

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 316 SERİSİ OSTENİTİK PASLANMAZ
ÇELİKLERDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN
NUFUZİYETE ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Turgay TEHÇİ

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ramazan YILMAZ

Eylül 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

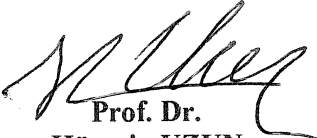
**AISI 316 SERİSİ OSTENİTİK PASLANMAZ
ÇELİKLERDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN
NUFUZİYETE ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**


YÜKSEK LİSANS TEZİ

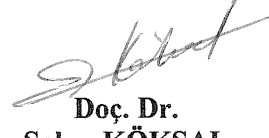
Turgay TEHÇİ

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 13/09/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


**Prof. Dr.
Hüseyin UZUN
Jüri Başkanı**


**Doç. Dr.
Ramazan YILMAZ
Üye**


**Doç. Dr.
Sakıp KÖKSAL
Üye**

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren çok değerli hocam Doç. Dr. Ramazan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Bu çalışma 2010-50-01-004 nolu, BAPK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda destekleri için Sakarya üniversitesi rektörlüğüne, BAPK yetkililerine ve elemanlarına teşekkürü borç bilirim.

Yorulma cihazının tasarımında tecrübelerini ve bilgilerini esirgemeyip, gerekli zamanı ayıran kıymetli hocalarım Doç. Dr. Aydın ŞİK'a ve Yük. Tek. Öğrt. Levent TANRIÖVER'e, cihazın bazı ünitelerindeki görüş ve desteklerinden dolayı değerli arkadaşlarım, Elektronik Haberleşme Müh. Doğan YAMAÇ, Mak. Müh. Abdulrahman SARIBUĞA, Mak. Müh. Selahattin NACAR, Mak. Müh. İsa ÇALLI, ve Murat KORKMAZ' a, yorulma cihazının imalatı esnasında fabrika imkânlarını açan, bilgi ve tecrübelerini paylaşan AKSAN MAKİNA SANAYİ ve TİCARET LTD. ŞTİ. sahipleri Yusuf ve Mehmet AKSARI'ya, imalat müdürü Cihangir YAZAR ve şirket çalışanı Fahri GÜLER'e, cihazının imalatında yardımlarından dolayı As Borverk Makine sahibi Levend ÇAYLI'ya teşekkür ediyorum. Bu çalışmadaki otomatik TIG kaynak makinesinin kullanılmasındaki yardımlarından dolayı KROMEL A.Ş. yetkililerine özellikle, Mak. Müh. Ayhan ŞEKER ve makine operatörü Cengiz GENÇ'e, deneysel çalışmalar esnasında sertlik deneyleri için değerli hocam Prof. Dr. Uğur ŞEN ve Araş. Gör. Dr. Ediz ERCENK'e, SEM çalışmaları için uzman Fuat KAYIŞ'a ve MURAT KAZANCIYI'ya, optik mikroskopta kullanılan Clemex programı için Doç. Dr. Ramazan KAYIKÇI'ya ve mikroyapı çalışmalarında yardımları için Araş.Gör.Murat ÇOLAK'a, çalışmalarım esnasında desteklerini gördüğüm, Yrd. Doç. Dr. Zafer TATLI, Yrd. Doç. Dr. Fatih ÇALIŞKAN, Öğr. Gör. Mustafa TÜRKMEN, Araş.Gör. Nuri ERGİN'e, değerli dostlarım Yük. Tek. Öğrt. Yiğit GARİP ile Osman YÜMNÜ'ye ve burada ismini saymadığım üzerimde emekleri olan bölüm hocalarıma saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

Son olarak fakat öncelikle belirtmem gerektiğine inandığım; benim yetişmemde her türlü fedakârlıktan kaçınmayan bugüne kadar emek, destek ve sevgilerini esirgemeyen kıymetli anneme, babama ve kardeşlerime tüm kalbi teşekkürlerimi, saygılarımı ve sevgilerimi sunuyorum, bu tezi onlara ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	6
2.1. Paslanmaz Çelikler.....	6
2.2. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri.....	8
2.3. Paslanmaz Çelikler İçerisindeki Alaşım Elementleri ve Etkileri....	9
2.4. Paslanmaz Çeliklerde Faz Diyagramları.....	10
2.5. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	11
2.6. Ostenitik Paslanmaz Çelikler.....	12
BÖLÜM 3.	
PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI ve KAYNAK PARAMETRELERİ.....	16
3.1. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	16
3.2. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Karşılaşılan Problemler.....	17
3.2.1. Krom karbür oluşumu	17

3.2.2. Sıcak çatlak oluşumu.....	21
3.2.3. Sigma fazı oluşumu.....	24
3.3. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kullanılan Kaynak Teknikleri..	27
3.4. TIG kaynağı.....	28
3.4.1. TIG kaynak donanımı.....	31
3.4.2. TIG kaynağında kullanılan kaynak elektrotları.....	32
3.4.3. TIG kaynağında kullanılan ilave kaynak metalleri.....	33
3.4.4. TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazlar.....	33
3.5. Kaynak Parametreleri.....	35
3.5.1. TIG kaynak yönteminde erimeyen elektrot.....	36
3.5.2. Birinci derecede ayarlanabilir parametreler.....	37
3.5.3. İkinci dereceden ayarlanabilir parametreler.....	38
3.6. Kaynak İşleminde Enerji ve Isı.....	38
3.6.1. Kaynak esnasında oluşan ısıl çevrimler.....	39

BÖLÜM 4.

PASLANMAZ ÇELİKLERİN MİKROYAPILARI, FİZİKSEL VE

MEKANİK ÖZELLİKLERİ	44
4.1. Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapıları.....	44
4.2. Paslanmaz Çeliklerin Isıl Özellikleri.....	45
4.3. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	46
4.4. Metallerde Yorulma.....	47
4.4.1. Tanıtım tarihçesi ve ilgili terimler.....	47
4.4.2. Yorulma analizi.....	51
4.4.3. Yorulma mekanizmaları.....	52
4.4.4. Yorulma dayanımının belirlenmesi.....	56
4.4.5. Yorulma test numuneleri.....	58
4.4.6. Yorulmaya etki eden faktörler.....	59
4.4.7. Yorulmaya gerilmelerin etkisi.....	61
4.4.8. Yorulmada malzemeye ait faktörler.....	61
4.4.9. Yorulma çatlaklarının oluşumu ve yorulma deney malzemelerinin kırılma yüzey alanları.....	63

4.4.10. Kaynaklı birleştirmelerde yorulma.....	67
4.4.11. Yorulma Deney Cihazları.....	74
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIşMALAR.....	75
5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler, Kaynak Yöntemi ve Çalışma Programı.....	75
5.2. Mikroyapı İncelemeleri.....	78
5.2.1. Stero mikroskop incelemeleri.....	78
5.2.2. Optik mikroskop incelemeleri.....	79
5.2.3. Tarama elektron mikroskobu (SEM) ve element analizleri....	79
5.3. Mekanik Deneyler.....	79
5.3.1. Çekme deneyi.....	79
5.3.2. Vickers sertlik deneyi.....	80
5.3.3. Çentik darbe deneyi.....	80
5.3.4. Yorulma deneyi.....	81
5.3.4.1. Yorulma cihazının imalatı.....	81
5.3.4.2. Yorulma deneyleri.....	83
BÖLÜM 6.	
DENEY SONUÇLARI ve TARTIşMA	85
6.1. İlave Metal Kullanılmadan Yapılan Kaynakta Nufuziyet İncelemeleri.....	85
6.1.1. Kaynak amperinin nufuziyete etkisi.....	85
6.2. İlave Metal Kullanılarak Yapılan Kaynakta Nufuziyet İncelemeleri.....	92
6.2.1. Kaynak amperinin nufuziyete etkisi.....	92
6.2.2. Kaynak hızının nufuziyete etkisi	101
6.3. Birleştirilen Paslanmaz Çelik Malzemelerin Mikroyapı İncelemeleri.....	108
6.3.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler	108
6.3.2. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler	114
6.4. Sertlik Ölçümleri.....	118

6.4.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler.....	118
6.4.2. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler.....	120
6.5. Çekme Deneyleri.....	122
6.5.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler.....	123
6.5.2. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler.....	132
6.6. Çentik Darbe Deneyleri.....	140
6.6.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler.....	140
6.6.2. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler.....	143
6.7. Yorulma Deneyleri.....	147
6.7.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler.....	149
6.7.2. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler.....	156
BÖLÜM 7.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	164
7.1. Sonuçlar.....	164
7.2. Öneriler.....	167
KAYNAKLAR.....	168
ÖZGEÇMİŞ.....	178

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AISI	: Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	: American Society for Testing and Materials
AWS	: Amerikan Kaynak Derneği
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
E	: Elastiklik modülü
EDS	: Enerji dağılımı spekrometresi
EN	: Avrupa Normu
H	: Dikiş yüksekliği
HMK	: Hacim merkezli kübik
K_f	: Yorulma dayanımı azaltma faktörü
MIG	: Eriyen elektrot ile gaz altı kaynağı
MPa	: Megapaskal
P	: Nüfuziyet
R	: Gerilme oranı
S	: Gerilme genliği
SEM	: Tarama elektron mikroskobu
S-N	: Gerilme-çevrim sayısı
TIG	: Erimeyen elektrot ile gaz altı kaynağı (Tungsten Inert Gaz)
YMK	: Yüzey merkezli kübik
W	: Kaynak genişliği
σ_{max}	: Maksimum gerilme
σ_{min}	: Minimum gerilme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Fe-Cr alaşımlarında Cr miktarının korozyon direncine etkisi.....	7
Şekil 2.2.	Paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan koruyucu krom oksit tabakası.....	8
Şekil 2.3.	Demir krom faz diyagramı.....	10
Şekil 2.4.	Schaeffler ve Delong diyagramları	11
Şekil 2.5.	Nikel ve krom miktarlarına göre farklı paslanmaz çelik türlerinin gösterilmesi.....	12
Şekil 2.6.	Ostenitik çelikte ve ilave edilen elementler	13
Şekil 3.1.	Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi (X 1200).....	19
Şekil 3.2.	Krom karbür çökmesi sonucu hassas bölgede oluşan korozyon.....	19
Şekil 3.3.	Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerde tane sınırlarında krom karbür çökmesine bağlı olarak krom azalması (şematik)..	19
Şekil 3.4.	Schaeffler Diyagramı.....	23
Şekil 3.5.	Katılma faz sınırlarını da içeren WCR - 1992 diyagramı.....	24
Şekil 3.6.	Paslanmaz çeliklerde sıcaklık ve zamana bağlı sigma fazı oluşumu a)780°C'da 100 saat ısıl işlem uygulama sonrası x1600 içyapı incelemesi b)78°C'da 500 saat ısıl işlem uygulama sonrası x1600 içyapı incelemesi.....	26
Şekil 3.7.	TIG Kaynağının prensip şeması.....	29
Şekil 3.8.	TIG Kaynağının donanım şeması.....	32
Şekil 3.9.	a) Kaynak bölgesindeki ısınma eğrisi b) ITAB bölgesindeki ısı yayılımı.....	41
Şekil 4.1.	Bazı paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri.....	44

Şekil 4.2.	a) ostenitik b) ferritik c) dubleks d) martenzitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri.....	44
Şekil 4.3.	a) 20-100°C'de çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin ısı iletim kabiliyetleri b) 20°C'da çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin özgül elektrik iletme direnci....	46
Şekil 4.4.	Yorulma parametreleri ve gerilme tipleri.....	49
Şekil 4.5.	Çatlak oluşumunun şematik olarak gösterimi.....	54
Şekil 4.6.	Bir extrusion (çekme) ve bir intrusion (basma) meydana getiren kayma hareketi.....	54
Şekil 4.7.	Çatlak gelişim safhalarının şematik gösterimi.....	55
Şekil 4.8.	İkinci safhada çatlak gelişiminin şematik gösterimi.....	56
Şekil 4.9.	Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik Wöhler eğrileri.....	57
Şekil 4.10.	ASTM E-466'ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri.....	59
Şekil 4.11.	Yorulmayı etkileyen faktörler.....	59
Şekil 4.12.	Yorulma yüzeyindeki bölgeler.....	63
Şekil 4.13.	a...f Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğilme zorlanmalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri; Y: Yorulma çatlacağı, S : Son kırılma yüzeyi.....	64
Şekil 4.14.	a-f Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları.....	65
Şekil 4.15.	Yorulma kırılma yüzeyinin (a) Stereo mikroskop ve (b) Taramalı electron mikroskop görüntüsü.....	66
Şekil 4.16.	Yorulma izlerinin oluşumunun şematik gösterimi.....	66
Şekil 4.17.	Yumuşak ve yüksek mukavemetli iki malzemede oluşan yorulma izleri a)yumuşak alüminyum 1100 alaşımı b) yüksek çekme mukavemetli bir çelik yüzeyi.....	67
Şekil 4.18.	Yorulma kırılmasına ait örnekler: a) aşırı yükleme, b) kötü tasarım, c) tali takviye veya fittings, d) yorulma kırılmasına ait diğer örnekler.....	68
Şekil 4.19.	Çalışma koşullarında yorulma kırılmasına ait örnekler: a) titreşim, b) korozyif çevre.....	68
Şekil 4.20.	Kaynak eşik açısının yorulma dayanımına etkisi.....	70

Şekil 4.21.	British kaynak standartlarına göre değişik kaynak tiplerine göre yorulma direnci.....	71
Şekil 4.22.	Munse'nin hazırladığı detaylı kaynak katalogunda farklı yüklenme durumlarına göre muhtemel çatlak oluşum noktaları...	73
Şekil 5.1.	Deneysel çalışmaların akış diyagramı.....	76
Şekil 5.2.	Otomatik TIG kaynak makinesinin şematik görünümü.....	77
Şekil 5.3.	Kaynaklı birleştirmelerden deney numunelerinin çıkarılması işlemlerinin şematik gösterimi.....	78
Şekil 5.4.	Çekme deneyinde kullanılan numunenin ölçüleri.....	80
Şekil 5.5.	Deney numunelerine uygulanan sertlik deneyinin dağılımının şematik görünümü, a) yatay sertlik dağılımı, b) düşey sertlik dağılımı.....	80
Şekil 5.6.	Çentik darbe deneyi için hazırlanan deney numunesinin ölçülerinin şematik gösterimi.....	81
Şekil 5.7.	Yorulma cihazının görüntüsü.....	81
Şekil 5.8.	İmalatı yapılan yorulma cihazının şematik görünümü.....	82
Şekil 5.9.	İmalatı yapılan yorulma cihazında kurs ayar konsolunun hareket yönü ve güç ölçerin yük algılama mekanizmasının şematik gösterimi.....	83
Şekil 5.10.	Yorulma deney numunesi.....	84
Şekil 5.11.	Eğmeli yorulma düzeneğinin şematik gösterilişi.....	84
Şekil 6.1.	Kaynakta dikiş geometrisinin şematik olarak gösterimi P: Nufuziyet, W: Kaynak genişliği, H: Dikiş yüksekliği.....	85
Şekil 6.2.	Kaynakta dikiş geometrisinden stereo mikroskop kullanılarak nufuziyet ile ilgili ölçümlerin alınması.....	86
Şekil 6.3.	Farklı kaynak akımı değerlerinde ilave metal kullanmadan kaynatılan a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo görüntüleri	87
Şekil 6.4.	4.2 mms ⁻¹ kaynak hızı kullanılarak farklı kaynak akımı değerlerinde darbeli akımda ve ilave metal kullanmadan kaynatılan a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo görüntüleri.....	87

Şekil 6.5.	Farklı akım ve türlerinin nufuziyete etkisi P: Darbeli akım.....	89
Şekil 6.6.	İlave metal kullanmadan a) normal akım b) darbeli akım ile kaynatılan parçalarda kaynak dikiş derinliği/dikiş genişliği (P/W) oranının kaynak amper değerlerine göre değişimi.....	90
Şekil 6.7.	Farklı parametrelerde ilave metal kullanmadan kaynak çekilen a) AISI 316 b) AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin kesitlerinden alınan mikrosertlik değerleri.....	91
Şekil 6.8.	Farklı kaynak amper değerlerinde ve ilave metali kullanılmadan kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri.....	92
Şekil 6.9.	4.2 mms ⁻¹ kaynak hızında farklı kaynak akım değerlerinde ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo mikroskop görüntüleri	93
Şekil 6.10.	5.2 mms ⁻¹ kaynak hızında farklı kaynak akım değerlerinde ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo mikroskop görüntüleri	93
Şekil 6.11.	İlave metal kullanılarak a) 4.2 mms ⁻¹ b) 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızlarda farklı akım türü ve değerleri ile kaynatılan malzemede nufuziyet değerlerinin değişimi.....	95
Şekil 6.12.	İlave metal kullanılarak a) 4.2 mms ⁻¹ hız ve normal akım b) 5.2 mms ⁻¹ hız ve normal akım c) 4.2 mms ⁻¹ hız ve darbeli akımda kaynatılan malzemede kaynak dikiş derinliği/dikiş genişliği (P/W) oranının kaynak amper değerlerine göre değişimi.....	98
Şekil 6.13.	Farklı parametrelerde ilave metal kullanılarak kaynak edilen a) AISI 316 b) AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler üzerinden alınan mikrosertlik değerleri.....	100
Şekil 6.14.	Farklı kaynak akım değerlerinde ilave metali kullanılarak kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metallerinin optik mikroskop görüntüleri	101

Şekil 6.15.	160 amperde ve farklı kaynak hızlarında ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik parçaların stereo mikroskop görüntüleri.....	102
Şekil 6.16.	160 amperde darbeleri akım ile farklı kaynak hızlarında ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik parçaların stereo mikroskop görüntüleri	102
Şekil 6.17.	İlave metal kullanılarak normal ve darbeleri akımda kaynak edilen parçalarda nufiziyet değerlerinin kaynak hızına göre değişimi. P: Darbeleri akım.....	103
Şekil 6.18.	160 amper ve farklı hızlarında kaynak edilen malzemede a) normal b) darbeleri akım için kaynak dikiş derinliği/dikiş genişliği oranının kaynak hızına göre değişimi.....	105
Şekil 6.19.	Farklı hızlarda ve akımlarda ilave metal kullanılarak kaynak edilen a) AISI 316 b) AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler üzerinden alınan mikrosertlik değerleri.....	106
Şekil 6.20.	Farklı kaynak hızlarında ilave metali kullanılarak kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri.....	107
Şekil 6.21.	190 amper değerinde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri	110
Şekil 6.22.	190 amper değerinde ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri	111
Şekil 6.23.	150 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeleri akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri.....	111
Şekil 6.24.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeleri akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri.....	112

Şekil 6.25.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin farklı noktalarından alınan EDS analizi sonuçları.....	113
Şekil 6.26.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin SEM mikroyapısı üzerinde belirtilen çizgi boyunca elementlerin lineer analiz diyagramı.....	113
Şekil 6.27.	190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri.....	115
Şekil 6.28.	190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri.....	115
Şekil 6.29.	150 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri.....	116
Şekil 6.30.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri.....	116
Şekil 6.31.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliğin farklı noktalarından alınan EDS analizleri.....	117
Şekil 6.32.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliğin SEM mikroyapısı üzerinde belirtilen çizgi boyunca elementlerin lineer analiz diyagramı.....	117
Şekil 6.33.	Otomatik TIG kaynak cihazı ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin sertlik dağılımına etkisi.....	119
Şekil 6.34.	AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerde farklı kaynak akımı değerinde ve hızlarında elde edilen dikişin yüzeyinden aşağıya doğru elde edilen mikrosertlik değerleri.....	119

Şekil 6.35.	Otomatik TIG kaynak cihazı ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin sertlik dağılımına etkisi.....	121
Şekil 6.36.	AISI 316Ti östenitik paslanmaz çeliklerde farklı kaynak amperi ve hızlarında elde edilen dikişin yüzeyinden aşağıya doğru elde edilen mikrosertlik değerleri.....	121
Şekil 6.37.	Çekme numunesine deney esnasında 436 MPa yük uygulanması halinde bu yükün numune yüzeyinde dağılım yoğunluğunun gösterimi.....	122
Şekil 6.38.	AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametrelerin a) çekme dayanımına b) % uzama değerlerine etkisi.....	125
Şekil 6.39.	190 amper kaynak akımı ve a) 3.8 mms ⁻¹ b) 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin stereo mikroskop görüntüleri.....	126
Şekil 6.40.	150 amper kaynak akımı, 3.8 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kaynak hatasının a) 12x b) 30x büyültmelerde stereo mikroskop görüntüleri.....	126
Şekil 6.41.	150 amper kaynak akımı, 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kaynak hatasının a) 12x b) 40x büyültmelerde stereo mikroskop görüntüleri.....	126
Şekil 6.42.	150 amper kaynak akımı, a) 3.8 mms ⁻¹ ve b) 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kaynak hatalarının optik mikroskop görüntüleri.....	128
Şekil 6.43.	Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneylerinde elde edilen gerilme uzama eğrilerin tümünün birlikte gösterimi.....	129
Şekil 6.44.	Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen AISI 316 östenitik paslanmaz çelik malzemelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri.....	129

Şekil 6.45.	190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.....	130
Şekil 6.46.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası elde edilen a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri	131
Şekil 6.47.	AISI 316Ti ostenitik paslanmaz birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerin a) çekme dayanımına b) % uzama değerlerine etkisi.....	133
Şekil 6.48.	a) 190 amper kaynak akımı, 3.8 mms ⁻¹ b) 150 amper, darbeli kaynak akımı ve 3.8 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin stereo mikroskop görüntüsü.....	134
Şekil 6.49.	150 amper kaynak akımı, 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan birleşme bölgelerinin a) 12x b) 40x büyültmelerde stereo mikroskop görüntüleri.....	135
Şekil 6.50.	150 amper kaynak akımı, 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan hatalarının optik mikroskop görüntüleri.....	135
Şekil 6.51.	Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneylerinde elde edilen gerilme uzama eğrilerin tümünün birlikte gösterimi.....	136
Şekil 6.52.	Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri.....	136
Şekil 6.53.	150 amper değerinde darbeli kaynak akımı ve 3.8 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası elde edilen a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.....	138

Şekil 6.54.	190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.....	139
Şekil 6.55.	Çentik darbe uygulanan numunelerin görüntüleri.....	140
Şekil 6.56.	AISI 316 ostenitik paslanmaz birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerin çentik darbe tokluğuna etkisi.....	141
Şekil 6.57.	190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası SEM kırılma yüzeyi görüntüsü.....	142
Şekil 6.58.	150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.....	143
Şekil 6.59.	AISI 316Ti ostenitik paslanmaz birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerin çentik darbe tokluğuna etkisi.....	144
Şekil 6.60.	190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası a) 100x b) 1000x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.....	145
Şekil 6.61.	150 amperde darbeli kaynak akımı ve 5.2 mms ⁻¹ kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri.....	146
Şekil 6.62.	Yorulma deney numunesine 450 MPa yük uygulanması halinde bu yükün numune yüzeyinde şematik dağılımı.....	148
Şekil 6.63.	Farklı kaynak kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin yorulma deneyi sonrası görüntüleri.....	149
Şekil 6.64.	Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait S/N diyagramları.....	150

Şekil 6.65.	425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü.....	151
Şekil 6.66.	190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 25 b) 600 c) 2000 d) 3500 e) 5000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri.....	152
Şekil 6.67.	425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin farklı noktalarından alınan EDS analizleri.....	154
Şekil 6.68.	190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 375 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 600 b) 1000 c) 2000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri.....	155
Şekil 6.69.	Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin yorulma deneyi sonrası görüntüleri.....	156
Şekil 6.70.	Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait S/N diyagramları.....	157
Şekil 6.71.	425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü.....	157
Şekil 6.72.	190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 27 b) 350 c) 1500 d)2000 e) 4500 büyültmelerdeki SEM görüntüleri.....	158
Şekil 6.73.	425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin farklı noktalarından alınan EDS analizleri.....	160

Şekil 6.74. 190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin 375 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 22 b) 1000 c) 2000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri..... 161

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Ferrit, ostenit oluşturucu elementler ile nötr elementler ve etkileri.....	9
Tablo 2.2.	Ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve kullanım alanları.....	14
Tablo 3.1.	Karbon içeriğinin ve kritik sıcaklığının kuluçka oluşumuna etkisi.....	19
Tablo 3.2.	Bazı Paslanmaz çeliklere ait TIG ilave tellerin kimyasal bileşenleri	33
Tablo 3.3.	Gazaltı kaynaklarında kullanılan gazların kimyasal ve fiziksel özellikleri	34
Tablo 4.1.	Paslanmaz elik gruplarına ait fiziksel özellikler.....	45
Tablo 4.2.	Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.....	47
Tablo 4.3.	Munse'nin detaylı kaynak katalogundan değişik yapılarda yüklemeye göre olası çatlak başlangıç noktaları.....	72
Tablo 5.1.	Çalışmada kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin ve ilave metalin kimyasal bileşimi.....	75
Tablo 5.2.	Otomatik TIG kaynak makinesinden kaynak esnasında darbeli akımda elde edilen maksimum ve minimum amper değerleri.....	76
Tablo 6.1.	Telsiz olarak yapılan kaynakta kullanılan kaynak parametreler ve elde edilen nufuziyet ile ilgili ölçümler.....	88
Tablo 6.2.	Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri ve elde edilen nufuziyet derinlikleri.....	94
Tablo 6.3.	Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri ve elde edilen nufuziyet derinlikleri.....	103

Tablo 6.4.	İlave metal kullanılarak yapılan birleştirmelerde çeşitli diyagramlar kullanılarak elde edilen Creş, Nieş ve ferrit değerleri	110
Tablo 6.5.	Farklı kaynak parametreleri kullanılarak otomatik TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklere uygulanan çekme deneyi ile elde edilen değerler.....	125
Tablo 6.6.	AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklere uygulanan çentik darbe tokluk deneyinde elde edilen tokluk değerleri.....	141
Tablo 6.7.	Farklı kaynak hızları kullanılarak birleştirilen AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklerin yorulma deneyi sonuçları.....	148

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kaynak Parametreleri, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Nufuziyet, Ostenitik Paslanmaz Çelikler, TIG, Yorulma

Bu çalışmada, kaynak akımı değeri, akım türü ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerin kaynak nufuziyetine, mekanik özelliklere ve mikroyapıya olan etkileri araştırılmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, AISI 316 ve AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin üzerine otomatik TIG (Tungsten Inert Gaz) kaynak cihazı ile telli ve telsiz olarak düz dikişler çekilmiş, kaynak parametrelerin kaynaklı malzemenin nufuziyetine, sertlik dağılımına ve mikroyapısına etkileri araştırılmıştır. İkinci aşamada ise, farklı kaynak parametrelerinde TIG kaynak yöntemi ile ER 316LSi ilave metal kullanılarak yatay pozisyonda birleştirilen AISI 316 ve AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerde, kaynak parametrelerinin sertlik dağılımı, çekme dayanımı, çentik darbe tokluğu ve yorulma davranışları gibi mekanik özellikler ile mikroyapıya etkileri araştırılmıştır. Yorulma deneylerinin yapılabilmesi amacıyla eğme yorulma cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Nufuziyet ve mikroyapı incelemelerinde stereo mikroskop, optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM çalışmalarında mekanik deneylerde oluşan kırılma yüzey morfolojileri incelenmiştir. Seçilen bazı numunelere noktasal ve çizgisel enerji dağılımı spektrometre (EDS) analizleri uygulanmıştır.

