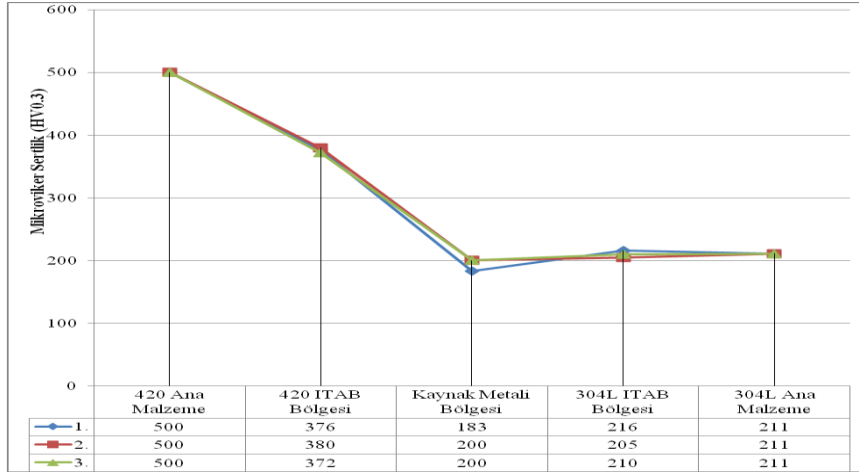
Çizelge 5.4.'de göröleceği üzere dönüşüm yoluyla sertleşme yeteneği bulunmayan östenitik paslanmaz çelik tarafı 211 HV gibi düşük sertlik profili sergilemiş ancak dönüşüm yoluyla sertleştirilebilen martenzitik paslanmaz çelik tarafı ise 500 HV sertlik değerine ulaşmıştır.

420 ITAB bölgesinde sertlik profili 376HV olarak tespit edilirken 304L ITAB bölgesinden (205HV) daha yüksek sertlik profili sergilemiştir.

Kaynak metalinin sertliği ise ortalama 200 HV olarak kayıt edilmiştir.



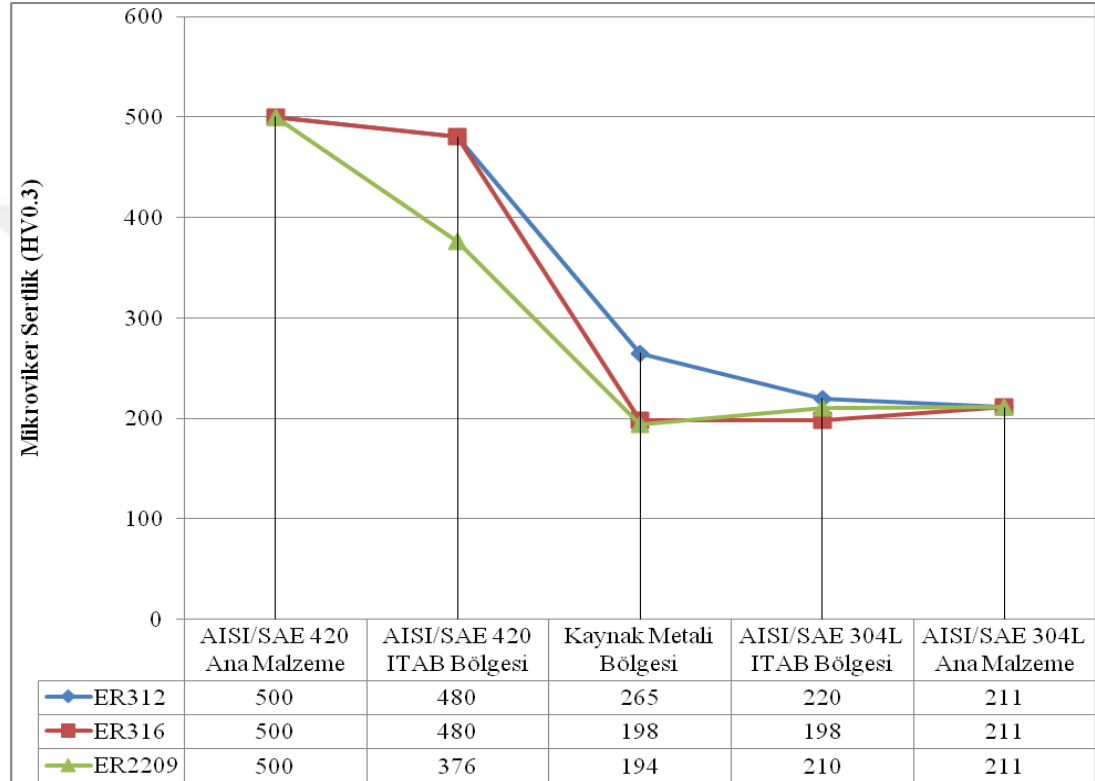
Çizelge 5.4. ER2209 TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numune sertlik taraması

BÖLGELER	KAYNAK METALİ AISI/SAE 420 AISI/SAE 304L AISI/SAE 420 ITAB AISI/SAE 304L ITAB																										
TEST GÖRÜNTÜLERİ	AISI/SAE 420		AISI/SAE 304L																								
																											
	AISI/SAE 420 ITAB	KAYNAK METALİ	AISI/SAE 304L ITAB																								
																											
TEST SONUÇLARI VE GRAFİĞİ	 <table><thead><tr><th></th><th>420 Ana Malzeme</th><th>420 ITAB Bölgesi</th><th>Kaynak Metali Bölgesi</th><th>304L ITAB Bölgesi</th><th>304L Ana Malzeme</th></tr></thead><tbody><tr><td>1.</td><td>500</td><td>376</td><td>183</td><td>216</td><td>211</td></tr><tr><td>2.</td><td>500</td><td>380</td><td>200</td><td>205</td><td>211</td></tr><tr><td>3.</td><td>500</td><td>372</td><td>200</td><td>210</td><td>211</td></tr></tbody></table>				420 Ana Malzeme	420 ITAB Bölgesi	Kaynak Metali Bölgesi	304L ITAB Bölgesi	304L Ana Malzeme	1.	500	376	183	216	211	2.	500	380	200	205	211	3.	500	372	200	210	211
	420 Ana Malzeme	420 ITAB Bölgesi	Kaynak Metali Bölgesi	304L ITAB Bölgesi	304L Ana Malzeme																						
1.	500	376	183	216	211																						
2.	500	380	200	205	211																						
3.	500	372	200	210	211																						

ER312 ilave TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunenin kaynak metali merkezi ve 304L tarafı ITAB bölgelerinin mikro-sertlik tarama sonuçlarına göre ER316 ve ER2209 TIG teli ile birleştirilen numunelere kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca ER312 ve ER316 TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunelerin

420 tarafının ER2209 ile birleştirilen numuneden daha yüksek ITAB mikro sertlik değerlerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Çizelge 5.5. incelendiğinde 420 ana malzemeye doğru sertlik değerlerinin bütün numunelerde artış gösterdiği 420 paslanmaz çelik alaşımının serleşebilirliği yüksek olmasından kaynaklandığı ve 304L paslanmaz çeliğin dönüşüm yoluyla serleştirilememesinden ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.5. Mikrovickers sertlik testi taraması aritmetik ortalamaları(HV_{0.3})



5.4. Çentikli Darbe Testi

Üç farklı bileşime sahip ilave TIG teli ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metali darbe enerjilerini saptamak amacıyla ASTM A370 ve ASTM E23-12c standartları uyarınca kaynak metali merkezinden enine olacak şekilde sekizer adet V-çentikli Charpy darbe testi uygulanmıştır.

Kaynaklı numunelerin darbe enerjileri sonuçları Çizelge 5.6.'da verilmektedir.