DeneySEL çalışmalarda hem kaynak parametrelerinin hem de paslanmaz çelik malzemelerin kimyasal kompozisyonlarının nufuziyet değerlerini etkilediği, Titanyum içeren ostenitik paslanmaz çeliklerde daha derin nufuziyetlerin elde edildiği, nufuziyet derinliğinin akım değerlerindeki artışa bağlı olarak arttığı, darbeli akım türünün normal akıma göre nufuziyet derinliğine olumsuz etkilediği görülmektedir. Ayrıca, kaynak parametreleri sertlik değerlerini, kaynak metalinin mikroyapısını da etkilemektedir. TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak parametrelerinin mikroyapıya, sertlik dağılımına, çekme dayanımına, çentik darbe tokluğuna ve yorulma davranışlarına etki ettiği görülmüştür. TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen farklı türlerdeki ostenitik paslanmaz çelikler farklı mekanik davranışlar gösterdiklerinden, kaynak parametrelerinin seçiminde paslanmaz çeliklerin kompozisyonları dikkate alınmalıdır. Çünkü, sadece uygun kaynak parametreleri seçilerek birleştirilen paslanmaz çelikler optimum mekanik özellikler elde edilebilmektedir.

THE EFFECTS OF WELDING PARAMETERS ON PENETRATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF 316 SERIES AUSTENITIC STAINLESS STEELS

SUMMARY

Key Words: Welding Parameters, Mechanical properties, Penetration, Austenitic stainless steel, GTAW, Fatigue

In this study, the effects of the welding parameters such as welding current, types of currents and welding speeds on penetrations, mechanical properties and microstructures of AISI 316 and AISI 316Ti types of austenitic stainless steels by automatic Gas tungsten arc welding (GTAW) methods were investigated. The study has been carried out in two stages. In the first stage, welding has been performed on the surface of the austenitic stainless steels by GTAW with and without using filler materials and then the effects of those parameters on penetrations and microhardness and microstructures were examined. In the second stage, the effect of welding parameters on microhardness, tensile strength, Charpy v notch impact test, fatigue behaviours and microstructures of the two types of austenitic stainless steels by automatic GTAW method at but joined and flat position using ER 316LSi filler materials. Bending test machine were also designed and manufactured to do fatigue tests. Stereo and optical microscopes were used for measuring penetration depths and basic microstructural examinations. Scanning electron microscope (SEM) studies were carried out for examination of fracture surface morphologies of some of samples exposed mechanical tests. Point and linear elemental energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis were applied on some of selected samples.

The experimental results showed that both welding parameters and chemical compositions of the stainless steels had influences on penetrations. Deeper penetrations were observed in the austenitic stainless steels contained titanium. Depth of penetration increased depending on increasing of welding current. Pulsed current had negative affection on penetration compared with normal current. Besides, welding parameters also affected on microstructure, microhardness, tensile strength, toughness and fatigue behaviours of the weldments. Due to fact that two types of austenitic stainless steels show different mechanical behaviours, the composition of the stainless steels should be taken into account during selection of the welding parameters. Better mechanical properties of the weldments can be obtained with only selection of optimum parameters during welding process.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ostenitik paslanmaz çelikler sahip oldukları üstün mekanik özellikleri ile korozyon direncinden dolayı günümüz endüstrisinin vazgeçilemez malzemelerinden biridir. 540°C'ye kadar oksidasyona karşı dayanım gösterdiklerinden gıda endüstrisi, depolama tankları, basınç tankları, mutfak araç gereçleri, makine parçaları ve demiryolu taşıtları gibi birçok ürünün imalatında kullanılmakta ve bu tür malzemelere olan ihtiyaç her gün biraz daha artmaktadır [1-3].

Günümüzde paslanmaz çelikler gazaltı kaynak yöntemleri ile başarılı bir şekilde birleştirilebilmektedir. Özellikle ince parçaların kaynağında TIG (Tungsten Inert Gaz) kaynak yöntemi tercih edilmekte ve paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan kaliteli bir kaynak yöntemidir [4-8]. TIG kaynağı; kaynak için gerekli ısı enerjisi bir tungsten elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan ark tarafından sağlanan ve kaynak bölgesi de elektrodu çevreleyen bir nozuldan gönderilen asal gaz tarafından korunan kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde yüksek kalitede düzgün yüzeyli ve kusursuz kaynak dikişleri elde edilebilir. TIG kaynak yöntemi paslanmaz çelik malzemelerin kaynağında mükemmel kaynak dikişleri verir. TIG kaynak işleminde elektrik arkı tungsten elektrot ile birleştirilecek ana metal arasında oluşmaktadır. Ark bölgesi inert gaz ya da inert gaz içerisine az miktarlarda bazı gazların ilavesi ile oluşturulan karışım gazları ile korunmaktadır. Tungsten elektrot yeterince yüksek sıcaklıklara çıkarak ark işleminin devamı için gerekli elektron emisyonunu sağlamaktadır. TIG kaynak işlemimin diğer birleştirme işlemlerine göre pek çok avantajlarının yanında bazı dezavantajlara sahiptir. Özellikle tek pasolu kaynak işleminde oldukça nüfuziyet kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle kalın kesitli parçaların birleştirilmesinde uygun bir yöntem olmamakla beraber, ana metalin kimyasal birleşimine bağlı olarak kaynak dikiş hassasiyeti değişmektedir. Kaynak hızının yavaş olması nedeniyle düşük verimliliğe sahiptir [8]

Kaynak parametreleri kaynak işlemini ve elde edilen kaynak kalitesini belirleyen en önemli faktörlerdendir. Kaynak parametreleri, kaynak edilen metal ve alaşım ile kaynak metalinin türü ve kaynak ağız geometrisi göz önünde bulundurularak saptanmaktadır. Bu parametrelerin seçimi kaynakçının çalışma koşullarını kolaylaştırdığı gibi gereken özelliklere sahip kaynak bağlantılarının elde edilmesini sağlamaktadır [9].

TIG kaynak işleminde kaynak kalitesi uygun kaynak parametreleri ile belirlenmektedir. Kaynak işleminde uygulanan parametreler kaynak banyosunun geometrisi ile kaynak metalinin sahip olduğu mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. TIG kaynak işleminde kullanılan bazı değişkenler kaynak banyo geometrisini önemli şekilde etkilemektedir. Bunlar: kaynak akımı, kaynak gerilimi, kaynak hızı, koruyucu gaz cinsi ve akış miktarı, ark uzunluğu, kaynak kutbu, ana metalin üretim şartları ve birleştirme dizayn şeklidir. Kaynak akımı en önemli değişkenlerden biri olup, kaynak akımındaki değişim nufuziyet derinliği, kaynak hızı, ısı girdisi, metal yığılma oranı ve kaynak kalitesini etkilemektedir. Darbeli ark kullanılması ile nufuziyet miktarı maksimum iken kaynak edilen bölüme ısı uygulanması minimum olmaktadır [3]. Daha önceden gerçekleştirilen çalışmalarda farklı kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilen birleştirmelerde kaynak esnasında kullanılan parametrelerin nufuziyete etkisi araştırılmıştır [10-17].

Paslanmaz çeliklerin TIG kaynak işlemi ile birleştirilmesinde koruyucu gaz olarak genellikle saf argon kullanılmaktadır. Tam nufuziyetli bir kaynak nufuziyet derinliği 3 mm ile sınırlı olup, maksimum nufuziyetin sağlanabilmesi için düşük kaynak ilerleme hızları gerekmektedir. Argona belirli bir miktar helyum ya da hidrojen katılmasıyla nufuziyet miktarı 1–2 mm daha artırılmaktadır [18]. Koruyucu argon gazına hidrojen ilavesi ısı girdisi ve kaynak dikiş morfolojisine etki etmektedir [19, 20]. Koruyucu gaz içerisindeki hidrojen gazı miktarı artıkça paslanmaz çeliklerin kaynağında nufuziyet artırmaktadır [21]. Argon gazı içerisine hidrojen ilavesi mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir [21, 24]. Farklı kimyasal bileşimlere sahip malzemelerde nufuziyet miktarı değişiklik göstermektedir Gerçekleştirilen birleştirmenin sağlıklı, mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının yeterli seviyede olması gerekmektedir. Bunun için otomatik TIG kaynak

makinelerinde gerçekleştirilen birleştirmenin sağlam ve mukavemetli olabilmesi için kaynak dikiş şekli, geometrisi ve nufuziyetine etki eden kaynak akımı, hızı ve ısı girdisi gibi kaynak parametrelerinin kontrol altına alınması gerekmektedir. Gazaltı kaynak yöntemleri ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, sertlik dağılımları gibi mekanik özelliklerin belirlenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [21-33]. Ayrıca, yurdumuzda farklı tarihlerde paslanmaz çeliklerin kaynağı ile ilgili çeşitli tezler yapılmıştır [33, 44]. Bu tez çalışmalarında paslanmaz çelik malzemelerin gazaltı kaynağı yöntemleri ile birleştirilmesinde kullanılan koruyucu gaz kompozisyonlarının sertlik dağılımları, çekme dayanımı, eğme dayanımı ve çentik darbe dayanımı gibi mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

Kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametrelerinin birleştirmelerin nufuziyetine olan etkisi araştırılmış ve tez haline getirilmiştir [45-47]. Kaynakla birleştirilen malzemelerin yorulma özelliklerinin araştırılması oldukça ilginç olup, konstrüksiyonlar tekrarlı yüklere maruz kaldıklarından endüstriyel uygulamalarda ostenitik paslanmaz çelik malzemelerden üretilen konstrüksiyonların güvenli ömürlerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Kaynaklı bağlantılardan oluşan bir yapı düzenli veya düzensiz kuvvet ya da momentlerin etkisi altında kalmaktadır. Kaynak bağlantısının yorulma dayanımlarına etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Kaynak hataları, bağlantılardaki gerilme yığılmaları çekme ve kalıntı gerilmeler bunlardan birkaçıdır. Ülkemizde kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının geliştirilmesi ile ilgili literatür bilgilerinin toplandığı Aydoğdu [48] tarafından bir tez yapılmıştır. Deneysel çalışmaların içerdiği yorulma dayanımları ile ilgili tez şık [49] tarafından gerçekleştirilmiştir. Galvanizli ve ostenitik paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi ve kaynaklı bağlantının yorulma dayanımlarının araştırılması doktora tezi olarak Akkaş [50] tarafından hazırlanmıştır. Çalık'ın [51] yaptığı çalışmada dolgu kaynağının yorulma özellikleri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin yorulma dayanımı ile ilgili tezler Ünal [52] ve Tanrıöver [53] tarafından hazırlanmıştır. Konu ile ilgili diğer tezler Aydemir [54] ve Alsaran [55] tarafından hazırlanmıştır.

Son zamanlarda argon-hidrojen koruyucu gaz karışımının TIG kaynağı ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin yorulma özellikleri ile ilgili tez Gözütok [44] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, ince kesitli AISI 304 Ostenitik paslanmaz çelik malzemeler TIG kaynak yöntemi ile alın kaynağı ve bindirme kaynak tarzında birleştirilmiştir. Hem gaz kompozisyonunun hem de birleştirme şeklinin kaynaklı birleştirilmenin yorulma özelliklerine etkisi incelenmiştir

Bu çalışmada kullanılan AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler özellikle gıda sanayi ile ilgili alanlarda yoğun olarak kullanılan malzemelerdir. AISI 316Ti ise asitli ve yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olup, tıp alanlarında da kullanılmaktadır. Bu tip ostenitik paslanmaz çelikler TIG kaynak yöntemi ile kaynatılmasıyla kaliteli ve mukavemetli birleşmeler elde edilmektedir. Bu çalışmada, AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çelik malzemeler TIG kaynak yöntemi ile kaynatılacaktır. Kaynak işleminde kullanılan parametrelerin kontrolü için otomatik TIG kaynak makinesi kullanılacaktır. Kaynak işleminde kullanılan parametrelerin ve paslanmaz çelik malzemelerin sahip olduğu kimyasal kompozisyonun kaynak nufuziyetine etkisi araştırılacaktır. Kaynak nufuziyetinde kaynak derinliği ve genişliği dikkate alınacaktır. Kaynak parametreleri olarak ise kaynak akımı ve kaynak hızı dikkate alınarak farklı kaynak akımı değerlerinde ve kaynak ilerleme hızları kullanılarak kaynatılacaktır. Çalışma sonucunda hem kaynak parametreleri hem de paslanmaz çelik malzemelerin sahip olduğu kimyasal kompozisyonu nufuziyet üzerinde etkili olup olmadığı araştırılacaktır. Çalışmada, çekme deneyi, mikrosertlik, çentik darbe ve yorulma deneyleri gibi mekanik özellikleri belirlenecektir. Bu çalışmalara paralel olarak stero, optik ve tarama elektron mikroskobu (SEM) mikroyapı karakterizasyon incelemeleri yapılmıştır.

Hazırlanan tez 7 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde çalışmanın gerekçesi ve önemi hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde paslanmaz çelikler ve özellikle ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanım yerleri, çeşitli mekanik ve fiziksel özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde paslanmaz çeliklerin kaynağı, kaynağında karşılaşılan problemler, TIG kaynağı ile ilgili bilgiler, kaynak parametreleri ve kaynak işleminde enerji, ısı ve bunların özelliklere etkisi belirtilmiştir. Dördüncü bölümde paslanmaz çeliklerin mikroyapıları, ısıl özellikleri,

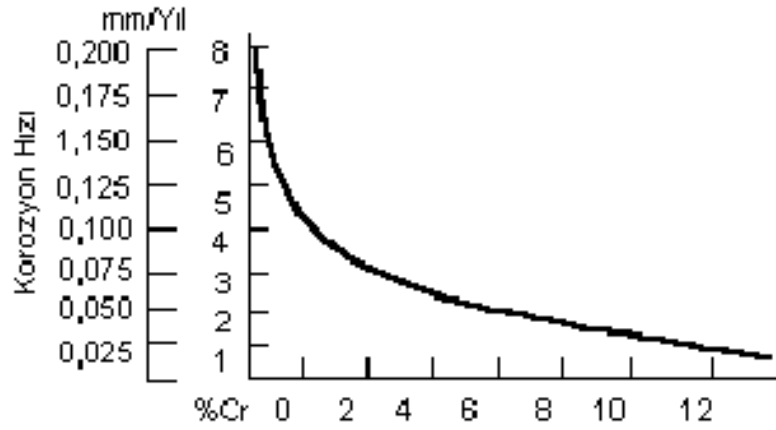
mekanik özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiş olup, metallerde yorulma ile ilgili konular detaylıca işlenmiştir. Beşinci bölümde çalışmada kullanılan malzemeler, deney şartları ve çalışma programı sunulmuştur. Çalışmanın en önemli bölümünü oluşturan altıncı bölümde ilave metal kullanılarak ve kullanılmadan kaynak parametrelerin nufuziyete, sertliğe, mikroyapıya etkileri ile TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin, mikroyapı, sertlik, çekme, darbe tokluk ve yorulma davranışlarına etkileri sunulmuştur. Yedinci bölümde ise; deneysel çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca, benzer konularda çalışacak araştırmalara bazı öneriler bulunmaktadır.

BÖLÜM 2. PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1. Paslanmaz Çelikler

Alaşımsız ve az alaşımlı çelikler korozyon etkilerine karşı dayanıklı olmadıklarından günümüzde endüstrinin vazgeçilmez malzemelerinden olan paslanmaz çelikler, esas olarak oksitleyici ortamlarda paslanmayan çeliklere verilen genel addır ve endüstrinin birçok dalında yaygın olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımları yanında, farklı mekanik özelliklere sahip türlerinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi, şekil verme kolaylığı ve estetik görünüşleri gibi avantajlı üstün özelliklere sahiptirler. Paslanmaz çelikler diğer çeliklere kıyasla fiyat bakımından bir miktar daha pahalı olmakla beraber, bakımlarının daha ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanılabilmeleri ve çevre dostu bir malzeme olmaları çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Dolayısıyla parçanın tüm ömrü dikkate alınarak yapılan fiyat analizlerinde, tasarımlarda paslanmaz çelik kullanımının daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Genellikle paslanmaz çelikler yüksek krom alaşımlı çelikler olup, paslanmaz olarak nitelendirilebilmeleri için bu malzemelerin kimyasal içeriğinde en az %10,5 Cr bulunması gerekmektedir. Çünkü, demir-krom alaşımlarının oksitleyici ortamlarda korozyon dirençleri, alaşımın bileşiminde krom artışına paralel olarak arttığı krom miktarının azalması ile mevcut alaşımın daha fazla korozyona maruz kaldığı yapılan deneylerde görülmektedir. Oda sıcaklığında püskürtme su içindeki ortamda malzeme içerisindeki krom miktarının %10,5 değerine ulaştığında korozyonun durduğu görülmektedir [41, 56]. Şekil 2.1'de krom miktarının korozyon direncine etkisi gösterilmektedir. Sahip oldukları üstün mekanik özellikleri ve korozyon dirençlerinden dolayı günümüz endüstrisinin en önemli malzemelerinden biri olup, 170'ten fazla farklı paslanmaz çelik türü bulunmaktadır [1, 3].



Şekil 2.1. Fe-Cr alaşımlarında Cr miktarının korozyon direncine etkisi [41, 56]

Paslanmaz çelikler, esas olarak mükemmel korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilirler. Mükemmel korozyon dirençlerinin nedeni yüksek krom içermesinden kaynaklanmaktadır. Demire küçük miktarda örneğin yaklaşık % 5 krom katılması bir miktar korozyon direncinin artışı sağlar. Ancak paslanmaz çelik üretmek için demire en az %12 Cr katılması gerekmektedir. Çeliğin içerisindeki kromun korozyona karşı koruyucu kabiliyeti, kromun oksijene olan ilgisinden ileri gelmektedir. Paslanmaz çelikteki kromun oksijene büyük bir yakınlığı vardır. Malzeme içerisindeki krom miktarı yeterli olduğunda ve oksijenle karşılaştığında çeliğin yüzeyinde moleküler düzeyde ince bir krom oksit (Cr_2O_3) filmi oluşturmaktadır. Oluşan oksit filmin kalınlığı 130 Angstrom'dur. Böylece yüzey pasif hale getirmekte ve malzemeyi çevrenin olumsuz etkisinden korumaktadır. Bu durum, büyük bir binayı, mektup kağıdı kalınlığındaki çatı sacıyla yağmurdan korumak gibidir [44, 57]. Korozyona karşı mukavemetin gerçekleştirilebilmesinin sebebi; malzeme yüzeyinin oksijenle temas etmesi sonucu malzeme yüzeyinde oluşan krom oksit filminin oluşmasıdır (Şekil 2.2). Bu oksit tabakası; ince, sıkı, geçirimsiz ve metalin yüzeysel davranışlarında çok önemli elektrokimyasal değişiklikler yaparak çeliği, korozif ortamdan koruyan özelliklere sahiptir [41, 58, 59].



Şekil 2.2. Paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan koruyucu krom oksit tabakası [58]

2.2. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

Paslanmaz çeliklerin tercih sebepleri; imalat kolaylığı, mekanik dayanım, yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanım, korozyon dayanımı, görünüm, hijyenik özellik ve uzun ömür başlıkları ile sıralanabilir: [60]

- İmalat Kolaylığı: Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilirler
- Mekanik Dayanım: Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısı işlemler ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür.
- Yüksek ve Düşük Sıcaklıklar: Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi tufallenme ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar.
- Korozyon Dayanımı: Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltiler ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir.
- Görünüm: Paslanmaz çelikler çok farklı yüzey kalitelerinde temin edilebilirler. Bu yüzeylerin görünümü, kalitesi ve bakımı kolay olduğundan kolaylıkla uzun süreler korunabilir.
- Hijyenik Özellik: Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar.

- Uzun Ömür: Paslanmaz çelikler dayanıklı ve bakımı kolay malzemeler olduklarından, üretilen parçanın tüm kullanım ömrü dikkate alındığında ekonomik malzemelerdir [60].

2.3. Paslanmaz Çelikler İçerisindeki Alaşım Elementleri ve Etkileri

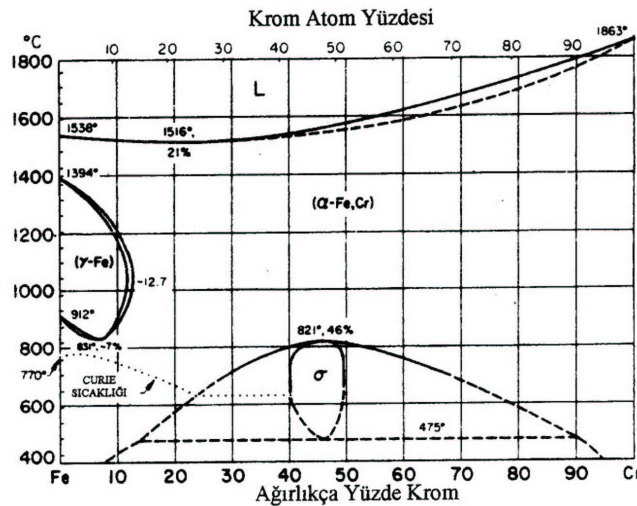
Paslanmaz çelikler içerisinde bulunan alaşım elementleri ferrit ve ostenit oluşturuçu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ferrit, ostenit oluşturuçu ve nötr elementlerin fonksiyonları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Ferrit, ostenit oluşturuçu elementler ile nötr elementler ve etkileri [1]

Elementler	Etkileri
Krom	Ferrit oluşumunda etkili olmakta, malzemenin oksidasyon ve korozyon dayanımının yükselmesine katkı sağlamaktadır.
Molibden	Ferrit oluşumunda etkilidir. Malzemenin yüksek sıcaklıklarda dayanıklı olmasını ve redükleyici ortamlarda malzemelerin korozyona karşı dirençlerinin artmasına katkı sağlamaktadır.
Niyobyum ve titanyum	Bu elementler paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyon hassasiyetinin azaltılması için, karbonla birleşerek karbür oluşturmaları için yapıya eklenmektedir. Niyobyum karbür yapıcı elementtir ve ilave olarak tanelerin küçülmesine ve ferrit oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Paslanmaz çeliklerde sürtünme dayanımı artırmasına karşılık sürtünme sünekliğini azaltmaktadır. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlarda sertliği ve mukavemet değerleri artırması için katılmaktadır. Buna ilave olarak, bazı martenzitik paslanmaz çeliklerde bünyedeki karbonu bağlaması ve böylece sertleşme eğilimini azaltmaktadır.
Fosfor, kükürt, selenyum	Paslanmaz çeliklerin işlenebilme kabiliyetini yükseltmekte ancak kaynak sırasında sıcak çatlak oluşmasına neden olması nedeniyle kaynak kabiliyetini sınırlamaktadır. Paslanmaz çeliklerin TIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirildiğinde nüfuziyetin artmasını sağlamaktadır.
Karbon	Paslanmaz çelik malzemelerde kuvvetli ostenit oluşturuçu element olup krom ile reaksiyona girerek taneler arası korozyona neden olan karbürleri oluşturmaktadır.
Nikel	Ostenit oluşumunu sağlamakta ve paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıkta direnci, korozyona karşı dayanımı ve sünekliğini artırmaktadır.
Azot	Ostenit oluşumuna çok kuvvetli etkide bulunmakta olup, çoğu zaman ostenit oluşturmada nikel elementi kadar etkilidir.
Bakır	Paslanmaz çeliklere, bazı ortamlardaki korozyon dayanımlarını arttırmak amacıyla katılmakla beraber gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti azaltır ve yaşlanma yoluyla sertleşmeyi teşvik etmektedir.
Mangan	Düşük sıcaklıklarda ostenitin kararlı olmasını sağlarken yüksek sıcaklıklarda ferrit oluşturmaktadır.
Silisyum	Paslanmaz çelik malzemelerin tufallenmeye karşı dayanımı yükseltmektedir. Mikroyapıda %1’den daha fazla olduğunda ferrit ve sigma fazlarının oluşumuna etki etmektedir. Her tür paslanmaz çeliğe oksit giderme için bir miktar ilave edilmektedir. düşük Akışkanlığı artırarak kaynak metalinin ana metali ıslatma kabiliyetini artırmaktadır.

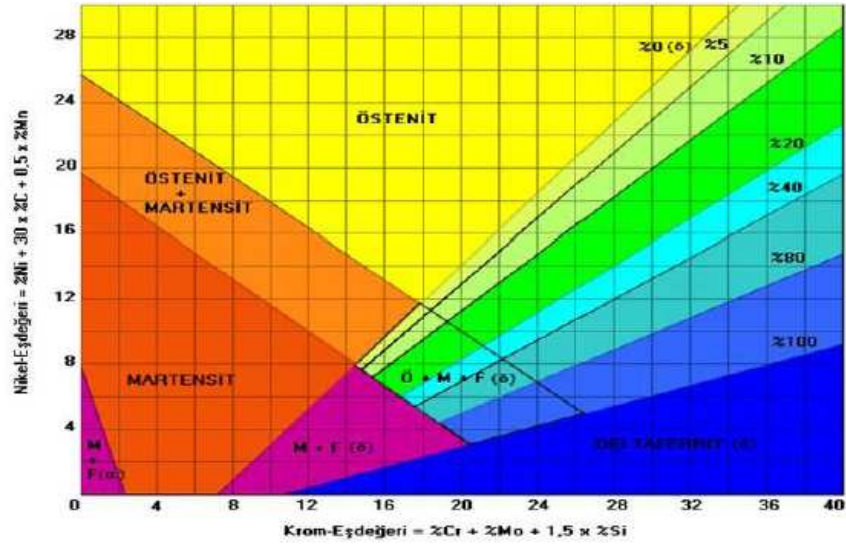
2.4. Paslanmaz Çeliklerde Faz Diyagramları

Paslanmaz çeliklerin temelini demir-krom sistemi oluşturmaktadır. Şekil 2.3'de demir krom faz diyagramı verilmiştir. Krom hacim merkezli kübik (HMK) yapısına sahiptir. Demir karbon denge diyagramında yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısına sahip ostenitik yapı oluşturan bölge olan osteniti (γ) kapalı hale getirmekte ve 1000°C sıcaklığında % 12 kadar krom çözünürlüğe sahiptirler. Yapıda %12'den fazla krom içerdiğinde demir-krom alaşımları YMK'den HMK'e dönüşüm göstermezler [2]. Düşük sıcaklıklarda demir krom faz diyagramı tamamı katı eriyik olmayıp 821°C altında yaklaşık %46 krom içeren sert ve kırılğan olan σ oluşmaktadır. Fe-Cr alaşımlarına karbon katıldığında ostenit alanları genişlemektedir [2, 41].



Şekil 2.3. Demir krom faz diyagramı [2]

Paslanmaz çelik alaşım elementleri etkinlik dereceleri ferrit dengeleyicileri $\text{Cr}_{\text{eş}}$ ostenit dengeleyici $\text{Ni}_{\text{eş}}$ şeklinde gruplayarak değerlendirilmektedir. Yıllardan beri araştırmaların sonucunda formüller geliştirilmiş olup, Thomas bu amaçla maksimum Ni içeriğini çelik içerisinde bulunan diğer alaşım elementlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir [1]. Paslanmaz çeliklerin kaynağında mikroyapı ve bileşim arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Schaffler diyagramı, paslanmaz çeliklerin yol haritası olarak değerlendirilmektedir (Şekil 2.4).



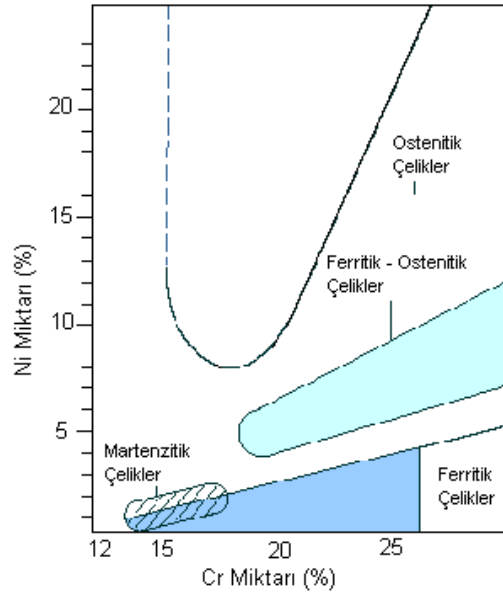
Şekil 2.4. Schaeffler ve Delong diyagramları [1]

2.5. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikler, içerdiği katkı elemanlarına göre değişen ve tamamen ostenitik ile tamamen ferritik özellikler aralığında sıralanan beş farklı çeşit paslanmaz çelik türü bulunmakta olup bunlar sıra ile aşağıda verilmiştir:

1. Ostenitik paslanmaz çelikler
2. Ferritik paslanmaz çelikler
3. Martenzitik paslanmaz çelikler
4. Çift fazlı paslanmaz çelikler
5. Çökeltme yolu ile sertleşmeli paslanmaz çelikler [1].

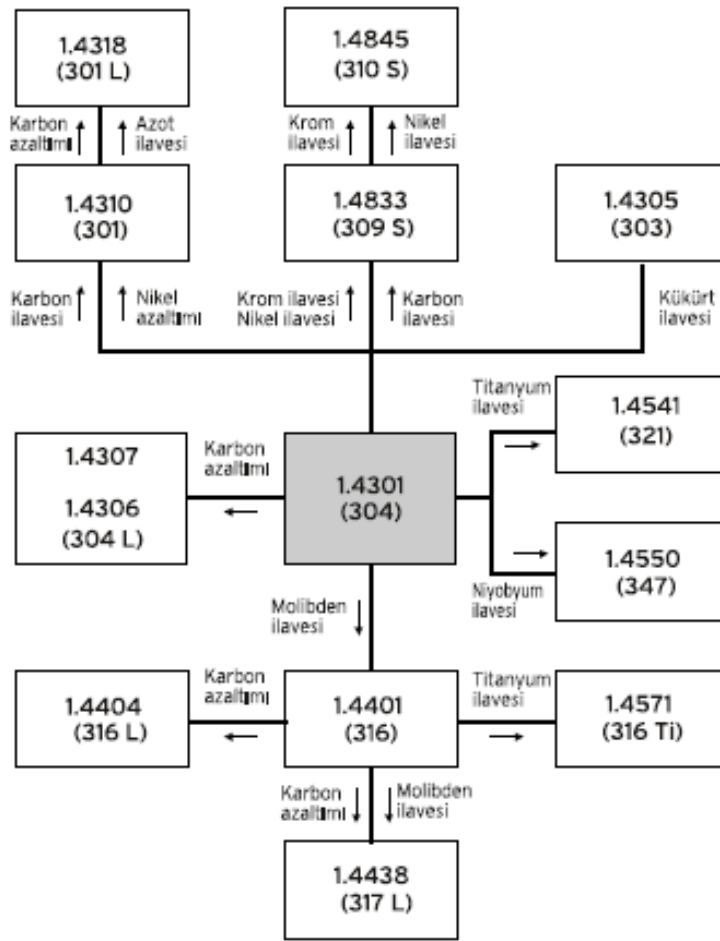
Şekil 2.5’de paslanmaz çelik malzeme içerisinde krom ve nikel oranlarına göre oluşan paslanmaz çelik türleri verilmiştir. İç yapısına göre yapılan guruplar içerisinde en yaygın olarak ostenitik ve ferritik çelikler kullanılmaktadır ve tüm paslanmaz çelikler içinde %95 oranındadır.



Şekil 2.5. Nikel ve krom miktarlarına göre farklı paslanmaz çelik türlerinin gösterilmesi [61]

2.6. Ostenitik Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelik malzemelerin içerisinde yeterli miktarlarda nikel bulunduğunda mikroyapı oda sıcaklığında da ostenitik yapı şeklindedir. Ostenitik paslanmaz çelikler içerisinde %16–25 krom, %10–24 nikel + mangan, %0,4'e kadar karbon ve çok az miktarlarda molibden, titanyum, niyobyum gibi alaşım elementleri içermektedir. Paslanmaz çelik içerisinde krom ve nikel+mangan oranları ayarlandığında mikroyapı ostenit yapıdan oluşmakta ve geniş bir sıcaklık aralığında yüksek tokluk ve mukavemet değerleri göstermektedir. Aynı zamanda bu malzemeler 540°C'ye kadar oksidasyona karşı dirençlidir. Şekil 2.6'da ostenitik paslanmaz çeliklerin türleri ile ilave edilen alaşımlar ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tablo 2.2'de bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve endüstrideki kullanım alanları verilmektedir. Ostenit paslanmaz çelikler soğuma esnasında ostenit→ferrit dönüşümü gerçekleşmediğinden su verme ile sertleştirilemezler ve aynı zamanda manyetik değildirler. Bu çelikler AISI 3XX serisi içerisinde gruplandırılırlar. Aynı zamanda DIN 17440, EU 88, EU 95 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çelikler gibi simgelenilmektedirler. TS 2535 ostenitik paslanmaz çeliklerin bileşiminde korozyona karşı krom ve ostenitik bir yapı sağlamak amacıyla nikel bulunan, oda sıcaklığında manyetik olmayan ısı işlem ile sertleştirilemeyen soğuk şekillendirmeye elverişli paslanmaz çelikler olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.6. Ostenitik çelikler ve ilave edilen elementler [61]

Ostenitik paslanmaz çelikler martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Çok düşük ve yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri, üstün mekanik özellikleri bu tür çelikleri birçok alanda rakipsiz yapmaktadır. Bundan dolayı ABD’de (Amerika Birleşik Devletleri) çelik üretiminin % 70’ini ostenitik paslanmaz çelikler paslanmaz oluşturmaktadır. Bu malzemeler yüksek korozyon direncinden ve şekillendirilebilme kabiliyetlerinden dolayı birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [2].

Tablo 2.2. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve kullanım alanları [2]

Tür	Tipik uygulamalar
301	Yüksek pekleşme hızı, yüksek dayanım, yüksek sünekliğin gerekli olduğu durumlarda kullanılır. Tren yolu arabaları, treyler gövdeleri uçak parçaları, sıkma bilezikleri otomobil tekerlek kapakları, çeşitli süslemeler
304	Kaynak sırasında karbür çökmesi sınırlamak için tip 302'nin düşük modifikasyonu. Kimyasal ve yiyecek işleme ekipmanları, soğuk kaplar, sac kaplamalar
304L	Kaynak sırasında karbür çökmesi sınırlamak için tip 304'ün daha fazla düşük karbon modifikasyonu. Kömür silo hatları, sıvı gübreleme tankları
309	Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksitlenme direnci, uçak ısıtıcıları, ısıl işlem ekipmanları, tavlama kapakları, fırın kaplamalar, pompa parçaları.
310	309'dan daha yüksek oksitlenme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı, ısı değiştiricileri, kaynak dolgu metalleri, gaz türbin bıçakları
316	304'den daha yüksek korozyon direnci, yüksek sürünme dayanımı, kimyasal taşıma ekipmanları, maya tüpleri.
316L	Tip 316'nın daha fazla karbon modifikasyonu taneler arası karbür çökmesini önlemek zorunda olduğu kaynaklı yapılar, 316L yoğun kaynak gerektiren yerlerde kullanılır.
321	Çok şiddetli korozyon şartlarına maruz kaynaklı bağlantılar, kaynatma kazanları, kabin ısıtıcıları.
347	Yüksek sürünme dayanımıyla birlikte tip 321'e benzer, uçak egzost bacaları, jet motor parçaları, kimyasal maddeler için kaynaklı tanker arabaları.

Ostenitik paslanmaz çelikler yüzey merkezli kübik yapıya sahip olup bu çeliklerde mukavemet, yoğun katı eriyik mukavemetlenmesi ile elde edilmektedir. Soğuk deformasyon sonucu pekleşmeye uğrayan ostenitik paslanmaz çeliklerin mukavemetleri ferritik paslanmaz çeliklerden fazla olabilmektedir [2, 42]. Ostenitik paslanmaz çeliklerde X5CrNi1810 (304) serisi ostenitik paslanmaz çelik korozyon direnci ve şekillendirilebilme kabiliyeti gibi üstünlüklerinden dolayı en çok bilinen ve en yaygın kullanılmaktadır. Plastik şekil değiştirme sertleşmesi ile mukavemet arttırılabildiğinden yüksek mukavemet gerektiren makine parçalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. İçerisinde karbon miktarı az olan ürün AISI 304L dir. Bu tür çok düşük karbonlu ostenitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesinin amacı kaynak esnasında ısı tesiri altında kalan bölgede oluşan ve taneler arası korozyona neden olan karbür çökmesinin önlenmesidir. % 2 molibden içeren AISI 316 tipi ostenitik paslanmaz çelik yüksek korozyon direncine ve iyileştirilmiş yüksek korozyon direncine sahiptir. Paslanmaz çelik içerisindeki krom miktarı % 23–25 arttırılmış olan AISI 309 ve AISI 310 tipi ostenitik paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. AISI 316L tipi düşük karbon içeren ostenitik paslanmaz çelikler taneler arası korozyonu önlemek amacıyla üretilmiştir. X6CrNiTi1810 (321) ve X6CrNiNb1810 (347) ostenitik paslanmaz çelikleri titanyum ve niyobyum ile stabilize edilerek yüksek sıcaklıklarda kaynak bağlantılarındaki

taneler arası korozyonun önlenmesi amaçlanmıştır [42, 62]. Ostenitik paslanmaz çelikler genellikle nemli ortamlarda kullanılmakta olup artan krom ve molibden miktarları agresif çözeltilere karşı korozyon dirençlerinin arttırmaktadır. Özellikle ostenitik paslanmaz çeliklerin birleşimindeki nikel miktarı gerilmeli korozyon çatlama riskini azaltmaktadır. Ostenitik paslanmaz çeliklerin birleşiminde bulunan alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak özellikle molibden ve krom miktarının artışına paralel olarak genel korozyona çukurcuk ve aralık korozyonuna karşı dirençleri arttırmaktadır [42, 62]. Ostenitik paslanmaz çelikler genel olarak aşağıda sıralanan özelliklere sahiptir:

- Mükemmel korozyon dayanımına,
- Mükemmel kaynak edilebilme kabiliyetlerine,
- Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilmeye,
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaylığı,
- Yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahip olması,
- Manyetik değildirler (tavlanmış halde)
- Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilme gibi özelliklere sahiptir.

En yaygın olarak kullanılan AISI 304 tipi paslanmaz çelikler % 0,06 karbon içermekte olup bu tip çeliklerde karbon eriyebilirliği sıcaklığa paralel olarak düştüğü için bu tip alaşımlar yavaş soğutulduklarında krom karbür çökelme olmaktadır. AISI 304 tipi ostenitik paslanmaz çelik 1050°C sıcaklığında oda sıcaklığına yavaş bir şekilde soğutulursa 850°C-450°C sıcaklıkları arasında krom karbür tane sınırlarına çökecektir. Tane sınırlarına yakın bölgelerde korozyon direnci için gerek olan %12'den daha az krom içermesi sonucu malzeme korozyona karşı hassas hale gelmektedir.

BÖLÜM 3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI ve KAYNAK PARAMETRELERİ

3.1. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Herhangi bir malzemenin kaynak edilebilirliğinden söz edildiğinde o malzemenin iş ortamında iyi performansa sahip olması ve sağlıklı kaynaklı birleştirmelerin yapılabilmesi ifade edilmektedir. Bundan dolayı kaynak edilebilirlik, dayanım, süneklik ve çentik darbe dayanımı gibi mekanik özellikler ile kırılma, gerilme korozyon kırılması, genel korozyon dayanımı ve düşük sıcaklıklarda gösterdiği özellikleri kapsamaktadır [63, 64]. Bir malzemenin yüksek kaynak kabiliyetine sahip olması; kaynak şartları geniş bir aralıkta değişirken hiçbir önleme gerek kalmadan iyi derecede bir kaynak kalitesinin elde edilebilmesi demektir. Düşük seviyede kaynak kabiliyeti tatminkâr bir sonuç alabilmek için özel tedbirler ihtiyaç olduğunu ve kaynak şartlarının çok dar sınırlar arasında tutulmasının gerektiğini ifade edilmektedir.

Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti açısından bazı özelliklerini dikkate alınması gerekmektedir. Bu özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

- Paslanmaz çeliklerin ısı iletim katsayıları oda sıcaklığında düşük alaşımli ve sade karbonlu çeliklerin sahip olduğu değerlerin 1/3'ü kadardır.
- Paslanmaz çeliklerin ısıl genleşme katsayıları sade karbonlu ve düşük alaşımli çeliklerin yaklaşık olarak 1,5 kat kadardır. Diğer bir deyişle %50 daha fazladır.

Sade karbonlu çelikler düşük elektrik iletme direncine sahip olmalarına karşılık bu değer paslanmaz çelik malzemelerde 5 ile 7 kat daha büyüktür. Bahsedilen bu özellikler nedeni ile paslanmaz çeliğin kaynağında kendini çekme olayı sade karbonlu çeliklerin kaynağına göre daha fazladır. Kaynak dikişinin soğuması esnasında büyük oranda büzülme meydana gelmekte böylece kaynaklı bölgede oluşan şiddetli gerilmeler çatlama tehlikesine yol açmaktadır. Bundan dolayı

- Paslanmaz çeliklerin çift taraflı iç köşe dikişlerinde sıcak çatlakların meydana gelme olasılığı fazladır [42, 65].

Ostenitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu düşük ısı ve elektrik iletkenliği kaynak açısından genellikle yararlı olup, kaynak esnasında düşük ısı girdisi ile çalışması tavsiye edilmektedir. Çünkü, oluşan ısı, kaynak bölgesinden, düşük karbonlu çekirdekte olduğunun aksine yavaş bir şekilde uzaklaşmaktadır. Malzemenin ısı direnci yüksek olduğundan direnç kaynaklarında daha düşük akım değerleri ile birleştirilebilmektedir [42, 66].

Ostenitik paslanmaz çelikler oksitleyici ve redükleyici ortamlarda iyi korozyon direnci göstermektedir. Kaynakla birleştirilen paslanmaz çelik imalatlarında % 90'dan daha fazlasında ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri bu tip çeliklerin iyi kaynaklanabilirlik özelliği ve kaynak sonrasında ana metalle karşılaştırılabilecek derecede kimyasal bileşimlere ve mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Ostenitik paslanmaz çelikler çeşitli kaynak yöntemleri kullanılarak kolaylıkla kaynak edilebilirler [42, 67]. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak edilerek birleştirilmesinde daha önceden bahsedilen fiziksel özellikleri dikkate alınması gerekli olup, bu özelliklerin yanında bir dizi metalürjik etkenlerde bu tip paslanmanın kaynağında önemli rol oynamaktadır. Bunlar; δ -ferrit oluşumu, taneler arası korozyona duyarlılık, gerilmeli korozyona duyarlılık ve sigma fazının oluşmasıdır [67-69].

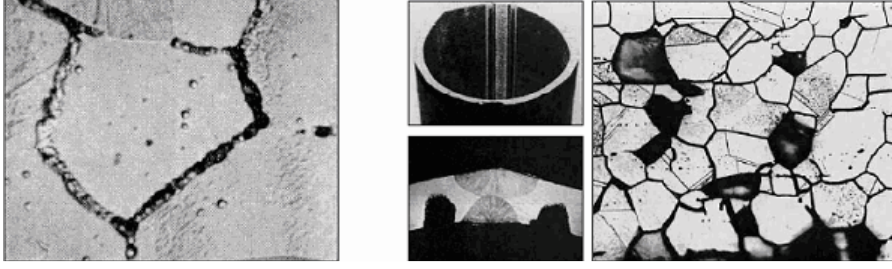
3.2. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Karşılaşılan Problemler

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında krom karbür çökmesi ve taneler arası korozyon, sıcak çatlak oluşumu ve Sigma fazı oluşması gibi genelde üç temel problemle karşılaşmaktadır.

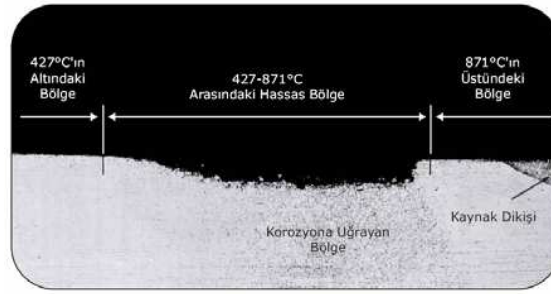
3.2. 1. Krom karbür oluşumu

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirilmesinde ortaya çıkan bir sorun olup, özellikle 18/8 çeliği gibi bazı paslanmaz çeliklerin 450°C – 850°C sıcaklıklar

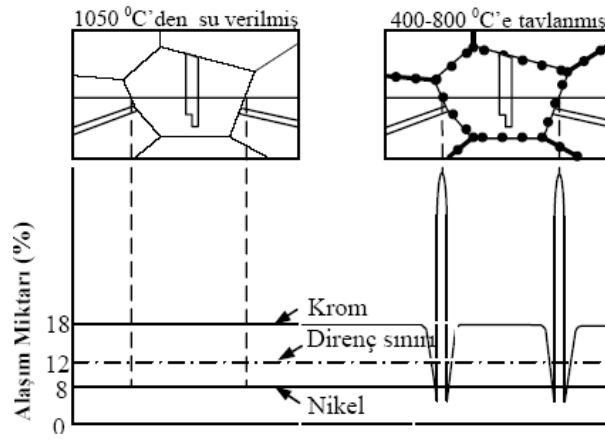
arasında uzun süre kalmaları sonucunda krom karbür çökmesi meydana gelmektedir. Bu tür paslanmaz çelikler üretimleri esnasında krom ve karbürün ostenit içerisinde çözüldüğü 1100°C'den hızla soğutulduklarında bu elementlerin çökme tehlikesi ortadan kalkmış olmakta ve oda sıcaklığında karbonun difüzyon hızı çok düşük olduğundan, paslanmaz çeliklerin kullanımı esnasında oluşma durumu olmamaktadır. Ancak sıcaklığın 450°C'nin üzerine çıkması ile karbonun difüzyon hızı karbonun tane sınırlarında biriken karbonun kroma karşı olan yüksek ilgisi nedeniyle burada krom ile birleşerek krom karbür $[(Fe,Cr)_{23}C_6]$ oluşturmaktadır. Krom karbürün ağırlık olarak %90'ını krom oluşturduğundan tane sınırlarında bulunan çok düşük oranlardaki karbon bile ostenit tanelerinin çevresindeki krom miktarını aşırı derecede azalmaktadır (Şekil 3.1). Krom karbür çökmesi sonucunda paslanmaz çelik malzeme korozif bir ortamda bulunduğu tane sınırları kromca zayıflamış olduğundan kolayca korozyon oluşmaktadır. Böylece, taneler arası korozyon sonucu paslanmaz çelik malzeme çok kısa bir süre içerisinde kullanılmaz hale gelmektedir. Paslanmaz çelik malzeme içerisinde karbon miktarı korozyon direncini olumsuz etkilemekte ve karbon oranının artışına paralel olarak taneler arası korozyon şiddetlenmektedir [69]. Ostenitik paslanmaz çeliğin kaynağı esnasında eriyen bölge çok kısa bir süre içerisinde katılaştığından ve elektrot olarak kullanılan kısımların karbon içeriği de düşük olduğundan kaynak dikişi için karbür çökme tehlikesi yoktur. Ancak, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) kaynak süresi boyunca, 500°C–900°C sıcaklık aralığında tavlı olarak kalmakta ve aynı zamanda karbon içeriğinin bir miktar yüksek olması halinde ostenit fazının tane sınırları içerisinde taneler arası korozyona neden olan karbür çökmesi meydana gelmektedir. Başka bir çalışmada ısı tesiri altında kalan bölgenin 427°C–871°C sıcaklığa kadar ısınan bölgede yer alan tane sınırında meydana gelen krom karbür çökmesi Şekil 3.2'de verilmiştir [1]. Krom karbür çökme esnasında bu bölgesel alanlarda Cr miktarında azalma olacağı için Şekil 3.3'de görüldüğü gibi korozyon dayanımı düşmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi belli bir karbon içeriği için karbür çökmesi olayının şiddeti zaman ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Tablo 3.1'de belirtildiği gibi çökme başlamadan önce sıcaklık ile değişen kuluçka periyodu vardır [1].