Çizelge 5.6. Çentikli darbe test sonuçları

ER312 TIG Teli Kaynaklı Numuneler			ER316 TIG Teli Kaynaklı Numuneler			ER2209 TIG Teli Kaynaklı Numuneler		
KOD	kgm	JOULE (kg.m ² /s ²)	KOD	kgm	JOULE (kg.m ² /s ²)	KOD	kgm	JOULE (kg.m ² /s ²)
1	2.80	27.47 J	6	3.20	31.39 J	11	4.60	45.13 J
3	2.40	23.54 J	6	3.20	31.39 J	11	4.50	44.15 J
3	2.50	24.53 J	6	3.20	31.39 J	12	4.40	43.16 J
3	2.60	25.51 J	7	3.50	34.34 J	12	4.50	44.15 J
4	2.90	28.45 J	7	3.40	33.35 J	13	3.30	32.37 J
4	2.80	27.47 J	8	3.20	31.39 J	14	4.20	41.20 J
5	2.70	26.49 J	8	3.40	33.35 J	14	4.50	44.15 J
5	2.80	27.47 J	10	3.60	35.32 J	15	4.50	44.15 J

Kaynaklı numunelerin Çizelge 5.6.'da verilen darbe enerjilerinin aritmetik ortalamaları Çizelge 5.7.'de listelenmektedir. Buna göre; ER2209 ilave TIG teli ile birleştirilen kaynaklı numunenin darbe enerjisinin en yüksek değerde, ER312 ilave TIG teli ile birleştirilen numunelerin ise en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. ITAB' da en yüksek sertlik değerlerini sergileyen ER316 ilave teli ile birleştirilen numune darbe enerjisini ikinci sırada yer alarak göstermiştir. Sertlik ile darbe enerjisi ters orantılı olmakta, artan sertlik değerleri ile birlikte süneklik yani darbe dayanımı azalmaktadır. Bu çalışmada en yüksek ITAB martenzitik tarafı sertlik değeri sergileyen ER316 ilave tel ile birleştirilen numune olmuş ancak darbe dayanımını diğer iki numunenin sonuçlarının arasında tamamlamıştır.

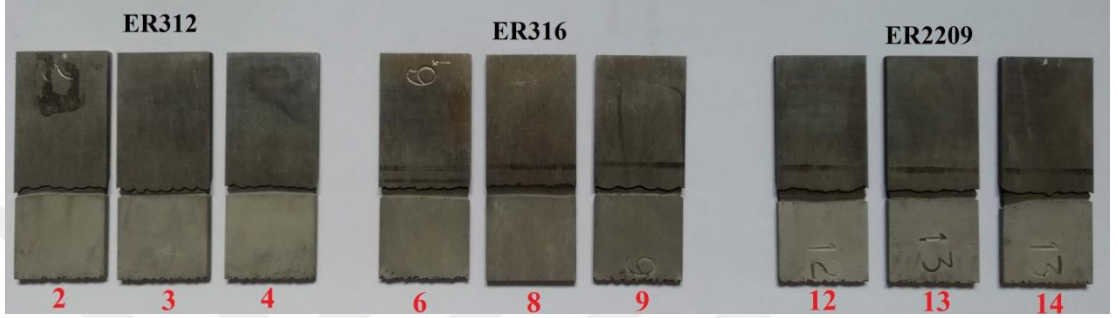
Çizelge 5.7. Kaynaklı numunelerin darbe enerjileri aritmetik ortalamaları

	Kgm	Joule(kg.m ² /s ²)
ER312	2.6875	26.36
ER316	3.3375	32.74
ER2209	4.3125	42.31

Çizelge 5.7.'de görüleceği üzere en yüksek darbe dayanımını ER2209 TIG ilave teli ile birleştirilen test kaynaklı numunesi göstermiştir.