Şekil 3.1. Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi (X 1200) [1]



Şekil 3.2. Krom karbür çökmesi sonucu hassas bölgede oluşan korozyon [1]



Şekil 3.3. Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerde tane sınırlarında krom karbür çökmesine bağlı olarak krom azalması (şematik) [9]

Tablo 3.1. Karbon içeriğinin ve kritik sıcaklığının kuluçka oluşumuna etkisi [9]

Karbon içeriği %	Kuluçka periyodu dakika	Kritik sıcaklık °C
0,03	11	650
0,05	7	650
0,06	2,5	670
0,08	0,3	750

Abu'un çalışmasında [42] bahsettiğine göre, tek pasolu bir ark kaynağında ITAB 650°C–750°C arasındaki sıcaklığa bir dakikadan daha az bir süre maruz kalmaktadır. Tek pasolu kaynakta fazlaca bir problem görülmezken, çok pasolu kaynak yapılması halinde bu süre 3 dakikanın üzerine çıkmakta ve krom karbür okelmesi tehlikesi ortaya çıkmaktadır. Krom karbür okelmesinin oluşabilmesi için, paslanmaz çeliğin içerisindeki karbonun belli bir miktarının üzerinde bulunması gerekmektedir. Paslanmaz elik içerisindeki karbon içeriğinin azalması, kuluçka periyodunu uzatacağından krom karbür okelme tehlikesini ortadan kaldırmaktadır. Bundan dolayı, kaynak ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin, karbon içeriğinin maksimum %0,06 olması gerekmektedir. Ancak ideali karbon içeriğinin %0,03 civarında olması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı, bazı ostenitik paslanmaz çeliklerde içerikteki karbon miktarı belirli bir seviyeye kadar düşürülerek malzemenin korozyon direncinin arttırılması amaçlanmaktadır. Bu tür paslanmaz elikler ELC (Extra Low Carbon) elikleri olarak adlandırılmakta olup L tipi düşük karbonlu paslanmaz elik malzemeler ve ilave bazı elementlerin kullanılması sonucu krom karbür okelmesi nlenebilir. Bunlara ilave olarak kaynak işleminin n tav uygulanmadan yapılması, düşük ısı girdisi ile kaynakların yapılması ve bakır altlık kullanılması ile hızlı bir soğuma sağlanarak birleştirilen malzemenin kritik sıcaklık aralığında kalma süresini daha kısa tutulması faydalı olmaktadır [1, 42].

Stabilize edilmiş paslanmaz elik malzemeler ile ilave metallerinin kullanılması taneler arası korozyonun önlenmesi için son zamanlarda en çok uygulanan yöntemdir. Böylece, dengeleyici görevi gören alaşım elementleri karbon ile reaksiyona girerek tane sınırlarında krom miktarı koruyacağından malzemenin korozyon direncinde herhangi bir azalma görülmeyecektir. Titanyum, niyobyum ve tantalyum paslanmaz elik malzemelere en çok ilave edilen dengeleyici elementlerdir. Bu elementler karbürlerin ostenit taneleri içerisinde ince parçacıklar halinde dağılmalarını sağlayacağından ve böylece tane sınırları korunacağından paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerinde herhangi bir düşüş olamayacaktır. Dengelemenin gerçekleştirilebilmesi için ilave edilen malzeme içerisinde bulunan titanyumun karbonun 4 katı, niyobyumun 8-10 katı, tantalyumun ise 16 katı olması gerekmektedir [69]. AISI 321 kalite ostenitik paslanmaz çelikler dengeleyici olarak

titanyum içerirken, AISI 347 türü paslanmaz çelikler niyobyum (niyobyum+tantalyum) ile dengelenmişlerdir. Her iki element de kromdan daha güçlü karbür oluşturma özelliğine sahiptir [1].

Ostenitik paslanmaz çeliklerde maliyet açısından titanyum elektrotlarda titanyumun arktaki kaybının fazla olmasından dolayı genellikle niyobyum tercih edilmektedir. Bahsedilen karbürlerle dengelenen ostenitik paslanmaz çeliklerin korozyona karşı dirençlerinin çok iyi olduğu söylenemez. Çünkü, niyobyum, titanyum ve tantalyum karbürler 1300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çözülmekte, serbest kalan karbon krom karbür oluşturabilmektedir. Bu sıcaklığa ulaşan bölge çok dar bir alan olduğundan erime çizgisine yakın bir yerde çok dar bir alan korozyon direncini kaybetmekte olup, bu olaya bıçak izi etkisi veya korozyonu denilmektedir. ITAB veya esas metalde krom karbür çökmesi meydana geldiğinde parça 1100°C dereceye kadar tavlınır, su içinde soğutulduğunda yüksek sıcaklıkta ostenit fazı içerisinde çözünen karbürler hızlı bir soğuma ile tekrar oluşmamaktadır. Ancak, pratikte iş parçalarının boyutu böyle bir işlemin uygulanması zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı krom karbür çökmesine eğimli olan % 0,03'ten fazla karbon içeren ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynakçının alacağı en iyi önlem kaynak dikişini yaptıktan hemen sonra kaynak edilen parçayı ıslak bir bez veya sünger ile hızla soğutulmasıdır [34, 69].

3.2.2. Sıcak çatlak oluşumu

Ostenitik paslanmaz çeliklerin üretiminde sıvı halden katılaşmaya başlandığında yapı içerisinde ostenit ve ferrit taneleri oluşmaya başlamaktadır. δ -ferrit katılaşma esnasında meydana gelen ferrittir. Ostenitin normal dönüşümü sonucunda oluşan ferrit değildir. Katılaşma esnasında ostenit taneleri içerisine serpilmiş δ -ferrit tanecikleri oluşmaktadır. Oluşan bu faz, krom ve ferriti dengeleyen elementlerce zengin olup, diğer taraftan nikel ve osteniti dengeleyen elementler yönünden de fakirdir. Oluşan bu faz sıcak şekil değiştirmeyi zorlaştırmakta ve malzemedeki sıcak çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Dolayısıyla malzemedeki yapılacak olan sıcak haddelemenin rahat bir şekilde olması için malzeme içerisine nikel, mangan gibi ostenit yapıcı elementlerin miktarlarının artırılması gerekmektedir. Sıcak çatlamanın

temel nedeni; kükürt ve fosfor gibi elementlerin oluşturduğu ve tane sınırlarında toplanma eğilimi yüksek olan düşük ergime sıcaklığına sahip metalik bileşimlerdir. Bahsedilen bu bileşimler kaynak sonrasında kaynak dikişinin içinde veya ısı tesiri altında kalan bölgede bulunduğu, tane sınırlarına doğru yayılmakta ve kaynak dikişinin soğuması esnasında oluşacak çekme gerilimleri sıcak çatlamalara neden olmaktadır. Sıcak çatlak oluşumu ilave metalinin ve ana metalin kimyasal bileşiminin ostenit yapıda düşük oranlarda ferrit içerecek mikroyapı oluşumunun ayarlanmasıyla önlenir. Ferrit, kükürt ve fosfor bileşimlerini kontrol altında tutabilen ve ferritik–ostenitik yapıya sahip tane sınırları oluşturarak sıcak çatlak oluşumunu engellemektedir [1, 42].

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında oluşan δ -ferrit fazı sıcak çatlama eğilimini arttırmaktadır. Bu bakımdan δ -ferrit kristallerinin oluşumunu katılaşıma ilk kontrol edilmesi ostenitik paslanmaz çelik metalin sıcak çatlama direncinin iyileştirilmesinde δ -ferrit faz miktarının ölçülmesi önemli olmaktadır. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metallere, kaynak metalinin kimyasal bileşiminin yardımıyla δ -ferrit miktarı kontrol altında tutulmaktadır [42, 62]. Sıcak çatlama riskine karşı dayanım elde edebilmek için yapıdaki ferrit miktarının en az % 4 olması önerilmektedir. Ferritin varlığı AWS A4.2'ye göre kalibre edilen manyetik ölçüm aletleriyle sağlıklı bir şekilde ölçülebilmektedir. Ayrıca, dolgu malzemesinin ve ana metalin kimyasal analizi biliniyorsa, çeşitli diyagramlar kullanılarak da bir tahminde bulunmak mümkündür. Bu diyagramlardan en bilineni Schaeffler Diyagramıdır (Şekil 3.4). Bu diyagramda Cr eşdeğeri yatay eksen, Ni eşdeğeri ise dikey eksen yer almaktadır ve aşağıdaki eşiklik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$(Cr)_{eş} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb \quad (3.1)$$

$$(Ni)_{eş} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn \quad (3.2)$$

Schaeffler diyagramı çok uzun yıllar kullanılmasına karşın, azotun etkisini hesaba katmaması ve diyagramdan elde edilen verilerin, konusunda bilgili birkaç ölçüm uzmanı tarafından belirlenen ferrit yüzdeleri ile farklılıklar göstermesi nedeniyle günümüzde yerini daha çok WCR-DeLong diyagramı'na bırakmıştır. Nikel eşdeğeri

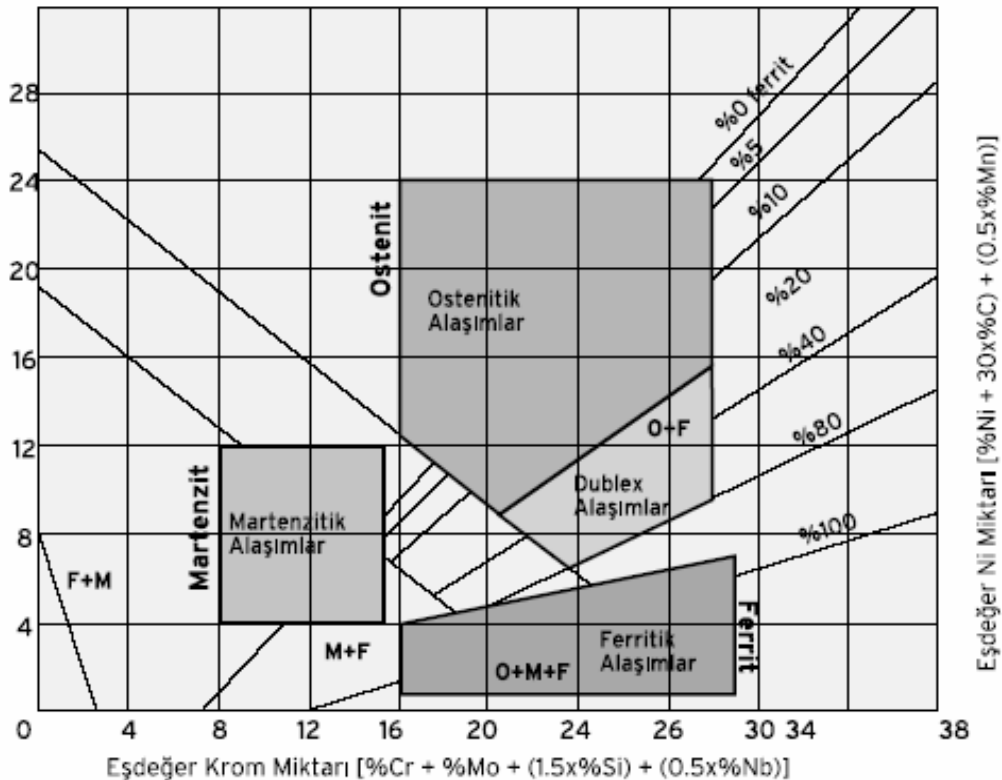
hesaplanırken yapıdaki azot miktarının da göz önüne alınması ve sonucun ferrit yüzdesine ek olarak "FN - Ferrit Numarası" ile belirtilmesidir.

$$(Ni)_{eş} = \%Ni + 30\%C + 30\%N + 0.5\%Mn \quad (3.3)$$

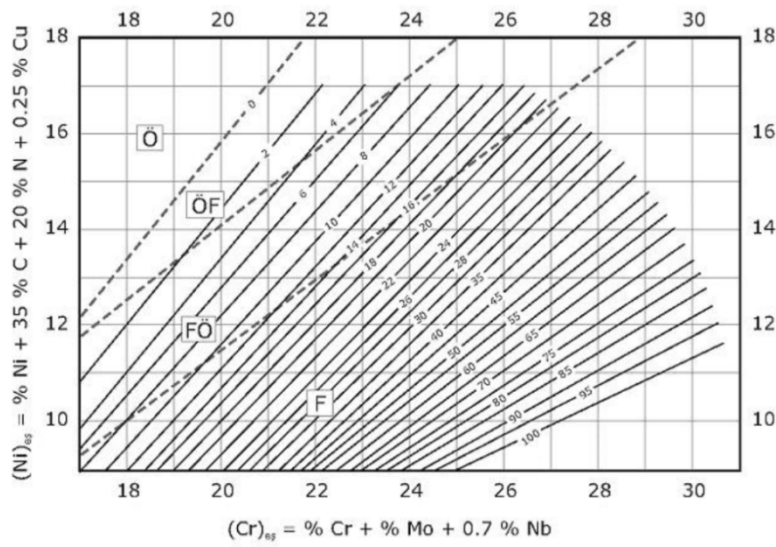
Ferrit numaraları, özellikle düşük seviyelerde, ferrit yüzdeleri ile yakın değerlere sahiptir. Günümüzde en sık kullanılan ve en sağlıklı sonucu veren diyagram Şekil 3.5' de gösterilen WCR - 1992 diyagramıdır. ASM şartnamelerinin 1994–1995 kış döneminde yayınlanan eklerinde WCR-1992 diyagramını WCR, DeLong diyagramının yerini almıştır. Kabul edilen bu en son diyagramda krom ve nikel eşdeğerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$(Cr)_{eş} = \%Cr + \%Mo + 0.7\%Nb \quad (3.4)$$

$$(Ni)_{eş} = \%Ni + 35 \%C + 20 \%N + 0.25 \%Cu \quad (3.5)$$



Şekil 3.4. Schaeffler Diyagramı [61]



Şekil 3.5. Katılma faz sınırlarını da içeren WCR - 1992 diyagramı [1]

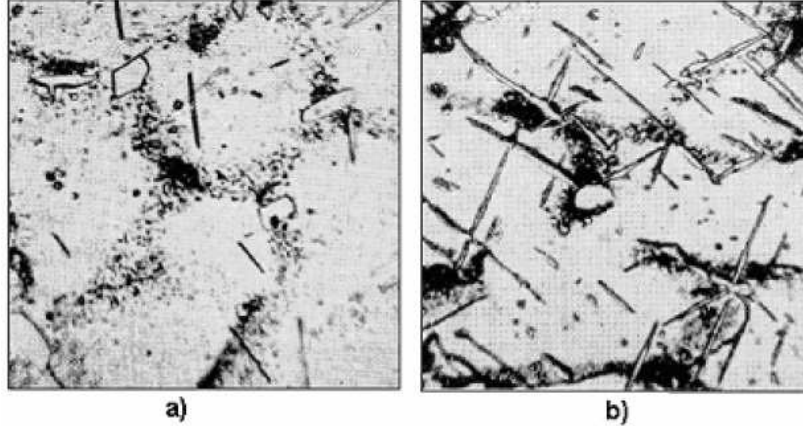
Ferrit numarası diyagramının nikel eşdeğerini gösteren ekseninden sağa doğru yatay, krom eşdeğerini gösteren ekseninden yukarıya doğru dikey çizgiler çizilerek bulunur. Yatay ve dikey doğruların kesiştiği noktadan geçen çapraz çizgiler ferrit numarasını vermektedir. Ferrit numarası, ferritin manyetik olma özelliğinden yararlanılarak kaynak metali üzerinden ölçülebilir. Bunun için ticari olarak satışa sunulan ve AWS A 4.2'ye göre kalibre edilmiş olan ve ferrit numarasının direkt olarak okunabildiği manyetik ölçüm cihazlarından, ferriteskoplardan ve benzeri cihazlardan yararlanılabilir. Ferrit miktarının sıcak çatlak oluşumundan korunmak için gereken orandan daha yüksek olmamasında ve belirli güvenlik sınırları içerisinde tutulmasında yarar vardır. Çünkü ferrit, bazı korozyon ortamlarında, malzemelerin korozyon dayanımını düşürür ve yapıdaki aşırı ferrit miktarı süneklik ve tokluğu azaltır [1].

3.2.3. Sigma fazı oluşumu

Alptekin'in [70] çalışmasında belirttiği gibi Sigma fazı sadece ferritik kromlu paslanmaz çeliklerde görülmemektedir. %9'dan daha az nikel içeren ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak bölgesinde oluşması, bu tür çeliklerin de kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. 550°C–925°C sıcaklık aralığında oluşan sert, kırılabilir ve manyetik olmayan bir metaller arası bileşiktir. Yapılan analizlerde

bileşiminde %52 krom, %48 demir ve bunların yanında molibden gibi diğer alaşım elementlerinin de içerdiği görülmüştür [9]. Sigma fazı, kromlu veya krom-nikel esaslı paslanmaz ve ısıya dayanıklı çeliklerin kaynak bölgesinde oluşmaktadır. Sigma fazının sertliği 800 Hv-1000 Hv arasındadır ve oluşabilmesi için ostenitik yapı içinde bir miktar da ferrit bulunması gerekir. Bu faz genellikle çeliğin, alaşımın bileşimine göre 650°C–900°C arasında ve uzun süre tutulması sonucu ferritten dönüşmesiyle oluşmaktadır. Sigma fazı kırılgenliği da 650°C–850°C sıcaklıklar arasında görülmektedir. Bahsedilen bu sıcaklık aralığında kalma süresi ile oluşan yapının yoğunluğu arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 3.6 a ve b’de bu ilişki görülmektedir. Faz dönüşümün en yoğun olduğu sıcaklık 720°C civarındadır [70]. Yapılan çeşitli araştırmalar sigma fazı dönüşümü 750°C’de 30 saat sürede olmaktadır. Buna karşılık 650°C’de bu fazın dönüşümü için 170 saat süre gerekmektedir. Sigma fazının oluşumu soğuk şekillendirme ile hızlanmakta olup oluşuma molibden, krom, niyobyum, silisyum kuvvetli bir şekilde tesir etmektedir. Sigma fazı 950°C–1050°C sıcaklıklar arasında belirli bir süre tavlandıktan sonra soğutularak giderilmektedir [62]. Sigma fazının neden olduğu gevrekleşme kaynak metalinin ve kaynak yerinin tavlamaya tabi tutulmadan önceki içerdiği ferrit miktarına bağlıdır. Kaynak yeri başlangıcında %6,5 ferrit içerdiğinde sigma dönüşmesi çentik darbe mukavemetinin düşmesine neden olmaz bu durum ferrit miktarının az olduğunda ostenitik yapı içerisinde ağ şeklinde değil, izole edilmiş odacıklar halinde bulunmaktadır. Bu şekilde elde edilen sigma fazı yapıya süreklilik kazandırmaktadır [62]. Yapıda bulunan ferrit miktarının %3-4 ile sınırlı tutulması durumunda, ostenit tanelerinin etrafı ferrit ile çevrilemeyecek ve kırılgenlik riski önlenecektir. Buna karşın ferrit miktarının %12’yi geçmesi ile birlikte esneklik kabiliyeti hızla azalacaktır. Sigma fazının oluşumu aşağıdaki gibi olmaktadır. Saf ostenitik yapı bir malzeme belirli bir sıcaklıklar arasında tavlendiğinde önce karbür ayrışması meydana gelmekle ve karbürler kendilerine çok yakın olan krom ve molibden gibi büyük atom grupları bakımından zenginleşmektedir. Bunların difüzyon hızı karbonun hızından düşük olduğundan, karbon difüzyonu karbür meydana gelmektedir. Oluşan ferrit bahsedilen sıcaklıkta dengede olmadığından yeni bir faza dönüşmektedir.

Ferritin sigma fazına dönüşmesi sonucu kaynak dikişinde oluşan çatlama eğilimi gösterir. Kaynak işlemi sırasında banyonun çok hızlı soğuması ve katılaşması nedeni ile sigma fazı kolay oluşmamaktadır. Bu sorun esas olarak ferrit içeriği çok yüksek olan bir kaynaklı bağlantının kaynak işleminden sonra uzun süre yüksek sıcaklık değerlerinde kalacak bir çalışma ortamında kullanılması durumunda karşımıza çıkar.



Şekil 3.6. Paslanmaz çeliklerde sıcaklık ve zamana bağlı sigma fazı oluşumu a)780°C 'da 100 saat ısıl işlem uygulama sonrası x1600 içyapı incelemesi b)780 °C'da 500 saat ısıl işlem uygulama sonrası x1600 içyapı incelemesi [1]

Sigma fazı konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Sigma fazının oluşumu 750°C'de, 650°C'de kinden daha çabuk meydana gelir. 750°C'de 30 saat gibi bir zamana gereksinim varken bu süre 650°C'de 1 haftaya çıkar.
- Sigma fazı oluşumu soğuk şekil değiştirme ile hızlanır.
- Sigma fazı oluşumuna kuvvetli olarak etki eden elementler: molibden, krom, niyobyum ve silisyumdur.
- Sigma oluşumunu kuvvetlendiren elementlerin miktarı yüksek ise, belirli şartlar altında, kaynağa bağlı olmadan ve ısıl işlem uygulamadan da sigma fazı meydana gelebilir.
- Sigma fazı, 950°C- 100°C sıcaklıklar arasında belirli bir süre tavlandıktan sonra, suda hızlı olarak soğutularak giderilebilir.
- Sigma fazının giderilmesi için uygulanan ısıl işlemde sonra oluşan yapıdaki ferrit miktarı, ısıl işlem uygulanmamış yapıdakine oranla daha azdır.
- Ferrit miktarı, parçaya 1150°C'de homojenleştirme tavlama uygulanarak daha da düşürülebilir. Bu durumda ferrit mikro toplanmalar şeklinde oluşur.

- Isıl işlem uygulanmamış 19Cr/9Ni/1.5Mo tipi çeliğe ait kaynak bölgesinin yapısında bulunan %15 ferrit sigma fazına dönüşünce, çekme dayanımı yükselmekte ve akma sınırı düşmektedir. Ayrıca, uzama, büzülme ve çentik dayanımları önemli derecede azalmaktadır. 24 saat 750°C'de tavllanmış olan kaynak bölgesinin 0°C'deki çentik dayanımı, 650°C'de bir hafta tavlanan kaynak yerinin çentik dayanım değerleri yaklaşık olarak aynıdır. Buna karşın, yapısında %12 ferrit bulunan kaynak bölgesinin çentik dayanımının 1/10'u kadardır. Aradaki bu fark, yüksek sıcaklıklarda daha da azalmaktadır.
- 300°C- 400°C'nin üzerinde oldukça iyi çentik değerleri elde edildiği için, yüksek işletme sıcaklığında çalışan konstrüksiyonlarda, sigma fazının neden olduğu gevrekleşmeden korkulmamalıdır.
- Sigma fazının neden olduğu kırılmalık, kaynak bölgesinin tavlama yapılmadan önceki durumunda içerdiği ferrit miktarına bağlıdır. Eğer kaynak bölgesi başlangıçta % 6,5 ferrit içerirse, sigma dönüşmesi çentik darbe dayanımının azalmasına neden olmaz. Burada ferrit miktarı az olduğu için, ferrit ostenitik yapı içerisinde ağ şeklinde değil, izole edilmiş odacıklar halinde meydana gelir.
- Bu yolla elde edilen sigma, yapıya bir süneklik kazandırmaktadır [1, 70].

3.3. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kullanılan Kaynak Teknikleri

Paslanmaz çelikler, uygulamadaki tüm kaynak yöntemleri ile uygun bir şekilde birleştirilebildiği söylenebilir. Kaynak yönteminin tercih edilmesinde aşağıdaki faktörler göz önüne alınır:

- Cihazların varlığı, kurulması ve kullanılabilirliği,
- Malzemenin kalınlığı,
- Kaynağın gerçekleştirileceği ortam,
- Kaynak pozisyonu,
- Paslanmaz çelik malzemenin türü,
- Yardımcı donanım ve ekipmanların durumu ve sağlanması [41].

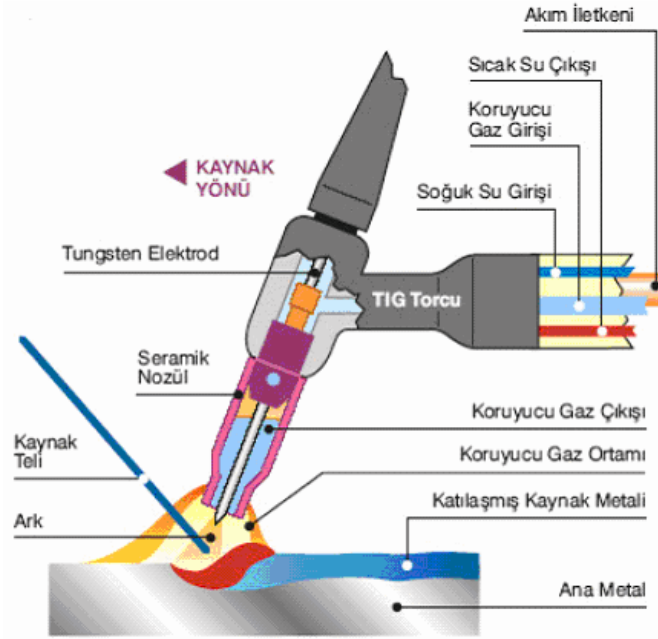
Paslanmaz çeliklerin birbirleri ile veya farklı malzemeler ile birleştirilmelerinde kullanılan kaynak yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Gaz ergitme kaynağı
- Örtülü elektrot ile ark kaynağı
- Eriyen elektrot ile gaz altı kaynağı (MIG)
- Erimeyen elektrot ile gaz altı kaynağı (TIG)
- Plazma arkı ile kaynak
- Tozaltı kaynağı
- Elektron ışın kaynağı
- Lazer ışın kaynağı
- Direnç nokta veya dikiş kaynağı
- Sürtünme kaynağı
- Difüzyon kaynağı

Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan yöntem olan erimeyen elektrot ile gazaltı kaynak yöntemi detaylı olmak üzere paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan kaynak yöntemlerinden bahsedilmektedir.

3.4. TIG Kaynağı

Bu yöntemde kaynak için gerekli olan ısı enerjisi tungsten elektrot ve iş parçası tarafından sağlanmakta olup, kaynak bölgesini havanın olumsuz etkilerinden korunması için koruyucu gaz kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemi ABD (Amerika Birleşik Devletleri)'de "heliark" Avrupa da "argon ark"olarak isimlendirilmiştir [8, 44, 71]. Şekil 3.7'de kaynak yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.7. TIG Kaynağının prensip şeması [8]

TIG kaynak yöntemi kaynakçı tarafından kullanılması kolay olup prensip olarak gaz eritme kaynağına oldukça benzemektedir olup bu kaynak yöntemi çok geniş uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemde erimeyen elektrot kullanıldığından bazı durumlarda ilave kaynak metaline gerek olmadan birleştirme yapılabilir. Gerekli olduğunda gaz kaynağında olduğu gibi ilave metal kullanılmaktadır [42, 72]. Endüstride bu kaynak yöntemi daha çok kök pasoların çekilmesinde ve tamir işlerinde kaynakçıya büyük kolaylık sağladığından kullanım alanı genişlemektedir. TIG kaynak yöntemini prensip olarak her kalınlık ve her pozisyondaki parçalara uygulanabilmekte olup, daha kalın parçalar için uzun süreli işlemler gerektiğinden ekonomik olmamakta ve tercih edilmektedir. Bundan dolayı 7 mm'den daha kalın parçaların birleştirilmesinde önerilmemekle beraber bu kaynak yöntemi ile çok kaliteli, daha güvenli ve dikkate değer birleştirmeler sağlanabilmektedir. Bu nedenle uçak ve uzay endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulunmaktadır. Akım şiddeti azaltılarak diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi imkânsız olan çok ince saçlar bu yöntemle kaliteli bir şekilde birleştirilebilmektedir. Hatta 0.1 mm kalınlığına sahip parçalar bile kaynak edilebilmektedir [4, 42].

Bu yöntem genellikle hafif metallerin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Çeşitli ebatlardaki torçlar kullanılarak 15 mm'ye kadar kalınlıktaki parçaları kaynatmak

mümkündür. Bu yöntemde yukarıdan aşağıya doğru dikey ve tavan kaynaklarının da uygulanması mümkündür. Yüksek miktarda çinko ihtiva eden bronzlar, titanyum alaşımları, zirkonyum, uranyum gibi kaynak kabiliyetleri zayıf metaller de bu yöntemle gözeneksiz olarak kaynatılabilir. TIG kaynak yönteminin kullanıldığı önemli alanlar şunlardır [44]:

- Her çeşit alüminyum konstrüksiyonlar; mutfak takımları, boru tesisatları, tanklar, taşıt imalatı, teleferik kabinleri, gemi inşaatı v.s.
- Paslanmaz çelikler; kimya ve gıda sanayinde kullanılan cihazlar, buzdolabı, boru tesisatı, tıbbi aletler, ısı eşanjörleri, tanklar, gaz ve buhar türbinleri, meme donanımları, uçak motorları, kaynatma kazanları, çamaşır makineleri v.s.
- Dezokside edilmiş bakır ve alaşımları; kimya endüstrisinde ve elektro-teknikte kullanılan bakır donanımlar v.s.
- Sert tabaka dolgu kaynağı; subapların oturma yüzeyleri, aşınan parçaların doldurulması v.s.
- DKP çelik saclar; karoseri işleri, çok ince saclarla yapılan konstrüksiyonlar, uçak inşaatı v.s.
- Özel işler; transformatör sacları, çinko kaplı saclar, atom reaktörlerini inşasında kullanılan çeşitli parçaların imalatı v.s.

TIG kaynak yönteminin avantajları şunlardır:

- Bütün metal ve alaşımları rahatlıkla kaynatılabilir. Paslanmaz çelikler, ısıya mukavim çelikler, dökme demir ve çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımları, titanyum, nikel, molibden, niobyum, tungsten gibi malzemeleri bu yöntemle etkili ve rahat bir şekilde birleştirilebilir.
- Bu yöntemle yapılan birleştirmelerde mukavemet ve kalite bakımından mükemmel dikişler elde edilir.
- Kaynak işlemi esnasında herhangi bir dekapana ihtiyaç yoktur.
- Kaynak dikişleri genellikle kaynaktan sonra olduğu gibi kullanılmaktadır.
- Çok küçük alanın ısıtılması ve ısının sürekli transferi dolayısıyla diğer yöntemlerle kıyaslandığında çarpılmalar daha azdır.
- Tungsten elektrodla dikişte çok az bir karbür ayrışması meydana gelebilir.
- Her çeşit birleştirme, dizayn şekli uygulanabilir ve her türlü pozisyonlarında

yatay, dik ve tavan gibi rahatlıkla kaynak yapılabilir.

- Kaynak torcu hafif olduğundan rahat bir çalışma imkanı sağlar.
- Bu yöntem sayesinde ayrı cins metalleri ve alaşımları birbirleriyle kaynatılması mümkündür.
- TIG kaynak yönteminde genellikle koruyucu gaz olarak argon kullanılır.
- Kaynak dikişi üzerinde herhangi bir şekilde cürufle karşılaşmaz.

Ayrıca TIG kaynak yöntemde kaynak süresince kaynakçı kaynak banyosunu çok iyi bir biçimde görebilmekte, dolayısı ile de kontrol altında tutulabilmektedir; banyo üzerinde curuf olmayışı da dikişte curuf kalma tehlikesini ortadan kaldırmaktadır. TIG kaynak yönteminin diğer bilinen ve endüstride sıkça uygulanan eritme kaynağı yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, ısı girdisinin ve eriyen ek kaynak metali miktarının birbirlerinden bağımsız oluşudur. Bu önemli özellik yöntemin çok ince parçalara uygulanabilmesine olanak sağlamakta, kök pasoların çekilmesinde, pozisyon kaynaklarında ve tamir işlerinde de kaynakçıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

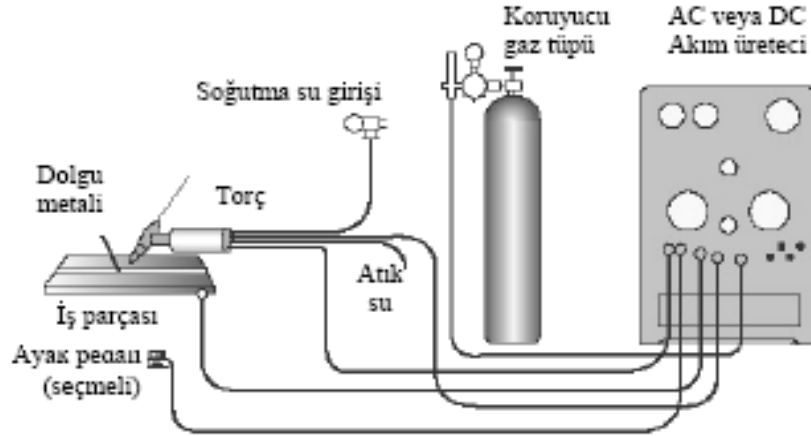
Diğer taraftan TIG kaynak yönteminin dezavantajları ise şunlardır:

- TIG kaynağının metal yığılma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine kıyaslandığında oldukça düşüktür.
- Kalın kesitli malzemelerin birleştirilmesinde kullanıldığında ekonomik bir yöntem değildir.
- Koruyucu gaz mutlaka kullanılmalıdır.
- Kirliliğe hassas olduğundan yüzey temizliğine dikkat edilmesi gerektirir.
- Açık havada ve etrafı korumasız ortamlarda herhangi bir tedbir alınmadan etkili kullanılmaları oldukça zordur.
- Kimyasal yapı düzeltilemez [44, 73].

3.4.1. TIG kaynak donanımı

Şekil 3.8’de TIG kaynak donanımının şeması verilmektedir. Şekil’den de görüldüğü gibi bu donanım; akım üretici, koruyucu gaz tüpü, gaz basınç debi ayar donanımı,

torç ve kontrol panelinden oluşmaktadır. Yüksek akım şiddetleri durumlarında torcu soğutmak için soğutma suyu devresi kullanılmaktadır. TIG kaynak yönteminde el ile kaynak yapıldığı gibi yarı otomatik, otomatik kaynak yöntemlerinde kullanılmaktadır [41, 74].



Şekil 3.8. TIG kaynağının donanım şeması [8]

Bir TIG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur [8] :

1. Kaynak hamlacı diye de adlandırılan bir 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, 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 donanımı ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan koruyucu gaz tüpü.

3.4.2. TIG kaynağında kullanılan kaynak elektrotları

TIG kaynak yöntemi ile diğer kaynak yöntemleri arasında en önemli fark ek ilave elektrotun kullanılması ve elektrotun sadece ark oluşturma işlemi gerçekleştirmesidir. Bundan dolayı erime sıcaklığı 3350°C olan tungsten elektrot kullanılmaktadır. Bu elektrotlar yüksek ergime sıcaklığına sahip olmakla beraber çok

önemli bir elektrot yayıcı olup yayınan elektrotlar ark sütunu içinde elektrik akımı oluşturmakta ve ark sütunundaki atomları iyonize ederek arkın kararlılığı sağlamaktadır. TIG kaynak elektrotları AWS (Amerikan Kaynak Derneği), DIN (Alman Standart Enstitüsü) göre sınıflandırılmış ve bunların birbirinden kolayca ayırt edilebilmesi için uç kısımları çeşitli renklere boyanarak belirlenmesinde farklı renk kodları kullanılmıştır [8, 42].

3.4.3. TIG kaynağında kullanılan ilave kaynak metalleri

Paslanmaz çeliklerin kaynağında MIG kaynağında olduğu gibi DIN, AWS ve TS 11797 göre tanımlanmış olan belirli çap ve boylarda TIG kaynak ilave telleri kullanılmaktadır. Tablo 3.2’de paslanmaz çeliklere ait bazı TIG ilave malzemelerinin kimyasal bileşenleri verilmektedir [1, 42].

Tablo 3.2. Bazı paslanmaz çeliklere ait TIG ilave tellerin kimyasal bileşenleri [1, 42]

İlave Tel	C	Cr	Ni	Mo	Cb&Ta	Mn	Si	P	S	Cu
ER308L	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75		1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	0.75
ER308LSi	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75		1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03	0.75
ER309L	0.03	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75		1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	0.75
ER309LSi	0.03	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75		1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03	0.75
ER316L	0.03	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0		1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	0.75
ER316LSi	0.03	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0		1.0-2.5	0.65-1.00	0.03	0.03	0.75

3.4.4. TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazlar

Gazaltı kaynak yöntemlerinde kullanılan gazların fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.3’de verilmektedir. Bu gazlar argona belirli oranlarda katılmaktadır. Kaynak arkında en yaygın olarak oluşan sıcaklık aralığı olan 3000°C–4500°C arasında hidrojenin iletkenliğinin argonun iletkenliğinden yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğu görülmektedir [42, 75]. Arkın ısıl iletkenliği, arkın şekli ve kaynak işleminin hızı açısından önemlidir.

Argon ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında en çok tercih edilen gazdır [1, 4, 8]. Gazaltı kaynak yöntemlerinde kullanılan argon tek atomlu renksiz, kokusuz, tatsız ve zehirli olmayan bir soy gazdır. Her ne kadar atmosferde % 0,934 oranda bulunmasına rağmen ekonomik olmasından dolayı argon atmosferden elde edilmektedir. Havadan % 38 daha ağır bir gaz olup ergimiş kaynak banyosunu ve arkın çok etkili kararlı olmasını sağladığından özellikle yatay kaynak pozisyonlarında kaynak esnasında etkili bir örtü oluşturarak kaynak banyosunu çok iyi bir şekilde korumaktadır. Argon düşük iyonizasyon enerjisine sahip olduğundan argon atmosferi altında ark tutuşması daha kolay ve güvenilir olmaktadır [76]. Argon gazının en büyük avantajı akış hızının büyük olması ve buna bağlı olarak kararlı ark tutuşması ve ark voltajının daha düşük olmasıdır. Düşük voltaj kullanıldığından dolayı ince saçlar yanık olmadan kaynakla birleştirilmektedir [77].

Tablo 3.3. Gazaltı kaynaklarında kullanılan gazların kimyasal ve fiziksel özellikleri [19, 42]

Gaz tipi	Havadaki içerik (%hacim)	1.013 bar'da kaynama noktası (°C)	Atomik ağırlık ve ortalama molekül ağırlığı	15 °C ve 1 bar'da yoğunluk (kg/m ³)	15 °C ve 1 bar'da havaya (-1) göre bağıl yoğunluk	Ayrılma ve iyonizasyon enerjisi (eV) ^c	Kimyasal davranış
Hidrojen (H ₂)	0.5×10 ^{-6a}	-252.9	2.016	0.085	0.06	4.48 13.59 -	İndirgeyici
Argon (Ar)	0.934	-185.9	39.948	1.669	1.38	- 15.76 27.50	İnert
Helyum (He)	5.2×10 ^{-6a}	-268.9	4.002	0.167	0.14	- 24.56 54.10	İnert
Azot (N ₂)	78.084	-195.8	28.013	1.170	0.91	9.76 14.55 29.60	Reaktif
Karbondiyoksit (CO ₂)	0.033 ^a	-78.5 ^b	44.011	1.849	1.44		Oksitleyici
Oksijen (O ₂)	20.946	-183.0	31.998	1.337	1.04	5.08 13.62 35.20	Oksitleyici

^a Atmosferden elde edilmemiştir.

^b Buharlaştırma sıcaklığı.

^c 1 eV = 1.6×10⁻⁶ J; 6 ve 9 eV arasındaki değerlerde başlıca metallerin iyonizasyon enerjisi

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında argon çok tercih edilir. Argona hidrojen eklenmesi ile kaynak hızı ve nüfuziyet artar. Bununla beraber daha

temiz ve kaliteli dikişler elde edilmiş olur. Mekanize kaynak işlemlerinde, özellikle yüksek kaynak hızları istendiği durumlarda He, He+Ar veya Ar+H₂ karışım gazları önerilir. Örneğin; sürekli boru kaynaklarında He+Ar veya Ar+H₂ koruyucu gazları saf argona tercih edilir, zira yüksek kaynak hızlarında üstün özelliklere sahip kaynak dikişlerinde yanma oluşu tehlikesi azalır. Hatta incelemeler sonucu, He'ca zengin gazlar, örneğin % 80 He+% 20 Ar veya % 5H₂ eklenen Ar+He karışımları (% 70He+%25Ar+%5H₂) kullanılması halinde çeliğin üretiminden gelen bileşim değişimlerinden kaynaklanan nufuziyet farklılıkların da giderildiği saptanmıştır [9, 22].

3.5. Kaynak Parametreleri

Kaynak parametreleri kaynak işlemine ve elde edilen kaynak bağlantısının kalitesine önemli derecede etkilemektedir. Metal veya metal alaşımları ile kaynak ilave metalinin kaynak türü, kaynak ağız türü, kaynak ağız ve parça geometrisi dikkate alınarak kaynak parametreleri belirlenmektedir. Uygun parametrelerin seçimi ile kaynak bağlantısının arzu edilen özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır [78, 79]. Kaynak parametreleri, kaynak öncesinde belirlenen ve kaynak işlemi esnasında değiştirilemeyen parametreler ile birinci ve ikinci dereceden ayarlanabilir parametreler olmak üzere üç grupta incelenebilir. Kaynak öncesi belirlenen parametreler elektrot türü, elektrot çapı ve kaynak akımı türü sayılabilir. Birinci derecede ayarlanabilir parametreler kaynak işlemi kontrol altında tutan parametreler olup, kaynak dikişinin biçimini, yüksekliğini, nufuziyetini, ark dengesini ve kaynak bağlantısının mukavemetini etkileyen parametrelerdir. Bunlar kaynak akım şiddeti, ark boyu ve kaynak hızıdır. İkinci dereceden ayarlanabilir parametreleri ise, elektrot serbest uzunluğu ve parçanın yatay düzlem ile olan eğimidir. Bu değişkenlerin ölçümü zor olup kaynak dikişine etkileri daha azdır. Üçüncü gruba giren bu parametreler kaynak işlemi esnasında değiştirilebilen, kaynak dikişinin biçimini etkileyen, ölçümleri zor olan parametreler olup, kaynak işlemi esnasında elektrotun konumu, çalışma ve hareket açıları sayılabilir [78, 79].

TIG kaynak yöntemlerinde de kaynak parametreleri üç grupta incelenmektedir. Kaynak öncesi belirlenen parametreler TIG kaynak yönteminde, erimeyen elektrot

malzemesi, elektrot çapı, elektrot uç biçimi, geometrisi ve koruyucu gazdır. Bu parametreler kaynak edilecek parçanın kalınlığı, geometrisi, kaynak ağzı dikkate alınarak belirlenmektedir.

3.5.1. TIG kaynak yönteminde erimeyen elektrot

Erimeyen elektrot türü genelde kaynak metalinin türüne göre seçilmektedir. Saf tungsten elektrotların akım taşıma kapasiteleri düşük olup, kaynak esnasında kirlenmeye ve kaynak dikişinde kalıntı bırakmaya meyillidirler. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında alüminyum alaşımlarının alternatif akım ile birleştirilmesinde saf tungsten elektrotlar daha uzun ömürlü olduklarından tercih edilirler. Toryum ile alaşımlı elektrotlar yüksek akım kapasiteleri, uzun ömürleri, kirlenmeye karşı dirençleri, arkın tutuşma kolaylığı ve oluşan arkın dengeli olmasından dolayı tercih edilir. Zirkonyum alaşımlı elektrotlar ise alternatif akım ile daha üstün karaktere sahip olduklarından alüminyum ve magnezyum alaşımlarının birleştirilmesinde tercih edilirler [78].

TIG kaynak yönteminde elektrotun çapı kullanılacak akım türüne göre seçilmektedir. Erimeyen elektrotun akım yüklenebilirliğini bileşim ve çap, uygulanan akım türü, kutuplama, elektrot serbest ucu ve kullanılan koruyucu gaz etkilemektedir. Daha önceden belirlenen bir akım şiddeti için doğru akım kullanıldığında elektrotun pozitif kutba bağlanması ısı yükü nedeniyle daha büyük çaplı elektrot gerektirmektedir. Akım türünün seçilmesinde en önemli faktör kaynatılan malzemenin cinsidir. Doğru akım elektrot pozitif ince alüminyum ve magnezyum parçaları için uygundur. Bu tür çalışmada arkın oksit temizleme özelliği iyi olup, nufuziyeti az geniş kaynak dikişleri elde edilir.

Koruyucu gazın türü kaynak dikişinin nufuziyetini, ısı girdisini ve kaynak dikişinin maliyetini etkileyen önemli bir faktördür. TIG kaynak yönteminde en fazla kullanılan gaz argondur. Argon helyuma göre daha az nufuziyet ve daha düşük ısı girdisi sağlamaktadır. Helyum daha çok ısıl iletkenliği yüksek olduğundan özellikle kalın kesitli parçaların kaynağında tercih edilmektedir.

3.5.2. Birinci derecede ayarlanabilir parametreler

Kaynak dikişinin karakteristiklerinin belirlenmesinde en önemli faktör kaynak akım şiddetidir. Her çaptaki elektrot belirli bir kaynak akım şiddeti aralığına sahiptir. Akım şiddetinin artmasına paralel olarak kaynak dikişinin nufuziyetide artmaktadır. Buna karşılık akım şiddetinin aşırı yükselmesi sıçramaların artmasına, yanma oluklarının oluşmasına, düzgün olmayan kaynak dikişine ve dikişte çatlakların oluşmasına neden olabilir. Kaynak akım şiddetinin azalması eriyen metal miktarına ve nufuziyetin azalmasına neden olmaktadır. Kaynak dikişinin biçimine göre en önemli etkilerden birini kaynak akım şiddeti yapmaktadır. Erimeyen elektrotun türü, tipi, çapı, akımın türü, kaynak pozisyonu, ağız biçimi, parçanın kalınlığı ve kaynak akım üreticinin gücü, akım şiddeti seçimini sınırlayan faktörlerdir. Kaynak akım şiddeti dikişin nufuziyetini ve dikişin biçimini etkileyen ana faktörlerden biridir. Akım şiddetinin artması kaynak dikiş nufuziyetinin artmasına neden olmaktadır. Akım şiddetinin gereğinden yüksek olması kaynak dikişinin düzgünlüğünün bozulmasına ve yanma oluklarının oluşmasına neden olmaktadır. [78].

Ark gerilimi koruyucu gazın türü ile ark boyuna bağlı olarak değişmekte olup, el ile yapılan kaynak işleminde ark boyu kaynakçı tarafından ayarlanmakta, otomatik kaynak halinde ise elektrot ucu ile iş parçası arasındaki mesafe değiştirilerek ark gerilimi ayarlanmaktadır. Ark gerilimine en büyük etki ark boyu tarafından yapılmakta olup, uzun ark (yüksek ark) gerilimi ile çalışma durumunda nufuziyet azalmakta, koruyucu gaz kaynak banyosunu gerektiği şekilde koruyamadığından kaynak dikişi gözenekli olmakta ve renklenme gözlenmektedir. Ark boyunun kısılması durumunda nufuziyet ve elektrotun kaynak banyosunda kirlenme riski artmakta, aşırı ısınmadan dolayı torcun gaz lülesi ve elektrotun serbest ömrü kısalmaktadır. Kaynak hızı, kaynak arkının, iş parçası üzerindeki hızıdır. Aynı akım şiddeti ve ark gerilimi halinde hızın azalması iş parçasına olan ısı girdisini artmaktadır. Kaynak hızı kaynak dikişinin biçimini ve nufuziyetini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Kaynak hızının artması kaynak dikişinin genişliğinin azalmasına ve optimum bir değere kadar nufuziyetin artmasına neden olmaktadır. Aşırı hız kaynak dikiş nufuziyetinin ve boyutlarının azalmasına, kaynak şeklinin bozulmasına

neden olurken, kaynak hızının yavaş olması halinde kaynak dikiş boyutlarının aşırı artmasına ve dikiş üzerinde kaynak metalinin taşmasına neden olmaktadır [78].

3.5.3. İkinci dereceden ayarlanabilir parametreler

Elektrot açıları kaynak dikişinin biçimini etkileyen faktörlerden biridir. Kaynak dikişinin kalitesini etkilemekte, dikişin düzgünlüğünü ve asimetrikliğinin bozulmasına neden olmaktadır. Elektrotun iş parçası ile yaptığı açı kaynak dikiş biçimini etkileyen faktörlerden biridir. Otomatik TIG kaynağında çalışma açısı 0° olarak belirlenmekte olup el ile yapılan kaynakta bu açı 20° civarındadır. Hareket açısı el kaynağında normal şartlarda $20^\circ - 30^\circ$ civarında olup bu açı 0° dereceye doğru yaklaştıkça nufuziyet azalmaktadır. Açının artması ise kaynak dikiş yüksekliğinin artmasına neden olmaktadır. Hareket açısının negatif olması durumunda kaynak dikişinin nufuziyeti azalmakta ve genişliği artmaktadır. Hareket açısı sadece otomatik kaynak yönteminde negatif seçilebilir [78]. Elektrot serbest uç uzunluğu elektrotun torç gaz lülesi dışında kalan kısmın uzunluğu olup elektrot çapının bir veya iki katı seçilmektedir. Elektrot ucunun uzunluğunun büyümesi elektrotun kaynak banyosu ilave kaynak metali tarafından kirlenme riskini ve kaynak banyosunun koruyucu gaz tarafından yeterince korunmamasına neden olmaktadır. Elektrot serbest ucunun kısa tutulması halinde torcun gaz lülesinden yansıyan ışınlar elektrotun aşırı ısınmasına neden olmaktadır. Uzun serbest uçları köşe kaynağında ve 'V' kaynak ağzı açılmış kalın kesitli parçaların kök pasolarında kullanılır [78].

3.6. Kaynak İşleminde Enerji ve Isı

Kaynak dikişinin kalitesi, iyi bir nufuziyet, iyi bir ısılatma ve düzgün bir kaynak profili ile belirlenmektedir. Bu bahsedilen özellikler sağlanarak kaliteli bir birleşmenin sağlanması için belirlenen parametreler genelde akım, gerilme, kaynak ilerleme hızı ve açısı yanında kaynak dikişinin de önemli şekilde etkisi bulunmaktadır. Tek pasolu kaynak dikişlerinde, şiddetli türbülans dolaylı ana metal ile ilave metal birbirlerine iyice karışarak homojen yapı göstermektedirler. Karışım bölgesini çevreleyen ve esas metal ile ilave metalin karışımına katılmadan katılan ve sadece ana metalden oluşan bölge karışmamış bölge olarak

isimlendirilmektedir. Bahsedilen bölgenin kalınlığı kaynak yöntemine ve soğuma hızına bağlı olarak 0,05–2,5 mm arasında değişmektedir [10, 78, 80].

Enerji bölgesinin katılaşması çevresindeki ana metale ısı iletimi sonucu gerçekleşmektedir. Isı ergiyen bölgeden ana metale doğru hızlı bir şekilde aktığından dolayı, ana metale yakın olan noktalarda çok sayıda çekirdek oluşmaktadır. Tek pasolu kaynak bağlantılarında dentritik taneler sıvı/katı faz sınırına dik olarak kaynak banyosunun ortasına doğru büyümektedir.