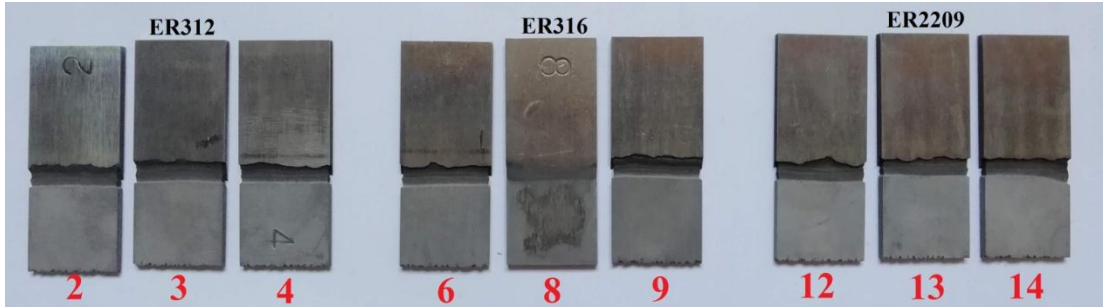
5.5. Korozyon Testi

Üç farklı kaynak ilave teli koşulu ile birleştirilen numunelerin korozyon dayanımlarını tespit etmek amacıyla ASTM G48 standardı kapsamında korozyon testi uygulanmıştır. 72 saat süre ile $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ çözeltisinde bekletilmiştir. 72 saat süre sonunda tüm kaynaklı korozyon test numuneleri temizlenmiştir.



Şekil 5.18. Korozyon testi sonrası temizlenmiş numunelerin ön yüz görüntüleri

Test sonrasında numunelerde oluşan korozyon ürünlerini gidermek amacıyla ASTM G48’ de belirtildiği gibi numuneler saf su ile fırçalanarak temizlenmiştir. Temizleme işlemi sonrası test numunelerinin sırasıyla ön ve arka yüzeylerinin görüntüleri Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.’da verilmektedir.



Şekil 5.19. Korozyon testi sonrası temizlenmiş numunelerin arka yüz görüntüleri

Çizelge 5.8. Korozyon testi deney sonrası ağırlık tartımları

ER312 TIG Tel Kaynaklı Numuneler				
Kod	1. Tartım	2. Tartım	3. Tartım	Ortalama
2	17,3736	17,3737	17,3737	17,3737
3	16,9478	16,9478	16,9478	16,9478
4	18,1669	18,1669	18,1669	18,1669
ER316 TIG Tel Kaynaklı Numuneler				
Kod	1. Tartım	2. Tartım	3. Tartım	Ortalama
6	17,4975	17,4974	17,4974	17,4974
8	19,5433	19,5433	19,5434	19,5433
9	17,4102	17,4102	17,4103	17,4102
ER2209 TIG Tel Kaynaklı Numuneler				
Kod	1. Tartım	2. Tartım	3. Tartım	Ortalama
12	17,2120	17,2120	17,2120	17,2120
13	18,5189	18,5188	18,5189	18,5189
14	17,9468	17,9468	17,9468	17,9468

Temizlenen kaynaklı korozyon test numunelerinin korozyon hızları;

ASTM G48’ de ifade edilen;

Korozyon hızı: Toplam ağırlık Kaybı (g) / Toplam Yüzey Alanı (cm³) bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Buradan çıkan korozyon hızı sonucunun 0.0001 sınır değerinin üzerinde olması durumunda sadece korozyonun mevcut olduğu ancak şiddeti ve miktarı hakkında yorum yapılamayacağı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte; korozyon test numunelerinin her biri için ayrı olarak hesaplanan korozyon hızları Çizelge 5.8.’de verilmektedir. Çizelge 5.8.’de verilen sonuçlara göre bütün kaynaklı korozyon test numunelerinde korozyon tahribatının gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Ancak kaynaklı korozyon test numunelerinin birbirleri arasında korozyon hızlarının kıyaslanabilmesi amacıyla korozyon hızlarını mm/yıl biriminden hesaplayan ASTM G1 kod numaralı Standard kullanılmaktadır.