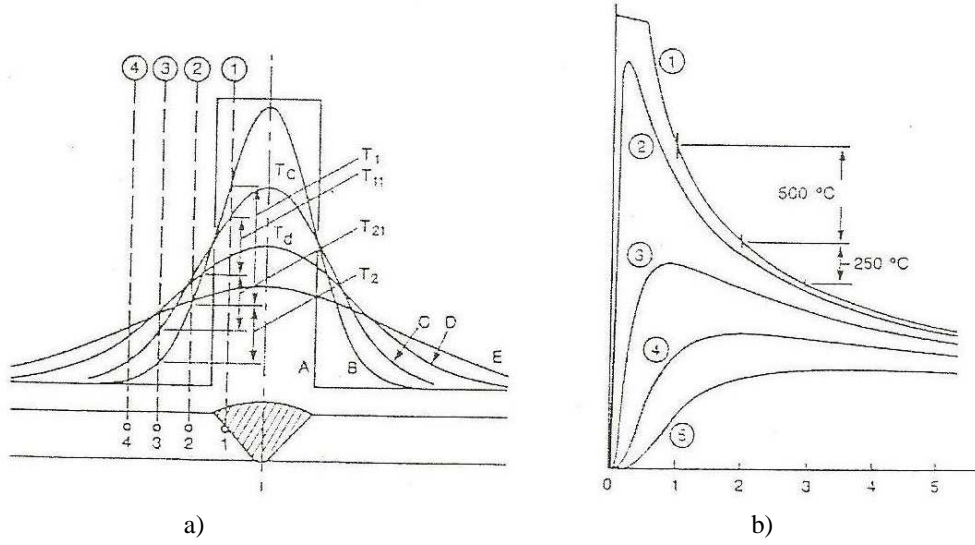
Metalik malzemeler kaynak edildiklerinde, ergime bölgesinin hemen yanında ısıdan etkilenen bölge bulunmaktadır. Isıl çevrimin etkisi altında kalarak, içyapı değişikliğine uğrayan bölgeye ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) adı verilmektedir. Bütün ergime kaynaklarında böyle bir bölge oluşmaktadır. Oluşan bu bölgenin boyutları kaynak işlemi esnasında uygulanan ısı girdisine, soğuma hızına, kaynatılan parçanın boyutlarına ve malzemenin ısı iletim katsayısına göre değişmektedir. Bu faktörlerin bazıları değiştirilerek ITAB bir dereceye kadar kontrol altına alınabilir. Çeliklerin kaynağında ısı tesiri altında kalan bölgenin içyapısı tane büyüklüğü açısından iri taneli bölge, ince taneli bölge, kısmen dönüşmeye uğramış bölge ve içyapı değişikliğine uğramış bölge olmak üzere dört farklı bölge oluşmaktadır [9, 78, 79]. İri taneli bölge erime bölgesine bitişik olan ve kaynak işlemi esnasında 1150°C–1450°C kadar ısınan bölgedir. Bu sıcaklık aralığında taneler büyümektedir. Tanelerin büyüme hızı sıcaklığa paralel olarak artmaktadır ve metalin solüdis sıcaklığına yaklaştıkça büyüme oldukça hızlanmaktadır. İri taneli yapılar daha gevrek ve kırılğandır. İnce taneli bölge kaynak esnasında 900°C–1150°C arasında bir sıcaklığa kadar ısınan bir bölge olup tane büyümesi olmamaktadır. Kısmen dönüşmüş bölgede ise A₃-A₁ sıcaklığa kadar çıktığından bu bölge kısmen ostenitizasyona uğramaktadır. A₁ sıcaklığının altındaki dereceye kadar ısınmış olan bölgelerde her hangi bir iç yapı değişikliği olmamaktadır [78, 81].

3.6.1. Kaynak esnasında oluşan ısıl çevrimler

İpek'in [78] çalışmasında bu konuyu açıklamıştır. Çeliklerin kaynağında ITAB'ın özelliklerinin önceden belirlenebilmesi için kaynak ile birleştirilen malzemenin

kimyasal bileşiminin, kaynak öncesi maruz kaldığı ısı çevrimlerin, kaynak esnasındaki sıcaklık dağılım ve değişimlerin bilinmesi gerekmektedir. Kaynak işlemi esnasında meydana gelen ısı değişimleri ısıtma hızı, tepe sıcaklığı sıcaklık dağılımı, tepe sıcaklığına maruz kalınan süre ve soğuma hızı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Kaynak işleminde hem malzemenin kaynak edilmesi esnasında hem de soğuması esnasında sürekli bir ısı yayılımı olmaktadır [80]. Şekil 3.9 a'da bu durum gösterilmektedir, A eğrisinde herhangi bir ısı yayılımı olmamakta ve kaynak bölgesindeki sıcaklık malzemenin ergime sıcaklığının üzerinde ve ana metalde herhangi bir sıcaklık artışı olmamaktadır. Ancak bu durum gerçekçi bir yaklaşım değildir [81].

Kaynak esnasında enerji girdisi kesilmesinden sonra B eğrisinde gösterildiği gibi kaynak bölgesinde oluşan ısının daha soğuk olan ana metale doğru akmakta ve kaynak bölgesindeki tepe sıcaklığı düşmektedir. C eğrisinde ise ergimiş bölgeden ana metale olan ısı akışı daha fazla olmakta eriyen kaynak metalindeki tepe sıcaklığının daha düştüğü ve ana metalde ise sıcaklık değerlerinin daha da arttığı görülmektedir. D ve E eğrilerinin eriyen bölgedeki tepe sıcaklığının daha çok düştüğü ve ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin arttığı görülmektedir. Sıcaklık dağılımının soğuma üzerindeki etkisi Şekil 3.9 b'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kaynak işlemi esnasında ısı girdisi nedeniyle 1 numaralı bölgenin sıcaklığı çok yükselmekte ve hızlı soğuma meydana gelmektedir. 2 numaralı eğriye bakıldığında, bu bölgede ulaşılan tepe sıcaklığının daha düşük olduğu, soğuma hızının da daha yavaş olduğu anlaşılmaktadır. 3 ve 4 numaralı eğrilerde tepe sıcaklığı düşmekte ve hem ısıtma hem de soğutma hızları azalmaktadır. Kaynak yöntemleri, kullanılan koruyucu gazlar ve kaynaklı birleştirme yapılan ana metalin sahip olduğu ısı iletme katsayıları kaynak metalinde ulaşılan tepe sıcaklığına ve ITAB genişliğini etkilemektedir.



Şekil 3.9. a) Kaynak bölgesindeki ısınma eğrisi b) ITAB bölgesindeki ısı yayılımını [81]

Isı girdisi birim uzunluktaki kaynağı yapabilmek için harcanmış olan ısıyı göstermektedir. Isı girdisi oranı ergitmeli kaynaklarda en önemli değişkendir. Isıtma oranını, soğuma oranını ve kaynak banyosu boyutlarını belirlemektedir. Kaynaklı parçanın metalurjik özelliği ısı girdisinden etkilenmekte ve ITAB'daki tane boyutunu belirlemektedir. Ergime sınırındaki katı metalin yanı başındaki taneler büyümektedir. Bu bölgenin tane büyüme sıcaklıklarında uzun süre kalması tane büyümesine etki etmektedir. Bu durum çelik malzemelerin çentik darbe tokluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, ısı girdisi direk olarak parçanın kesitinin kalınlığı ile ilgili değişmektedir. Parça kalınlığı arttığında kaynak daha hızlı olarak soğumaktadır. Parça kalınlığının termal davranışlarındaki etkisi şöyle özetlenebilir: Saç kalınlığının artmasıyla ITAB'daki soğuma oranı artmaktadır. Saç kalınlığı arttıkça ITAB daralmakta ve yüksek sıcaklıkta kalma süresi azalmaktadır. Genel olarak yüksek ısı girdisi, düşük soğuma oranı ve geniş kaynak banyosunun oluşmasına neden olmaktadır. Isı girdisi oranının artırılmasıyla kaynak banyosu genişletilebilir. Kaynak banyosunun genişlemesi kaynağın ve mikroyapının kontrolü açısından olumsuzluk göstermektedir. Geniş banyo, tanelerin büyümesine neden olmaktadır. Bu nedenle soğuma oranı ve tane boyutu ölçüsü optimum değerlerde olabilmesi için ısı girdisi miktarının belirlenmesi gerekmektedir [78, 81]. Kaynak esnasında ark enerjisi hem esas metalde yeterli ergimeyi oluşturacak kadar yüksek, hem de ITAB da istenmeyen mikroyapı değişimlerine yol açmayacak kadar düşük olmalıdır. Her hangi bir ark kaynağında akım üretici tarafından önerilen ark enerjisi denklem 3.6'da

verilmiştir. Ancak arktaki kayıplar nedeniyle üretilen bu enerjinin tamamı malzemeye aktarılamamakta ve birim kaynak uzunluğu boyunca ark tarafından üretilen enerjinin bir kısmı ışıma yolu ile çevreye yayılmaktadır. Tozaltı kaynağında kaynak banyosu üzerindeki koruyucu toz örtüsü sayesinde ark enerjisinin % 90-99'u faydalı enerji olarak iş parçasına aktarılmaktadır [80].

$$H = \frac{I \times E}{V} \quad (3.6)$$

Burada:

H: Isı girdisi (Jmm^{-1})

I: Kaynak akımı (Amp)

E: Ark gerilimi (V)

V: Kaynak hızını ($mmsn^{-1}$) göstermektedir.

Kaynak esnasında net ısı girdisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$H_{net} = \frac{Me}{W} \quad (3.7)$$

Burada:

F_1 : Ark verimi olup boyutsuz bir katsayıdır.

Bu değer 0,7–1 arasında değişmekte olup TIG kaynağında için bu değer 0,7 dir [82].

Isı girdisini etkileyen önemli faktörlerden biriside kullanılan koruyucu gaz bileşimidir. Ark tarafından oluşturulan ısının en iyi şekilde iletilmesi gerekmektedir. Isı iletimi koruyucu gaz tarafından sağlanmakta olup, her koruyucu gaz türünün kendisine has bir ısı iletkenliği vardır [83]. Tepe sıcaklığı kaynak esnasında meydana gelen en önemli faktörlerden biri olup, kaynak işlemi esnasında ulaşılabacak tepe sıcaklığı, ısı girdisine, ısı kayıplarına bağlı olarak değişmektedir. Isı girdisi, ısı kayıplarından fazla olduğunda malzeme sıcaklığı yükselmektedir. Her ikisi birbirine eşit olduğunda malzeme tepe sıcaklığına erişmiş olmaktadır. Kaynak metalinde ulaşılan tepe sıcaklığı aynı zamanda ITAB'daki tane boyutları üzerinde etkilidir.

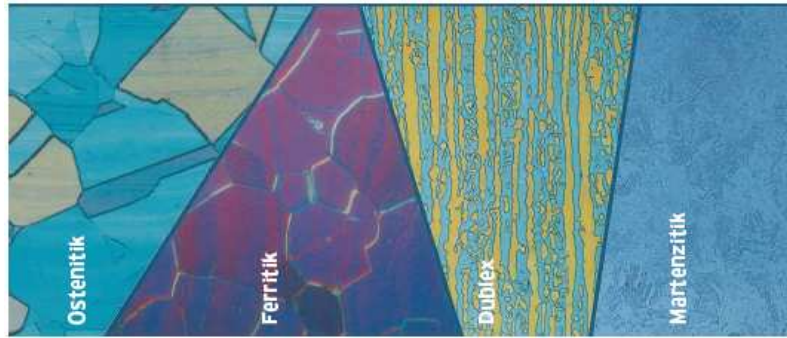
Kaynak hızı arttırıldığında yeterli erimenin sağlanması için ısı girdisinin, diğer bir deyişle akım şiddetinin arttırılması gerekmektedir [10].

Kaynak bölgesinin soğuma oranları sonucu aşağıdaki gerçeklerin bilinmesi gerekmektedir. Martenzitik dönüşümden ya da soğuk kırılmalardan korunması, çeliğin soğuma oranlarının ilişkilerinin belirlenmesi, kaynak ve ITAB da oluşacak metalurjik reaksiyonların hassasiyetinin belirlenmesi ve ITAB'da meydana gelen aşırı tane büyümesinin önlenmesi gerekmektedir [7]. Kaynak edilecek parça ne kadar kalınsa soğutma miktarı artarak soğuma hızı yükselmekte ve böylece martenzitik yapı oluşması sonucu ITAB bölgesinde sertleşme meydana gelmektedir [84]. Malzemenin ergime sıcaklığından, oda sıcaklığına düşmesi belirli bir zaman almaktadır. Bu soğuma süresinin azalması sertliğin ve mukavemetin artmasına karşılık çatlama hassasiyetinin artmasına neden olmaktadır. Soğuma süresi fazla olduğunda, soğuma hızı yavaşlamakta ve daha fazla ısı girdisi olmaktadır. Dolayısıyla, bu durum tane büyümesine neden olarak kaynaklı numunenin çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerinde düşüslere neden olmaktadır.

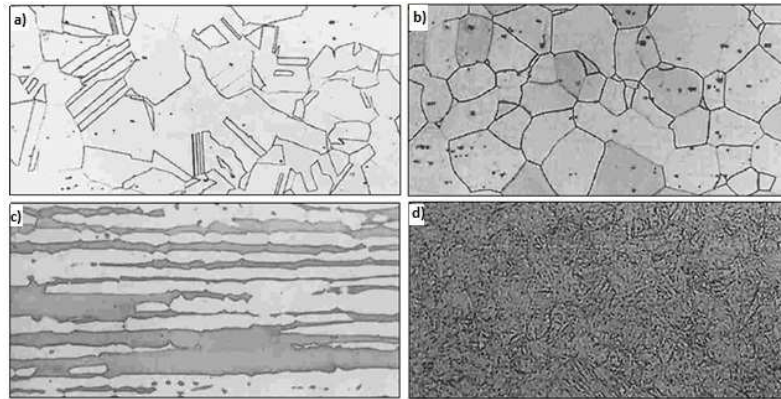
BÖLÜM 4. PASLANMAZ ÇELİKLERİN MİKROYAPILARI, FİZİKSEL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ

4.1. Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapıları

Bazı paslanmaz çeliklerin mikroyapıları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görülmektedir. Paslanmaz çelikler içerdikleri elementlerin farklı olmasından dolayı mikroyapıları farklı olmaktadır. Paslanmaz çeliklerin çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirmeleri ve koruyucu gaz kompozisyonlarının ostenitik, ferritik, martenzitik ve dubleks paslanmaz çeliklerin mikroyapılarına etkilerini birçok araştırmacılar tarafından optik, tarama elektron mikroskobu (SEM) incelenmeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca enerji dağılımı spektrometresi (EDS) analizleri yapılmıştır [23, 41, 42].



Şekil 4.1. Bazı paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri [85]



Şekil 4.2. a) ostenitik b) ferritik c) dubleks d) martenzitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri [60]

4.2. Paslanmaz Çeliklerin Isıl Özellikleri

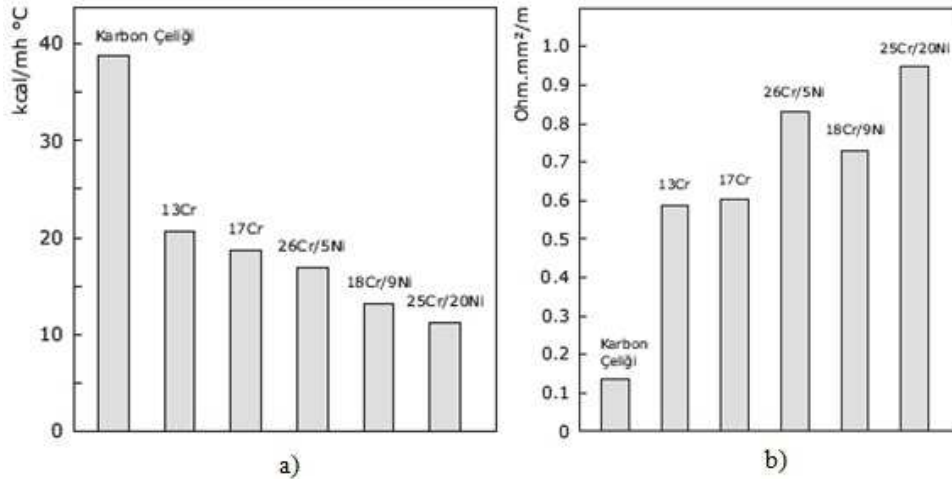
Paslanmaz çelikler türlerine göre farklı fiziksel özellikler gösterirler. Tablo 4.1'de görüldüğü gibi elastisite modülü, ısıl genişleme katsayısı, ısıl iletkenlik, özgül sıcaklık, manyetik geçirgenlik özellikleri ilgili bilgiler verilmektedir.

Tablo 4.1. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [1]

Fiziksel Özellikler	Ostenitik Paslanmaz Çelikler	Ferritik Paslanmaz Çelikler	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	Çökeltme ile Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm ³)	8.0	7.8	7.8	7.8
Isıl genişleme Katsayısı (μm/m°C)	16.6	10.4	10.3	10:8
Isıl iletkenlik (W/mk)	15.7	25.1	24.2	22.3
Özgül Sıcaklık (J/k°K)	50	460	460	460
Elektriksel Direnç (μΩcm)	74	61	61	80
Manyetik Geçirgenlik	1.02	600 – 1100	700 – 1000	95
Ergime Aralığı (°C)	1375 - 1450	1425 - 1530	1425 - 1530	1400 – 1440

Ostenitik paslanmaz çeliklerin ısı iletim kabiliyeti karbonlu çeliklerin sahip olduğu değerden 3 kat daha düşüktür. Bu durum kaynak sırasında oluşan sıcaklığın kaynak bağlantısında daha uzun süre kalacağından bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Ostenitik paslanmaz çeliklerde ısıl genişleme katsayısı karbonlu çeliklerle kıyaslandığında % 50 daha fazladır. Böyle bir özellik kaynaklı konstrüksiyon tasarımlarda önemli olup bazı sınırlamalar gerekmektedir [1].

Şekil 4.3 a'da çeşitli paslanmaz çeliklerin ısı iletim kabiliyetleri ile ilgili grafik verilmiştir. Şekil 4.3 b'de ise çeşitli paslanmaz çeliklerin özgül elektrik iletme dirençleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde paslanmaz çeliklerin karbonlu çeliklerin ısı iletkenliğinde olduğu gibi elektrik iletkenliği de oldukça zayıf olduğu anlaşılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin elektrik öz direnci, karbonlu çeliklerden 6 kat daha büyüktür [1].



Şekil 4.3. a) 20-100°C’de çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin ısı iletim kabiliyetleri b) 20°C’da çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin özgül elektrik iletme direnci [1]

4.3. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Ostenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ostenitik yapıya sahip olduğundan ısı işleme çok önemli bir seviyede sertleşmezler. Buna karşılık soğuk deformasyona uğradıklarında dayanımları artırılabilir. Ostenitik paslanmaz çelikler mikroyapıda ki ostenit’in kararlı hale gelebilirliğine göre kararlı veya yarı kararlı ostenitik çelikler olmak üzere iki grupta toplanabilir. Kararlı ostenitik çelikler mikroyapıları soğuk deformasyondan sonra ostenitik olarak kalmaktadır. Yarı kararlı ostenitik paslanmaz çelikler ise soğuk deformasyondan sonra belirli düzeyde yapı martenzit’e dönüşerek ostenit ve martenzit karışımı meydana getirmektedir [2, 41]. Tavlanmış şartlardaki bazı ostenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında mekanik özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Karbon içeriğinde küçük bir değişikliğin akma davranışını üzerindeki etkisi AISI 304 ve AISI 304L alaşımlarının akma dayanımları görülebilir. Yaklaşık % 0.08 karbon içerikli AISI 304 ostenitik paslanmaz çelikler 290 daN/mm² akma dayanımına sahip iken daha düşük % 0.03 karbon içeren AISI 304L tipi ostenitik paslanmaz çeliğin akma dayanımı 269 daN/mm² dir. Kararlı ve yarı kararlı ostenitik paslanmaz çelikler arasındaki fark, tavlanmış malzemelerin çekme dayanımındaki kararlılık net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 4.2. Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [1]

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

Abuç [42] çalışmasında çeşitli ostenitik paslanmaz çelikleri farklı koruyucu gazlar altında birleştirmiştir. Koruyucu gaz kompozisyonların birleştirmelerin çekme mukavemetine ve % uzama değerlerine etki ettiğini belirlemiştir. Aynı şekilde Abuç [42] çalışmasının devamında kaynaklı birleştirmelerin sertlik ölçümlerini yaparak koruyucu gaz kompozisyonun sertlik değerlerine etkisini ortaya koymuştur.

4.4. Metallerde Yorulma

4.4.1. Tanıtım, tarihçesi ve ilgili terimler

Hareketli parçaların, içten ve dıştan yanmalı motorların gelişimi ile bu parçaların birlikte kullanılmasıyla sabit ve değişken yüklere maruz kalması sonucu bu sistemler kalıcı hasara uğramaktadır. Genellikle makine elemanları değişken yükler ve gerilmeler altında çalışır. Bu yükler statik olsa bile makinenin çalışması esnasında çeşitli elemanların kesitlerinde meydana gelen gerilmeler değişken olabilmektedir. Dolayısıyla birçok makine ve yapı elemanları çeşitli uygulamalardaki kullanım esnasında tekrarlı gerilmeler altında çalışan makine parçalarında gerilmeler altında çalışan makine parçalarında gerilmeler statik dayanım değerinden çok daha küçük olmasına rağmen bilimli bir süre sonra yüzeyde çatlak oluşmakta, çatlağın ilerlemesi ve daha sonra yüzeyde çatlak oluşmakta, çatlağın ilerlemesi ve daha sonra kırılma

olayı meydana gelmektedir. Malzemelerde meydana gelen bu hasırlı olaya “yorulma” adı verilmektedir [86-88].

ASTM 206-72’de yorulma bazı nokta ve noktalarındaki tekrarlı gerilme ve uzama şartlarına maruz bırakılan malzemelerde görülen yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamıyla kırılmasına neden olan lokal olarak devamlı değişen kalıcı yapı değişikliği olarak tanımlanmaktadır.

Genellikle, miller, şaftlar, dişliler, türbin kanatları, motor parçaları, raylar, uçak kanatları ve motor pistonları gibi tekrarlı gerilmeler altında çalışan mühendislik uygulamalarında sıcaklıkla yorulma problemiyle karşılaşmaktadır. Çeşitli uygulamalarda kullanılan makine elemanlarında oluşan hasarların % 80’ni yorulmadan kaynaklanmaktadır [89]. Bu problemin çözümü ve malzemelerin yorulma ömürlerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvar çalışmaları yapılarak malzemelerin yorulma davranışları hakkında genel bilgi sahibi olunabilmektedir [90].

Yorulma kırılmaları; plastik şekil değiştirme, çekme gerilmesi ve çevrimli gerilmelerin aynı zamanda tesiri ile meydana gelmektedir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen üç faktörden herhangi birinin eksikliği durumunda makine parçalarında yorulma çatlakları oluşmayacak ve ilerlemeyecektir. Çevrimli gerilme ve şekil değiştirme yorulma çatlaklarının başlamasında, çekme gerilmeleri ise oluşan bu çatlakların ilerlemesinde etkili olmaktadır [87, 88].

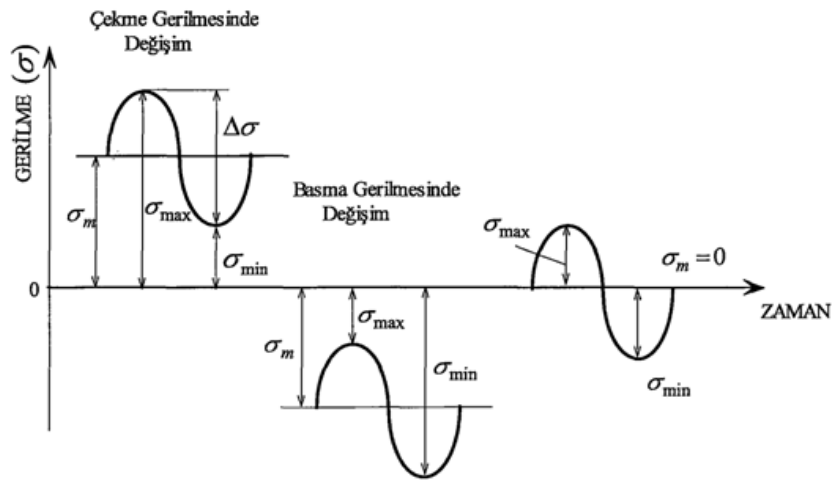
Böylece yorulma süreci üç aşamadan meydana gelmektedir;

- Çatlağın başlamasına yol açan başlangıç yorulma hasarının oluşumu
- Çatlağın ilerleyerek, kalan kesitin uygulanan yükleri taşıyamayacak kadar zayıflaması
- Kalan kesitin ani olarak kırılması

Genelde mühendisleri endişeye sevk eden bu yorulma olayı ilk olarak 1930’lu yıllarda W. A. Albent tarafından incelenmiştir. Ancak tekrarlı değişen gerilmelerden kaynaklanan ilk büyük hasar 1840’lı yıllarda demir yolu endüstrisinde, özellikle

vagonların akslarında kesit değişikliğinin olduğu bölgelerde görüldüğü dikkat çekmiştir [91, 92]. Kırılmanın görüldüğü parçaların görevlerini bir süre yerine getirdiği düşünülerek, tekrarlı yüklere maruz kalan parçaların dayanıklılıklarının azaldığı ve yorulduğu fikri ilk olarak 1840 - 1860 yılları arasında vagonların aksları üzerinde sistematik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalarda wöhler'in kendi geliştirdiği yorulma cihazı kullanılmıştır. Deneylerde ilk olarak uygulanan yükün büyüklüğü üzerinde durulmuştur. Dene sonuçlarından yorulma esnasında uygulanan gerilme aralığının maksimum gerilmeden daha önemli olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramları kullanılarak belirli bir gerilme değerinin altında deney parçalarının kırılmadığı gösterilmiştir [91, 93].

1850-1865 yıllarında Hotgkinson ve Fair Bayirne tarafından kiriş sistemleri üzerine tekrarlı eğme deneyleri yapılmıştır. Statik yükleme durumunda sistem 120 KN altında kırılırken, tekrarlı yükleme durumunda 30 KN'luk yük sistemin kırılması için yeterli olmuştur. Değişik araştırmalar tarafından Wohler'in çalışmaları geliştirilerek sürdürülmüştür. 1900'lü yıllarda yorulma mekanizmasının anlaşılması için optik mikroskop kullanılmıştır. Mikro çatlakların meydana gelmesinden, bölgesel kayma doğrultularının ve kayma bantlarının önemli olduğu gözlemlenmiştir [91, 94]. Yorulma deneylerinde yorulma özellikleri belirlenecek olan parçaların çalışma şartlarında karşılaşılabileceği yüklere benzer bir şekilde yük dağılımları uygulanabilmektedir. Sabit genlikli yorulma çalışmalarında Şekil 4.4'de gösterildiği gibi farklı şekilde yükler olabilmektedir.



Şekil 4.4. Yorulma parametreleri ve gerilme tipleri [95]

Yorulma ile ilgili yapılan araştırmalarda uygulanan gerilmeler ve elde edilen sonuçlarla ilgili bazı terimler vardır. Bunlar;

- **Çevrim (N):** Şekil 4.4’de gösterildiği gibi gerilme–zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denilmektedir .
- **Maksimum gerilme (σ_{max}):** Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en büyük değere sahip olan gerilmesidir. Değer artı, eksi veya sıfır olabilir.
- **Minimum gerilme (σ_{min}):** Cebirsel olarak uygulanan gerilmeler arasında en düşük değere sahip olan değerdir. Değer artı, eksi veya sıfır olabilir.
- **Ortalama gerilme (σ_m):** Maksimum ve minimum gerilme değelerinin aritmetik ortalamasına eşittir [95].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} \times \sigma_{min}}{2} \quad (4.1)$$

- **Gerilim aralığı ($\Delta\sigma$):** Maksimum ve minimum gerilme değelerinin arasındaki farka eşittir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (4.2)$$

- **Gerilme genliği (σ_a):** Gerilme aralık değerinin yarısına eşittir [59]

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (4.3)$$

- **Gerilme oranı (R):** Minimum gerilmenin Maksimum gerilmeye oranı şeklinde ifade edilebilmektedir.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4.4)$$

- **Yorulma dayanımı (n):** Malzemelerin belli bir çevrim sayısı sonunda çentik ve kopma gösterdiği gerilme değeri olarak ifade edilmektedir.
- **Yorulma ömrü:** Benzer numunelerin sabit şartlar altında belirli bir değer altında çatlama veya kopma olayı gösterdikleri N çevrim sayısının ortalaması yorulma ömrü şeklinde tanımlanabilir [95].

- **Dayanım ve yorulma ömür periyot sayısı:** Malzemelerin kopma esnasında periyot sayısı olarak ifade edilir. Genellikle ondalıklı kesir yada 10'un katları olarak gösterilir.
- **Periyot oranı (n/N):** Uygulanan gerilme periyotlarının, kopma gerilmesi periyotlarına oranı.
- **Yorulma dayanımı azaltma faktörü (K_f):** Düz, parlatılmış deney numuneleri yorulma sınırının gerilme konsantrasyonlu deney parçaları yorulma sınırına oranıdır.
- **Genlik oranı, (A):** Gerilme genliğinin, ortalama gerilmeye oranıdır [53].

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (4.5)$$

4.4.2. Yorulma analizi

Genel olarak yorulma kelimesi malzemeleri statik gerilme ve uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak, değişken gerilme ve uzamaların söz konusu olduğu durumlarda da gösterdiği davranışların belirtilmesinde kullanılmaktadır. Yıldırım'ın [96] da belirttiği gibi yorulma bazı nokta ve noktalardaki tekrarlı gerilme ve uzama şartları altında malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmasına neden olan bölgesel olarak sürekli gelişen, kalıcı yapı değişikliği olayıdır. Bu tanımda üzerinde durulan dört adet faktör vardır. Bunlar:

- Süreklilik
- Bölgesel olması
- Çatlakların büyümesi
- Kırılma

Yıldırım'ın [96] ve Er'in [97] çalışmalarında belirtildiği gibi yorulma kırılması gevrek olduğunda malzemenin neresinde ve ne zaman meydana geleceği önceden belirlenmesi zordur. Yorulma kopmaları yapı parçası içerisindeki hesaplanan gerilmeler elastik bölgede bulunmasına rağmen oluşmaktadır. Ancak bu olay genellikle düzensiz bir gerilme dağılımı söz konusu olduğunda meydana

gelmektedir. Miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçalar yorulma kopmasına uğrayan parçalara örnek olarak verilebilir.

4.4.3. Yorulma mekanizmaları

Yorulma olayının oluşumu tam olarak bilinmemekle beraber makine elemanlarında meydana gelen şekil değişimlerinin gerilme yoğunluğu ve sıcaklığı önemli rol oynamaktadır. Yorulma mekanizmalarının açıklanmasında makine elemanlarının başlangıçta her hangi bir çatlığa sahip olup olmadığı önemli rol oynamaktadır. Metallerde bu büyüme, çekme şeklindeki yük çevriminde, çatlak ağzı yeni bir plastik bölge oluşturacak şekilde δ kadar açılmaktadır. Basma şeklindeki yük çevriminde ise çatlak kapanır ve yeni çatlak derinliği yaklaşık olarak δ kadar büyütülmektedir. Devam eden yük çevrimlerinde ise aynı durum tekrarlanmakta ve çatlak bir yük tekrarının da yaklaşık $da/dN = \delta$ kadar büyür. Burada da, diferansiyel çatlak boyunun N ise yük tekrarını vermektedir [98].

Mikroskobik ölçekte bütün malzemeler değişen ve homojen olmayan bir yapıya sahip olan, homojensizlik sadece tane yapısı sebebiyle değil aynı zamanda küçük boşlukların varlığından dolayı farklı kimyasal parçacıklardan kaynaklanabilmektedir. Homojen olmayan böyle bir mikro yapıdan dolayı oluşan gerilmeleri üniform olmayan bir şekilde dağılmaktadır. Genellikle gerilmelerin şiddetli olduğu bölgeler yorulma hasarlarının başladığı noktalardır [87].

Yorulma olayı sonunda parçalarda kırılmanın ne şekilde meydana geldiğini açıklamak için birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalarda yorulma deneyleri ile beraber parçaların içyapısı da incelenmektedir. Özellikle son yıllarda elektron mikroskopların geliştirilmesiyle parçaların iç yapı inceleme tekniklerinde kaydedilen ilerlemeler sayesinde yorulma ile ilgili önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda yorulan parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişimler ele alınmıştır. Bütün bu çalışmalara rağmen yorulma esnasında her aşamasını net olarak açıklayan genel bir kırılma teorisini oluşturmak mümkün olamamıştır. Ancak bu konuda yapılmış çalışmalar yorulmada kırılmanın ne tür aşamalardan sonra oluştuğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır [87].

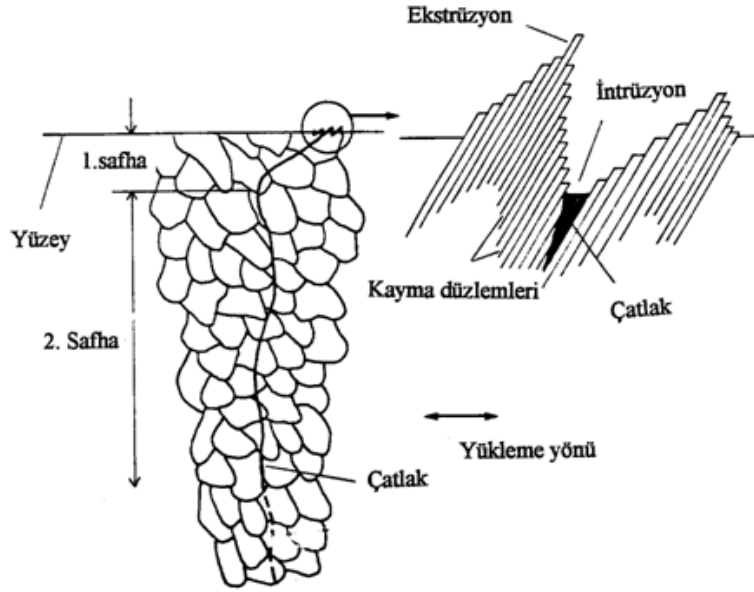
Bir yorulma süreci dört aşamada incelenebilir;

- Çatlak başlaması; Uygun bir ısı ile giderilebilen yorulma hasarının ilk aşamasını içermektedir.
- Kayma bandı ve çatlak gelişimi; yüksek kesme gerilmesine sahip düzlemlerde ilk çatlağın gelişmesini içermektedir. Genellikle “ birinci aşama çatlak gelişimi” olarak adlandırılmaktadır.
- Yüksek çekme gelişmesine sahip düzlemlerde çatlak gelişimi; Maksimum çekme gerilmesine dik yönde çatlağın ilerlemesini içermektedir. Bu durum “ikinci aşama çatlak gelişimi” olarak adlandırılır maktadır.
- Son aşama; Çatlağın belirli bir uzunluğa erişip, parçanın kalan kesitinin uygulanan yükü taşıyamayacak duruma gelmesini içermektedir.

Yorulmada bahsedilen her bir aşamanın toplam her çevrimine göre izafi oranları malzemeye ve deney şartlarına göre değişmektedir. Bununla beraber bir yorulma çatlağı numunenin toplam ömrünün %10’ dan önce oluşa bilmektedir [87, 99]. Başlangıçta, akma gerilmesinin altında uygulanan gerilmelerde belirli bir çevrim sayısından sonra çevrimin çekme yarısında deney parçasının yüzeyindeki malzeme plastik şekil değiştirmeye başlar. Ancak malzemedeki şekil değiştirme genel olarak elastiktir. Bu elastik zorlamalardan dolayı, çevrimin basma yarısından yüzeyin plastik malzemesi tekrar elastik duruma geri döner. Belirli bir zamandan sonra öyle bir aşamaya gelinir ki yüzey malzemesi artık elastik duruma dönmez ve sürekli plastik olarak kalır. Bahsedilen bu süreç “tersinir olmayan plastik deformasyon” olarak adlandırılmaktadır ve malzeme yorulma ile sertleşmektedir. Bu safhada uygulanan gerilmeye 45° lik düzlemdeki kayma meydana gelmektedir ve “devamlı kayma bantları” olarak adlandırılmaktadır. Kayma zorlaşmaya başlamaktadır. Bu bantlar başlangıçta çoklu ve ikili kutuplar üzerinde ana dislokasyonlardan oluşmaktadır [87].

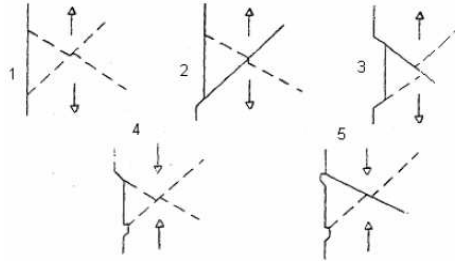
Yorulma deformasyonlarında önemli bir özellik olan “kayma bandı ekstrüzyonları” ve “kayma bandı intrüzyonları” olarak adlandırılan tepelerin ve yivlerin yüzeyinde çatlak oluşmaktadır. Ekstrüzyon ve intrüzyonların oluşumu ile ilgili olarak cotrell Şekil 4.5’deki gibi kaymanın, kayma düzlemlerinde aynı anda geldiğini ileri sürmüştür. Şekil de görüldüğü gibi çatlak önce uygulanan gerilmenin küme

elemanları ile belirlenen yönde ilerlemekte (Aşama 1) , hemen sonra uygulanan çekme gerilmesinin tesiri ile yön değiştirmektedir (Aşama 2) [87, 100].



Şekil 4.5. Çatlak oluşumunun şematik olarak gösterimi [100]

Şekil 4.6'da da çekme ve basma meydana getiren kayma hareketleri gösterilmektedir.

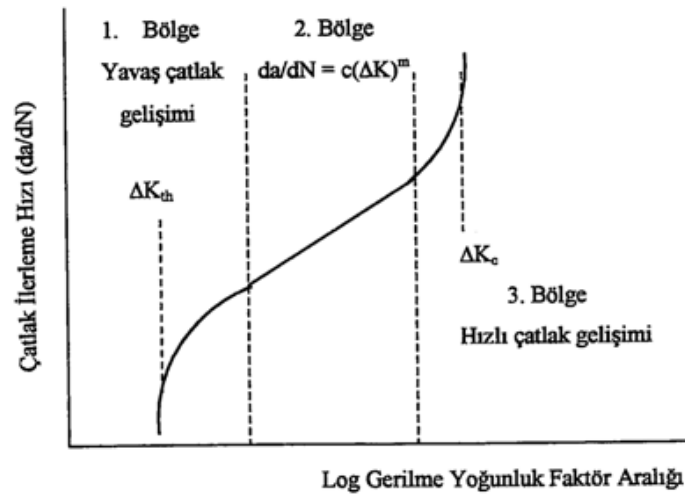


Şekil 4.6. Bir extrusion (çekme) ve bir intrusion (basma) meydana getiren kayma hareketi [101]

Yorulma çatlaklarının Şekil 4.7'de görüldüğü gibi üç aşamadan ve üç farklı tarzda ilerlemektedir. Birinci aşamada kesme tarzı, ikinci aşamada çekme ve üçüncü aşamada da yırtılma tarzı görülmektedir. Yorulma çatlak gelişimi ile ilgili bilgiler genellikle çatlak uzunluğuna bağlı olarak çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak çevrim başına çatlak gelişim hızı şeklinde ifade edilmektedir.

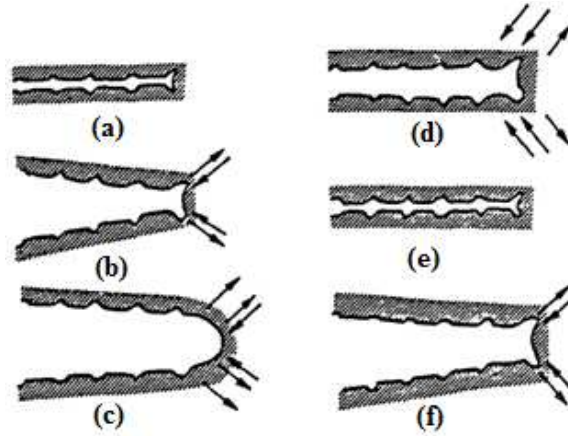
Ortadaki sürekli durum bölgesi diyagramda gösterildiği gibi Paris- Erdoğan denklemi ile tanımlana bilir. Yorulma ömrünün önemli bir kısmı oldukça yavaş gelişen hızlardaki mikro çatlakların ilerlemesinde harcanmaktadır. Bu çatlakların

gelişmesi ilk aşamada çatlağın boyutuna bağlı olarak çatlağın ucundaki gerilme yoğunlaşması ile kontrol edilmektedir. Uygulanan gerilmeye 45° de ki kayma düzlemleri boyunca kayma bu safhada çatlakların gelişmesine neden olan düzlemler boyunca kesme ve bu aşamada çatlakların gelişmesine neden olmaktadır. Bu gerilmelerin hızları atomik boyutlu olup genel dislokasyon ve kristal yapılarına oldukça hassas bir durum sergilemektedir.



Şekil 4.7. Çatlak gelişim safhalarının şematik gösterimi [102]

Çevrim devam ederken mikro çatlaklar (Δk_{th}) eşit gerilme yoğunluğunda daha büyük bir çatlak ucu gerilme yoğunluğu kazanarak mikro çatlaklara dönüşmektedir. (Şekil 4.7). Çatlak birinci aşamadan ikinci aşamaya dönüşür ve çatlama modeli kesmeden çekme modeline değişir. Bu aşamada Şekil 4.8 de görüldüğü gibi kesme yer değiştirmeleri meydana getiren, çatlak dislokasyonlarına, kenar dislokasyonların ilavesiyle sürekli ilerler. Bu mekanizma “plastik-körleşme” süreci olarak isimlendirilmekte ve geçerli bir model olarak kabul edilmektedir.



Şekil 4.8. İkinci safhada çatlak gelişiminin şematik gösterimi [87]

Çekme yükü uygulanırken, çatlak ucunun çift çentiğindeki keskin bantlarda kayma yoğunlaşmaya başlamakta ve çatlak yukarı doğru açılmaktadır. Kesme yönünde yeni bir yüzey ve yani bir “kulak” oluşmaktadır (Şekil 4.8. b,c). Çevrimi basma yarısında ise çatlak içeri doğru itilmekte ve Şekil 4.8. d, e de görüldüğü gibi arkasında bir kulak bırakarak kapanmaktadır. Bu kulaklar yorulma kırılma yüzeyinde görülen küçük paralel çizgilerdir [87, 102].

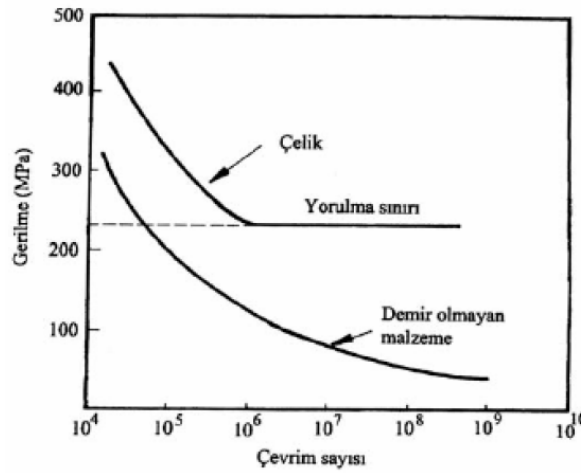
4.4.4. Yorulma dayanımının belirlenmesi

Yorulma dayanımı genel olarak Wöhler yöntemiyle bulunmakta olup bu yöntem (S-N) eğrileri yöntemi de denilmektedir. Bir cismin yorulma ile özelliklerin bulabilmek için numune buzatör denilen yorulma aletlerine bağlanır. Öncelikle σ_{\min} bir (b) değerini alacak şekilde test cihazında gerekli ayarlamalar yapılarak numuneye $P_{\min}=F_0 \cdot b$ aksenal kuvveti uygulanır. σ_{\max} için a_1 gibi büyük bir değer seçilir. Bu işlemlerin sonrasında cihaz çalıştırılarak gerilmenin $\sigma_{\min} = b$, $\sigma_{\max} = a_1$ gibi iki değer arasında kalacak şekilde belirli bir frekans ile değişen frekans uygulanmasıyla başlanılır [53].

Yorulma deneyi yapılan malzeme belirli bir süre bu gerilim değişikliğine maruz bırakıldığında bir süre sonra kırılır. Cihazda kullanılan sayaçtan kırılmanın hangi yükleme sayısında meydana geldiği belirlenmektedir. Kırılmadaki bu sayı N_1 ise, N_1 ile a_1 birbirine ait bir çift değerdir. Deneye σ_{\min} daima (b) değerine eşit tutularak σ_{\max} a_1 den daha düşük bir değer verilerek devam edilir. Böylece σ_{\max} a_2 , a_3 değerleri için

sırasıyla N_2 , N_3 ... gibi kırılmaya neden olan yükleme sayıları bulunur. Bu noktaları sırasıyla birleştirilmek suretiyle veya bu noktalara en yakın bir şekilde eğri geçirilerek Wöhler eğrisi adı verilen bir diyagram elde edilir. Bu diyagram (S-N) eğrisi olarak da adlandırılmaktadır [53].

Çelik veya demir olmayan malzemelerin Wöhler eğrileri Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu grafikte normal olarak absis (çevrim sayısı), logaritmik ordinat (gerilme genliği) ise metrik bölümlü olarak seçilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık olan değer yorulma dayanımı olup σ_y ile gösterilir. Diğer taraftan belirli bir çevrim sayısından sonra (N_s =sınır çevrim sayısı) eğri sonsuz çevrim sayısına ulaşmış kabul edilen değer sayısı, oda sıcaklığında düşük sıcaklıklarda çelikler için $10 \cdot 10^6$, ağır ve hafif metaller ile yüksek sıcaklıktaki çelikler için $100 \cdot 10^6$ veya daha fazla olarak alınmaktadır [49].



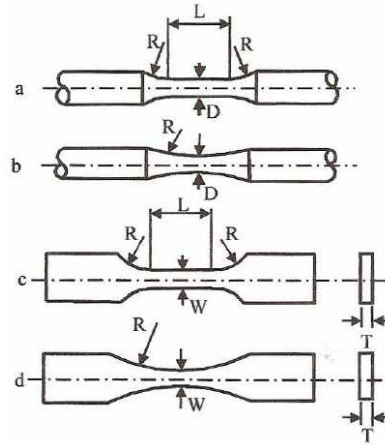
Şekil 4.9. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik Wöhler eğrileri [90]

Deney süresinin kısaltılması amacıyla çelik için $2 \cdot 10^6$ ve hafif metaller için $10 \cdot 10^6$ - $50 \cdot 10^6$ sınır çevrim sayıları kullanılmaktadır [54, 103]. Birçok metallerin ve genellikle metal dışındaki çeşitli parçaların özellikle betonlar, doğal taşlara ve seramik malzemeler için S-N eğrilerinin yatay bir asimptoları yoktur. Dolayısıyla bu tür malzemeler yorulma sınırı özelliğinden bahsedilmesi söz konusu değildir. Bu eğri genel olarak iki kısımdan ibaret olup ilk kısmında N arttıkça σ_{max} değerinde çok fazla miktarda azalmalar oluşmaktadır. İkinci kısımda ise N arttıkça azalan bir eğri karakteristiğine sahiptir. Eğimin birinci ve ikinci kısımları b noktasında kesişerek keskin bir köşe oluşturmaktadır. Çeliklerde absisi (b noktasının) 10^6 - 10^7 arasında

değişmektedir. Alüminyum ve bakır gibi mukavemeti daha düşük olan alaşımlarda aynı noktanın absisi 450-8.3 milyon arasında değişmektedir [52, 53]. S-N eğrisinin asimtot olduğu yatay değerinin ordinatı Y_1 ise $\sigma_{\max} = Y_1$ olması durumunda yükleme sayısı ne olursa olsun malzemede herhangi bir kırılma olmayacaktır. Bu durumda Y seçilen σ_{\min} 'in (b değeri için) malzemenin yorulma sınırınıdır. $\sigma_{\min} = b$ iken $\sigma_{\max} = Y_1$ olduğunda herhangi bir kırılma olmayacaktır. Y değeri yani yorulma sınırı bir (K) emniyet kat sayısına bölünerek ($K > 1$) bir emniyet gerilmesi σ_{em} bulunmalı ve yapıda değişken kuvvetlerin etkisiyle oluşan gerilmeler σ_{em} değerinden büyük olmamalıdır. Bir S-N eğrisinin çizilebilmesi için 8-10 noktayı diğer bir deyişle 8-10 adet deney numunesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu Wöhler eğrileriyle ilgili çeşitli eşitlikler Ünal'ın [52] ve Tanrıöver'in [53] çalışmalarında belirtilmiştir.

4.4.5. Yorulma test numuneleri

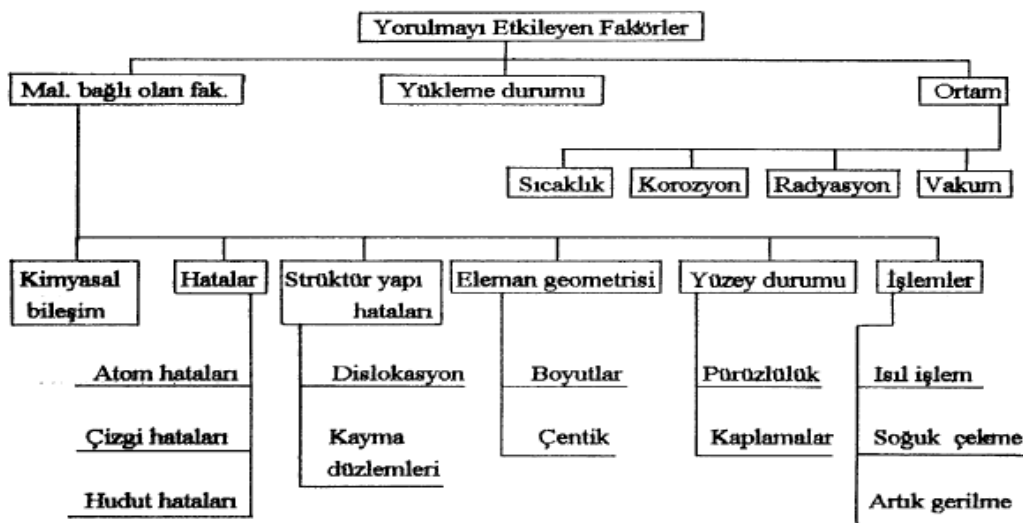
Yorulma özelliklerini belirleye bilmek için, standart bir deney numunesi yerine parçanın kendisi özel cihazlarla çalışma şartlarına benzer durumlarda deneme yapılması daha uygundur. Ancak malzemelerin yorulmasını araştırmak için numune tipi ve boyutları genellikle yorulma deneyi yapılarak olan cihazın tipine, kapasitesine, boyutuna bağlı olarak seçilmektedir. Numune boyutları genel olarak çatlamanın, numunenin daraltılmış kesitlerinde olmasını ve bu kesitinde maksimum gerilmenin mutlak değeri deney cihazının %25'inden, minimum gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az 2.5'ine ulaşması ve numune boyutları da numunenin doğal frekansı, cihazın frekansının en az iki misli olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Numunenin alındığı parçalar dikdörtgen ve daire kesitli olabilir. Şekil 4.10'da ASM standardına göre şekilleri verilmiştir. Deney numunelerinin hazırlanması özenli olmalıdır. Talaş kaldırma işlemi esnasında aşırı deformasyondan ve ısınmalardan kaçınılmalıdır. Numunelerin yüzeyinde çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Yorulma numunelerinin yüzeyi temiz ve parlak olmalıdır. Yorulma deneyi hemen yapılmayacak olan malzemelerin yüzeyleri korozif olmayan bir yağ ile kaplanmalıdır. Numunelerin yüzey kalitesi yirmi büyütme bir mercekle kontrol edilmesi tercih edilen bir yöntemdir [53, 89].