Bu amaçla korozyon test numunelerinin hali hazırda hesaplanmış ağırlık kayıpları (korozyon hızları); **ASTM G1**'e göre;

$$K.H.=(K \times W)/(A \times T \times D) \quad (5.3)$$

K.H.= Korozyon Hızı(mm/yıl)

K=Sabit(mm/yıl)

W=Ağırlık Kaybı(gram)

A=Yüzey Alanı(cm²)

T=Zaman(Saat)

D=Yoğunluk(gram/cm³)

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 5.9.'da verilmektedir. Çizelge 5.10.'da korozyon test sonuçlarının aritmetik ortalamaları görülmektedir.

Çizelge 5.9. Kaynaklı numunelerin korozyon hızları

ER312 TIG Teli Kaynaklı Numuneler				
Kod	Yüzey Alanı (mm²)	Malzeme Kaybı (gram)	ASTM G48 >0,0001	ASTM G1 (mm/yıl)
2	2346.6281	1.8826	2.6742	0.0802
3	2353.6000	1.9040	2.6966	0.0809
4	2378.5998	1.9920	2.7916	0.0837
ER316 TIG Teli Kaynaklı Numuneler				
Kod	Yüzey Alanı (mm²)	Korozyon Kaybı (gram)	ASTM G48 >0,0001	ASTM G1 (mm/yıl)
6	2370.5163	2.3860	3.3552	0.1007
8	2375.4446	0.5496	0.7713	0.0231
9	2373.3414	2.4880	3.4944	0.1048
ER2209 TIG Teli Kaynaklı Numuneler				
Kod	Yüzey Alanı (mm²)	Korozyon Kaybı (gram)	ASTM G48 >0,0001	ASTM G1 (mm/yıl)
12	2354.3833	1.8651	2.6407	0.0792
13	2377.6645	1.7924	2.5128	0.0754
14	2373.9231	1.9778	2.7771	0.0833

Çizelge 5.10. Korozyon kaybı, korozyon hızı ve yüzey alanları aritmetik ortalamaları

	Yüzey Alanı (mm ²)	Korozyon Kaybı (gram)	ASTM 48 >0,0001	ASTM G1 (mm/yıl)
ER312	2359.6093	1.9262	2.7211	0.0816
ER316	2373.1008	1.8079	2.5394	0.0762
ER2209	2368.6570	1.8784	2.6434	0.0793

Çizelge 5.10. incelendiğinde; bütün numuneler her üç TIG teli bileşiminde de ASTM G48 ve G1 standartları uyarınca yetersiz korozyon dayanımı sergilemişlerdir. Korozyon hız sonuçları birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. Demir-klorür esaslı çözeltide üç gün süreyle bekletilen tüm numuneler ilgili çözeltide çözünmüşlerdir.

Çözünmenin büyük oranda martenzitik paslanmaz çelik ve kaynak metali bölümünde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR

1. Çalışmada kullanılan eş 3 mm kalınlığa sahip 304L ve 420 kalite paslanmaz çelik levhalar TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmeleri sonrasında makro seviyede boşluk, gözenek, yetersiz ergime, kökte sarkma v.b. bağlantı hatasına rastlanmamıştır. Radyografik muayene sonuçlarına göre kaynaklı numunelerde kesintili bölgesel süreksizlikler tespit edilmiştir.
2. TIG kaynağında; kaynak metali bileşimine ilave telin katkısının %80 oranında olmasından dolayı ilave telin bileşiminin kaynak metali bileşimini, mikro-yapısını, mekanik özelliklerini ve korozyon dayanımını değiştirdiği gözlenmiştir.
3. Bütün kaynaklı numuneler korozyon test sonuçlarına göre her üç TIG ilave teli bileşiminde de yetersiz korozyon dayanımı sergilemişler ve korozyon hız sonuçları birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. Ancak korozyon test çözeltisinde çözünmenin büyük oranda martenzitik paslanmaz çelik ve kaynak metali bölümünde gerçekleştiği makro görüntülerde tespit edilmiştir. Östenitik paslanmaz çelik tarafı demir-klorür çözeltisinden martenzitik paslanmaz çelik ana malzeme tarafına kıyasla daha az etkilenmiştir. Korozyon testinde kaydedilen ortalama ağırlık kaybının daha çok martenzitik paslanmaz çeliğin bu çözeltiye dayanıksız olmasından kaynaklandığı kanısına varılmıştır. Makro görüntüler bu durumu teyit etmektedir. Korozyon dayanımı dikkate alındığında ER316 TIG ilave teli en başarılı sonucu vermiştir. Ancak korozyon test sonuçları bütün kaynak koşullarında birbirine yakın değerlerde çıkmıştır.

Korozyon testinde kullanılan klor esaslı çözelti martenzit fazının bu çözeltiye karşı dayanıksızlığı karşısında yoğun tepkimeye girmiş ve deneysel sonuçları etkilemiştir.

4. Kaynaklı numunelerin darbe testinde en yüksek darbe dayanımını ER2209 TIG ilave teli ile birleştirilen test kaynaklı numunesi göstermiştir. Bu duruma kaynak metalinin ve ilave telin yaklaşık yarı-yarıya östenit ve delta ferrit fazlarını içermesinin neden olduğu düşünülmektedir. Eş oranlı östenit delta-ferrit mikro-yapısı östenitin sünekliğe verdiği katkı ile darbe dayanımını artırması ve bunun yanında delta-ferritin yüksek krom içeriği neticesinde oluşturduğu krom yoğunluklu karbürü bileşiklerin mukavemeti artırmasıyla oluşan optimum darbe dayanımını açıklamaktadır. En

düşük darbe dayanımını ise ER312 ilave teli ile birleştirilen kaynaklı numune sergilemiştir. Bunun nedeni olarak; hem ilave telin hem de kaynak metalinin bu ilave telde en yüksek delta ferrit içeriğine sahip olması neticesinde kromun tercihen delta-ferrit içerisine karbürlü bileşikler oluşturarak çökelme isteğinin östenitin içerisine çökelme isteğinden fazla olması nedeniyle ortalama mukavemetin artarak darbe dayanımını düşürmesi görülmektedir.

5. Ana malzemelerin mikro-yapıları incelendiğinde 420 martenzitik paslanmaz çeliğin baskın olarak martenzitik yapıda olduğu 304L östenitik paslanmaz çeliğin ise baskın olarak östenitik faz içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir.
6. Kaynak işlemi sonrasında kaynaklı bağlantıların mikro-yapıları incelendiğinde bütün test numunelerinde 420 ana malzeme tarafına doğru kaynak metalinden ITAB'a geçişlerde kaynak metali dendritik dallantılı mikro-yapısının martenzit içeriğince zengin olduğu ve yine kaynak metalinden 304L ana malzeme geçişlerine doğru ise östenit içeriğince zengin olduğu tespit edilmiştir.
7. Darbe testleri ile sertlik tarama sonuçları birlikte incelendiğinde en yüksek darbe enerjisi değeri sergileyen ER2209 ilave TIG teli ile birleştirilen numune en düşük ITAB 420 tarafı sertlik sonucu sergilerken, ER312 ilave TIG teli ile birleştirilen numunenin en yüksek kaynak metali mikro sertlik değeri ile sonuçlandığı tespit edilmiştir.
8. 420 martenzitik paslanmaz çeliklerin 304L östenitik paslanmaz çelikler ile TIG kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi durumunda kaynak metali ve ısının tesiri altındaki bölgede yüksek sertlikten ziyade daha yüksek darbe dayanımının arandığı koşullarda ER2209 ilave TIG telinin kullanılmasının daha uygun bir seçim olacağı düşünülmektedir.
9. Bununla birlikte; martenzitik paslanmaz çeliklerin östenitik paslanmaz çeliklerle ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde ilave telin bileşiminin yanında, koruyucu gaz içeriğinin, kaynak parametrelerinin ve kontrollü soğuma hızı ile birlikte kaynak öncesi kaynak anı ve kaynak sonrası farklı ısıl işlem parametrelerinin kaynaklı bağlantının korozyon ve mekanik özelliklerine etkilerinin de araştırılmasının faydalı olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Oğuz, B., Karbonlu ve Alaşımlı Çeliklerin Kaynağı, Divit Yayınevi, İstanbul, 1987.
- [2] Kaluç, E., Tülbentçi, K., Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği, Seminer Notları, Kocaeli, 1998.
- [3] Sarıtaş Çelik, Paslanmaz Çeliklerin İç Yapı ve Türleri, Sarıtaş Çelik, İstanbul, ss 19-23, 2012.
- [4] Aran, A., Temel, M. A., “Paslanmaz çeliklerin kaynağı”, Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları, Sarıtaş Teknik Yayını, Acar Matbbacılık A.Ş., İstanbul, ss 58-65, 2004.
- [5] Davis, J. R., Selection of Wrought Martensitic Stainless Steel, ASM Metal Handbook, V.6, ss 432-441, 1993.
- [6] <https://www.aubertduval.com/fr/> (Erişim tarihi: 06.05.2018)
- [7] Kırık İ., Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilmiş AISI 1040/AISI 304L Çelik Çiftinin Elektrokimyasal Korozyon Davranışının Araştırılması. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2012.
- [8] Davis, J.R., Stainless Steels, ASM International, Ohio, 1994.
- [9] Brooks, J.A., Lippold, J.C., Selection Of Wrought Austenitic Stainless Steels, ASM Metal Handbooks, V.6, pp 456-469., 1993.
- [10] Yıldırım, M. M., Malzeme Bilgisi, F.Ü. Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Yayın No: 61., 1981.
- [11] Kaluç, E., Tülbentçi, K., Paslanmaz Çelikler Ve Kaynaklanabilirliği, Seminer Notu, KOÜ Kaynak Teknolojisi Araştırma Uygulama Ve Eğitim Merkezi, Kocaeli, s 244, 1995.
- [12] Kaluç, E., Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Gedik Kaynak Dünyası, İstanbul, 1990.
- [13] Erdoğan, M., Malzeme Bilim Ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt: 1, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, ss 326-331, 2002.
- [14] Aran, A., Paslanmaz Çelik Üretimi Kullanımı Standartları, 3. Baskı, Sarıtaş Teknik Yayınları, No: 1, İstanbul, 2003.
- [15] Lippold, J.C., Kotecki, D.J., Welding Metallurgy And Weldability Of Stainless Steels, A John Wiley Sons. Inc. Publication, ss 88-135, 2005.
- [16] <http://www.gozdempaslanmaz.com/paslanmaz-celik.asp?ha=1> (Erişim tarihi: 05.05.2018)

- [17] Türkyılmazoğlu, A., “Dubleks, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [18] Smith, W.F., Paslanmaz Çelikler, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Bölüm 5, Cilt 1, Çeviri: Erdoğan, M., Ankara, ss 169-214, 2000.
- [19] Odabaş, C., Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri, Askaynak, 2.Baskı Tavaslı Matbaası, İstanbul, 2004.
- [20] Abuç, S., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi İle Kaynağında Koruyucu Gazın Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [21] Kılıç, M., “AISI 304 Paslanmaz Çeliği ve 1040 Çelik Çifti’nin Plazma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [22] Pollard, B., “Selection Of Wrought Precipitation-Hardening Stainless Steels”, ASM Metals Handbook, V.6, ss 482-493, 1993.
- [23] Tülbentçi, K., “MIG/MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi”, Arctech Yayını, İstanbul, 1998.
- [24] Tülbentçi, K., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Böhler Kaynak Dünyası, ss 5-10, 1985.
- [25] Kaluç, E., “Östenitik Krom – Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Gedik Kaynak Dünyası, V. 2, ss 18–21, 1996.
- [26] Castner, H. R., “Material and Procedure Considerations For Welded Austenitic Stainless Steels”, 8th Annual North American Welding Research Conference, Edison Welding Institute, Columbus, Ohio, pp 1–6, 1992.
- [27] Askaynak, Çelikler İçin Elektrod Seçimi, Gazaltı Kaynağı, Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, İstanbul, 2006.
- [28] Yıldırım, M.M., Doğantan, Z.S., Çakan, A., Pakdil, M., Mühendislik Malzemeleri III., Mkü Yayınları, Isbn 975-7989-16-9, İskenderun, ss 1-56, 2001.
- [29] Li, Z. and. Fontana, G., Autogenous Laser Welding Of Stainless Steel To Free-Cutting Steel For The Manufacture Of Hydraulic Valves, Journal Of Materials Processing Technology, V. 74, pp 174–182, 1996.
- [30] Streicher, M.A., Pitting Corrosion Of 18cr-8ni Stainless Steel, J. Electrochem. Soc. V.103, Issue 7, pp 375-390, 1956.

- [31] Aydoğdu G.H. Ve Aydınol M.K., AISI 316l Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Tanelerarası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi, 12. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2005.
- [32] Nilsson K., Corrosion Tests of Stainless Steels in Automotive Applications, Doktora Tezi, Lulea University of Technology, İsveç, 2006.
- [33] Leffler B., Stainless Steels And Their Properties, Avesta Sheffield AB Research Foundation, Finlandiya, 1998.
- [34] Torkar M., Mandrino M., Lamut M., an AES Investigation of Brushed AISI Stainless Steel After Corrosion Testing, Materials And Technology, V. 42, pp 39-44, 2008.
- [35] Önal G., Ünüvar A., Şimşek T., 5083 Al-Mg Alaşımında Mekanik Özellikler Üzerine Korozyon Etkisinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi Müh-Mim Fak. Dergisi, V. 20, ss 191-196, 2005.
- [36] Correia, M., Nóvoa X.R. ve Salta, M., Smart and Green Structural And Repair Materials: Structural And Repair Materials Technical Report, Stainless Steel Rebars, Duratinet, 2008.
- [37] Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B., “Bakır Ve Çelik Levhaların Örtülü Elektrod Ve TIG Kaynak Yöntemleri İle Birleştirilmesi Ve Arayüzey Özelliklerinin İncelenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., V. 20 (2): ss 183-190, 2005.
- [38] Althouse A. D., Turnquist C. H., Bowditch W. A., Bowditch K. E., “Gas Tungsten Arc Welding”, Modern Welding, Goodheart-Willcox Pub., pp 327-328 1992.
- [39] Doruk, İ., “Gıda Sanayinde Kullanılan Paslanmaz Çelikler ve Bu Çeliklere Uygulanan Kaynak Yöntemleri”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, ss 71-74, 2005.
- [40] Kahraman, N., Durgutlu, A., Gülenç, B., “316L Paslanmaz Çeliğin TIG Kaynağında Koruyucu Argon Gazına Hidrojen İlavesinin Kaynak Bölgesi Tane Morfolojisine Etkilerinin Araştırılması”, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, V 7(3): ss 223-228, 2004.
- [41] Kahraman, N., “Modern Kaynak Teknolojisi Ders Notları”, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Karabük, ss 1-10, 2009.
- [42] Grant, K.,H., “Gas-Tungsten arc welding”, ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering, London, V 6, pp 590-602, 1998.
- [43] Department of the Army, Welding Design, Procedures and Inspection, Technical Manuel No:5-805-7, Washington DC. 1985.

- [44] Henry O.H. and Claussen G.E., Welding Metallurgy/Iron and Steel, pp 445-447. 1953.
- [45] Brooks, J.A., Lippold, J.C., Selection Of Wrought Austenitic Stainless Steels, ASM Metal Handbooks, V. 9.