Şekil 4.10. ASTM E-466'ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri [89]

4.4.6. Yorulmaya etki eden faktörler

Yorulma mukavemeti birçok farklı faktörlerin etkisi altında bulunmaktadır. Bu faktörlerin etki şekli ve miktarı göz önünde tutularak gerekli hususların dikkate alınması suretiyle daha doğru sonuçların elde edilmesi sağlanacaktır. Böylece deney sonuçları daha doğru bir şekilde yorumlanarak yorulma etkisine maruz kalan malzeme daha uygun şartlar altında kullanılmış olacaktır. Yorulmaya etki eden faktörleri aşağıdaki şekilde gruplandırmak mümkündür. Bu faktörler; ortam (çevre), yükleme durumu (gerilim yoğunlaşması) ve malzemeye bağlı faktörler şeklindedir. Yorulmaya etki eden faktörleri Şekil 4.11'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.11. Yorulmayı etkileyen faktörler [91]

Çevre; Çevre faktörlerinde önemli olan sıcaklık ve korozyondur.

Yorulma dayanımı; Sıcaklık düştükçe artmakta fakat oda sıcaklığının altında ise çentik duyarlılığı sıcaklık düşüşüne bağlı olarak artmaktadır. Çeliklerde deformasyon yaşanması eğimli 250°C-350°C sıcaklıklar arasında yüksek olduğundan yorulma mukavemeti de en yüksek değerdedir. Bu sıcaklıklar aralığında dislokasyonları önemli ölçüde engellenmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda karbonun yayılma hızının artmasıyla dislokasyonlar daha hızlı hareket edecektir. Buna karşın düşük sıcaklıklarda, arayer atomlarının ve çökelti partiküllerinin dislokasyonları engellemeleri söz konusu değildir. Düşük sıcaklıklarda çentik duyarlılığı da artmaktadır. Dolayısıyla bu sıcaklıklarda yorulma deneylerinde malzemelerin yorulma dayanımında düşüş olmaktadır [86, 104].

Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde genellikle sıcaklık değeri yükseldikçe yorulma dayanımı düşmektedir [105]. Deney sıcaklığının belirli bir süre yükselmesi yorulma olayı ile sürünme mekanizmasını tetiklemekte ve buda malzemenin ömrünün kısılmasına daha etkili olmaktadır. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulmada kırılma tane içinde, sürünmede ise tane sınırlarında olmaktadır.

Yorulma olaylarında mekanik etkilerinin yanında kimyasal korozyon etkileri de görülmektedir. Yorulma deneyinden önce malzemenin herhangi bir şekilde korozyona uğraması yorulma dayanımını kısaltmaktadır. Korozyona uğramış bölgeler çentik etkisi göstermekte ve kırılmanın daha hızlı olmasına neden olmaktadır. Korozyonlu ortamlarda meydana gelen yorulma korozyonlu yorulma adı verilmektedir. Bu tür ortamlar herhangi bir çevrim uygulanmasa dahi karıncalanma etkisiyle gözenekler oluşmaktadır. Bu gözeneklerde çentik etkisine neden olmaktadır [86]. Radyasyon etkisi alaşımın mukavemetini arttırıcı, sünekliliğini azaltıcı yöndedir. Ancak bu etki yalnızca birkaç alaşım için yüksek sıcaklıklarda dikkate alınacak değerlerdir [98].

4.4.7. Yorulmaya gerilmelerin etkisi

Yorulma olayında malzemeye etki eden gerilme türü, büyüklüğü, yönü ve oranı yorulma ömrünü etkileyen önemli faktörlerdendir. Aynı tür gerilmeler için ortalama gerilme genleme genliği ve gerilim oranı değerleri malzeme yorulma dayanımını etkilemektedir. Ortalama gerilme değerleri arttıkça, malzemenin belirli bir çevrim sayısı için dayanabileceği gerilme genliği azalmaktadır. Ortalama gerilmenin özellikle uzun ömürlü yorulma olayında önemli etkisi bulunmaktadır. Gerilme oranı arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısı için dayanabileceği gerilim genliği azalmaktadır [106]. Belirli bir gerilme genlik değeri için gerilme oranının artmasıyla yorulma hasarı daha erken oluşmakta, diğer bir deyişle gerilme oranının artmasıyla çatlak ilerleme hızı artacaktır. Aşırı gerilmeler malzeme ömrünü kısaltmaktadır.

Yorulma mukavemetini, çentik veya delik gibi gerilme arttırıcılarının bulunması durumunda önemli ölçüde azalmaktadır. Makine elemanları, flanş, delik, vida dişleri, kama yuvaları, sıkı geçmeler gibi gerilme arttırıcılar içermesi bu bölgelerde yorulma çatlaklarının başlamasına ve oluşmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı yorulma hasarlarının azalması için doğru tasarım ve imalat gereklidir. Ayrıca gerilme yoğunlaşması, gözenek, kalıntı gerilmeleri, genel ısınma, dekarbürizasyon, çökelmiş fazlar ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır [87].

4.4.8. Yorulmada malzemeye ait faktörler

Çalağın kimyasal birleşimi yorulma karakteristikleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Çekme kuvvetlerini arttıran bütün faktörler yorulma mukavemetini de arttırmaktadır. Bu bakımdan çelik içerisindeki karbon miktarının artması yorulma mukavemetine olumlu etki yapmaktadır. Diğer taraftan kükürt bulunduğunda ise metal olmayan inklüzyonlar meydana getirdiğinden malzemenin yorulma sınırını düşürmektedir. Yüksek krom-nikelli çelikler de ise krom ve nikel yüksek korozyon yorulma mukavemeti sağlamaktadır. Çentik etkisi ile bunların yorulma mukavemetlerinde diğer çelik malzemelere kıyasla daha az düşüş olmaktadır. Diğer bir deyişle bu tür malzemelerin çentiğe karşı duyarlılığı azdır [91].

Genellikle çelik parçaların büyüklüğü arttıkça yorulma dayanımı düşer. Yorulma deneylerinde deney çubuğunun çapı 6 mm'yi aştığında daha küçük çaplara göre yorulma kesitinin %20'sine kadar bir azalma görülmektedir [91]. Numune boyutunun yorulma özelliğinin olumsuz yönde etkilemesinin iki temel nedeni vardır. Bunlardan ilki yüzey alanının artışına paralel olarak numunenin yüzeyindeki kusurların bulunma olasılığının artmasıdır. İkincisi ise bükme ve burma yüklerinde numunenin çapı arttıkça gerilim eğilimi de artmaktadır ve dolayısıyla gerilimli bölgelerin sayısı artmaktadır [53, 91]. Diğer bir örnek olarak da numune çapı 8mm'den 150mm'ye yükselmesi ile malzemenin yorulma sınırı $25,2 \text{ kgf/mm}^2$ den $14,7 \text{ kgf/mm}^2$ ye düşmektedir [53]. Yorulma dayanımı üzerinde en etkili faktörlerden birisi parçanın yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülükleri ve yüzeyde oluşan boşluklar genellikle parçanın üretim prosesi esnasındaki haddeleme, ekstrüzyon, dövme, talaş kaldırma ve takım izleri gibi durumlardan ortaya çıkmaktadır. Metal malzemelerin yüzey düzgünlüğüne paralel olarak yorulma dayanımı artış göstermektedir. Kaba yüzeyler yorulma çatlak oluşumunu kolaylaştırmakta ve gerilme yükseltici bölgeler oluşturmaktadır. Taşlanmış ve parlatılmış çelik yüzeylerinde parlatma çizgilerinin ona çekme gerilimi yönünde olması ile yorulma dayanımı doruğa ulaşmaktadır. Yüzeylerde olan çentik ve keskin köşeler yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu durum bu noktalardaki yüksek çekme gerilmesi yoğunluklu bölgeler oluşturmasından kaynaklanmaktadır [87, 88, 91].

Malzemenin kesiti üzerindeki çatlaklar, delikler veya keskin köşeler yorulma dayanımını önemli ölçüde düşürmektedir. Yorulma kopmalarının çoğu metal yüzeylerinde başladığından, yüzey durumundaki her değişiklik metalin yorulma ömrünü de etkilemektedir. Çeliklere uygulanan karbürleme, nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri malzemelerin yorulma ömrünü arttırmaktayken, diğer taraftan çelik malzemelerin yüzeyini yumuşatan karbon giderme (dekarbürizasyon) ısıl işleminde malzemenin yorulma ömrünü düşürmektedir [87, 91].

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak belirlenememiştir. Genellikle uygulanan 200-10000 çevrim/dk frekansın deney sonuçlarına etki ettiği de düşük frekanslarda ise yorulma dayanım hızının azaldığı görülmektedir [87, 89].

4.4.9. Yorulma çatlaklarının oluşumu ve yorulma deney malzemelerinin kırılma yüzey alanları

Burulma – eğilme gibi bazı yükleme durumlarında gerilmeler yüzeyde en büyük değeri alır. Bu sebeple yorulma çatlağı genellikle malzemenin yüzeyinde oluşur. Bunun nedeni aşağıdaki gibi sıralanabilir;

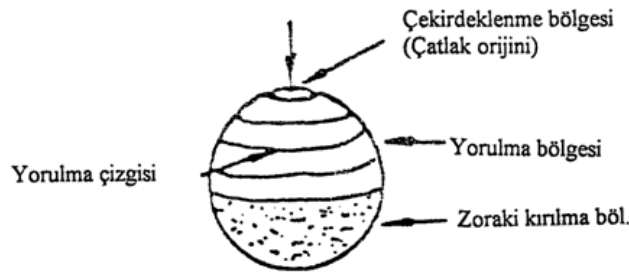
- Yüzeyde düzlem gerilme yığılmalarına neden olur.
- Yüzeyde düzlem gerilme halinin olması nedeniyle burada plastik şekil değiştirmesi daha kolaydır.
- Çatlak yüzeyde birden fazla noktada çekirdeklenebilmekte ve gerilme genliği arttıkça çekirdeklenme noktalarının sayısında artmaktadır.

Yorularak hasara uğramış parçaların kırılma yüzeylerinde üç farklı bölge oluşmaktadır. Bu durum Şekil 4.12’de gösterilmiştir [107].

Bu bölgeler;

- Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölge
- Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge
- Zoraki kırılma bölgesi

Bu bölgelerin her birisi parça yüzeyinde oluşan yorulma hasarı ile ilgili bilgiler verilmektedir. Yorulma çatlaklarının hemen hemen hepsinde parça yüzeyinde çekirdeklenme oluşmaktadır. Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölgenin dikkatli bir biçimde incelenmesi yorulma nedenini ortaya çıkarmaktadır.



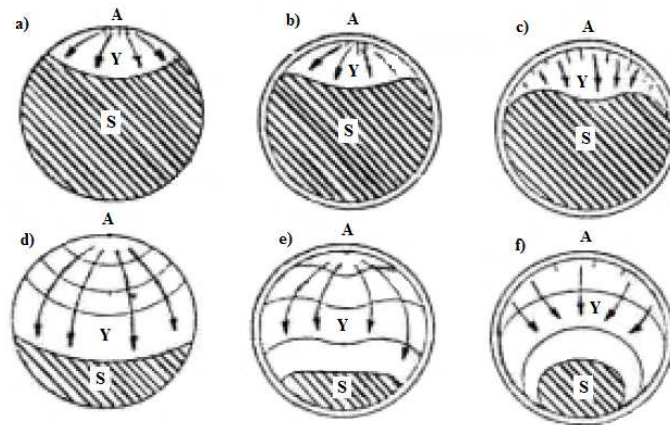
Şekil 4.12. Yorulma yüzeyindeki bölgeler [107]

Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge mikroskobik olarak düz ve pürüzsüzdür. Bu bölgede yüklemdeki değişmeden dolayı oluşan ve gözle

görülebilen yorulma çizgileri bulunmaktadır. Zoraki kırılma bölgesinin büyüklüğü, uygulanan yükün büyüklüğü konusunda bilgiler vermektedir [107].

Kırık yüzeylerin mikroskobik seviyede değerlendirilmesi çok basit tekniklerden oluşmaktadır. Çok az bir ön hazırlıkla basit küçük bir tesisatla hasar olduğu yerde incelenebilir. İşlem kırılma yüzeyine zarar vermeden uygulanmakta, çatlak başlangıcı gözle kontrol veya 25 ila 100 kat arasında değişen oranlarda ki düşük büyütmelelerde belirlene bilmektedir [106]. Yorulma çatlaklarının görünümü, özellikle çelikler için hemen hemen her olayda zorlamanın şekli ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgiler vermektedir. Yorulma çatlağında zorlamanın durdurulduğu, zorlamalar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeniyle halkalar şeklinde yorulma çizgileri bulunabilir. Yorulma çizgileri yorulma kırılmasının kesin bir ifadesi olup, bu çizgilerin şeklinden yorulma kırılmasının başlaması ile ilerlemesi hakkında bilgiler elde edilir.

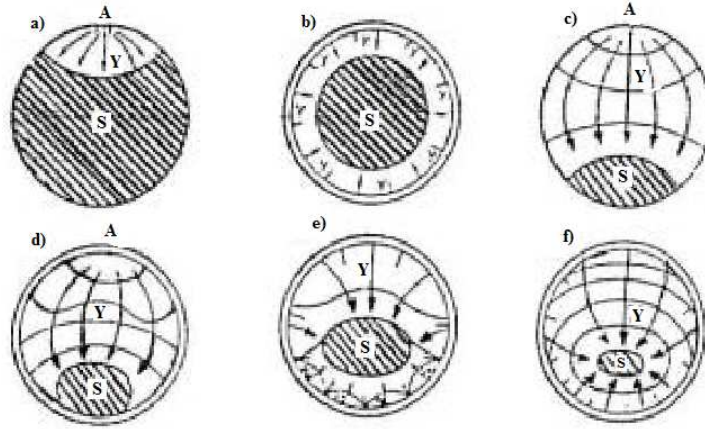
Şekil 4.13 a...f de çekme zorlukları ile tek taraflı eğme zorlanmasının ortak etkimesi sonucu görülebilecek yorulma kırılmalarının oluşum şekilleri şematik olarak gösterilmiştir. Şekillerde yorulma kırılmasının oluşum şekilleri kolaylık bakımından dairesel kesitten gösterilmiş ve çevresel çentik etkisinin bulunduğu durumlar çift daire ile belirtilmiştir [98].



Şekil 4.13. a...f Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlanmalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırılmalarının oluşum şekilleri : Y: Yorulma çatlağı, S ; Son kırılma yüzeyi [98]

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de görüldüğü gibi bu yorulma kırılmalarında işletme gerilmelerinin yüksek olması halinde son kırılan yüzeyleri kesitin arkasında

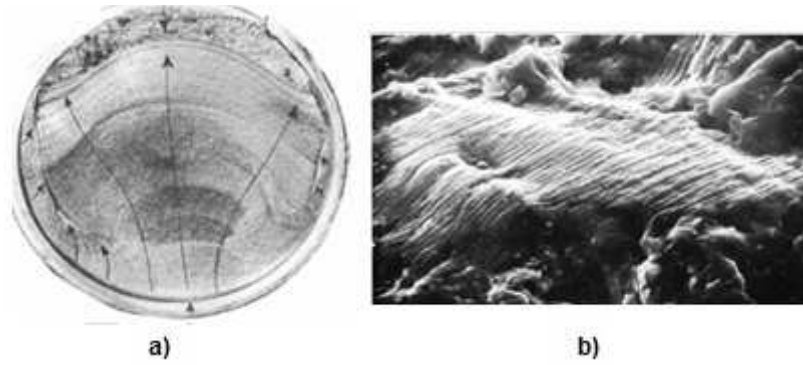
oluşmaktadır. Düşük anma gerilmelerinde ise ikinci çatlağın oluşumu birinciye göre gecikme gösterdiğinden son kırılma yüzeyi genellikle ortada değildir. Parçaların eğilmesi (Çevrimsel eğilme) sonucu oluşan yorulma çatlaklarının temel şekilleri Şekil 4.14 a-f gösterilmiştir.



Şekil 4.14. a-f Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme) sonucu oluşan yorulma kırıkları [98]

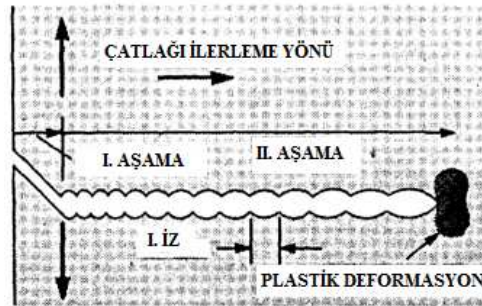
Bu şekiller çekme veya tek taraflı eğmeye çok benzer olabilirken, çatlağın ilerlemesi her ikisinden de daha hızlıdır. Bu tür zorlamalar sonucu meydana gelen yorulma kırılması yüzeyleri, görüntü bakımından çekme ve eğme zorlaması kırıklarından çok farklıdır. Düzgün şekilli gevrek malzemelerde ve düzgün şekilli olmakla beraber enine delikleri veya yüzeyde basma kuvvetlerinin etkilediği bölümler bulunan sünek malzemelerde burulma, yorulma çatlakları, mil eksenine 45° eğim ile başlar çatlak ilerlemesi spiral şekilde devam edebilir veya malzemenin kayma duyarlılığı ile zorlamanın durumuna bağlı olarak parça eksenine dik yada paralel yöne dönebilir. Çentik etkisinin çevresel olarak yüksek olduğu durumlarda ise (kırılmalar) kesitler, derin oyuklar kırılma, gevrek sünek malzemenin her ikisinde de eksene dik düzlemlerde oluşur [98].

Şekil 4.15'de yorulma hasarına uğramış bir numuneye ait kırık yüzeyin sitero ve taramalı elektronik mikroskop görüntüsünden çatlak başlangıcı, çatlak ilerleme yönü ve son kırılma bölgesi rahatlıkla görülmektedir. Elektron mikroskopları görüntüsünden ise çatlak ilerleme bölgesindeki yorulma çizgileri görülmektedir. [105].



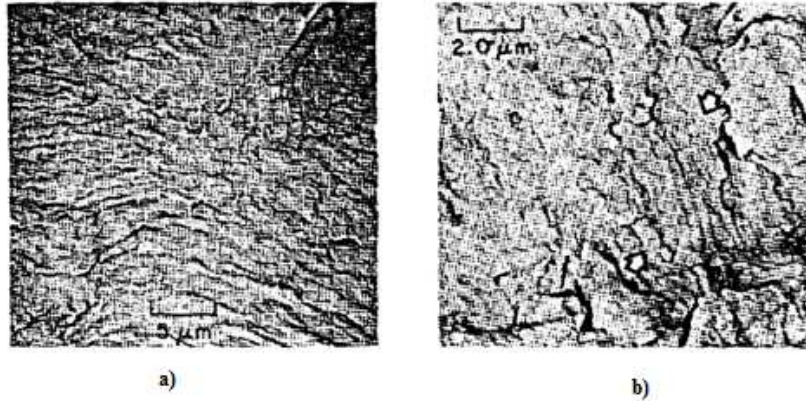
Şekil 4.15. Yorulma kırılma yüzeyinin (a) Stereo mikroskop ve (b) Taramalı elektron mikroskop görüntüsü [105]

Yorulma kırılmalarında izler her zaman bulunmamasına rağmen yorulma kırılmalarının en karakteristik özelliklerindedir. Yorulma kırılmasının ikinci kademesi olan çatlak ilerleme aşamasında çatlak ucu oldukça şiddetli çentik etkisi ya da gerilim yığılması etkisi göstermektedir. Çatlağın yeterli büyüklükteki çekme gerilmesiyle beraber her bir açılması esnasında, çatlak ucunda meydana gelen plastik şekil değişimi nedeniyle çatlağın ucu mikroskobik ölçüde körleşmektedir. Çatlak Şekil 4.16’de görülen eş kırılma yüzeylerinin her biri üzerinde küçük izler oluşturarak ilerlemektedir [106, 108].



Şekil 4.16. Yorulma izlerinin oluşumunun şematik gösterimi [108]

Yorulma izleri çok sert yada çok yumuşak metallere yüzeylerinde oluşmazlar. Şekil 4.17 a’da yumuşak alüminyum 1100 alaşımının yüzeyi üzerinde oluşan yorulma izleri ve Şekil 4.17 b’de ise çekme mukavemeti yüksek olan bir çelik parça yüzeyinde zayıf bir şekilde oluşan yorulma izlerinin büyütülerek alınmış fotoğrafları verilmektedir [106, 108].



Şekil 4.17. Yumuşak ve yüksek mukavemetli iki malzemede oluşan yorulma izleri
a) yumuşak alüminyum 1100 alaşımı b) yüksek çekme mukavemetli bir çelik yüzeyi [106]

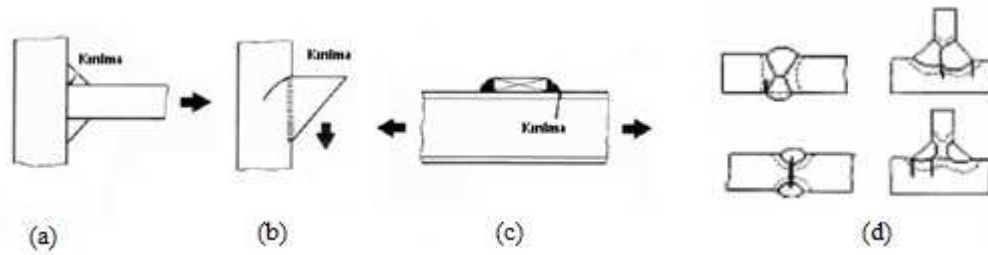
Maksimum çevresel yükün değişmeden etkimesi durumunda yorulma çatlaklarının başlangıç noktası yüzeyindeki izler oldukça küçük boyutlarda olup birbirlerine yakındır. Çatlak parçalarının oldukça mukavemetli olması sebebiyle yavaş bir şekilde ilerleyecektir. Çatlak ilerledikçe izler arasındaki mesafeler artmakta ve çatlakın parçanın kalan kesitini zayıflatmasından dolayı çatlak daha hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Bu olayın devamı sonucunda kırılma olayı tamamlanmakta ve ayrılma gerçekleşmektedir.

4.4.10. Kaynaklı birleştirmelerde yorulma

Günümüzde endüstrinin hemen hemen her alanında kaynaklı bağlantılar kullanılmaktadır. Kaynak bağlantılarıyla elde edilen konstrüksiyonlar dinamik veya statik zorlamalarla birlikte yorulma zorlamaları altında gösterdikleri davranış şekilleri oldukça önemlidir. Kaynak bağlantılarının dayanımlarını etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır. Gerilme yığılması (çentik etkisi), kaynak biçimi, çevrim sayısı, kaynak kalitesi ve konstrüksiyonun dış biçiminin etkisi bu etkenler içinde sayılabilir. Diğer taraftan ana metalin kaynak kabiliyeti, yüksek ısı girdisi bazı kaynak yöntemleri için ilave metalin saflığı ve dayanımı yorulma dayanımını etkilemektedir.

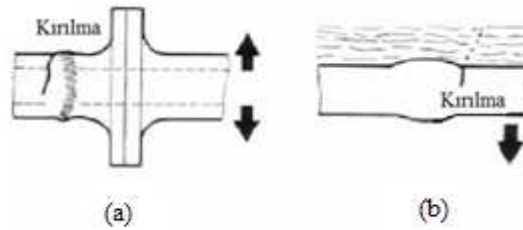
Gelişmiş ülkelerde haddelenerek üretilen çelik malzemelerin %40-50'si kaynak edilebilir özelliklere sahiptir. Bu malzemeler çeşitli kaynak konstrüksiyonlarda kullanılmaktadır. Konstrüksiyonlarda yorulma zorlamaları önemlidir. Kaynak

bağlantılarının düşük yorulma dayanımına sahip olması öncelikle yüksek dış ve iç çentik etkilerinden kaynaklanabilmektedir. Nufuziyet hataları, curuflar, gözenekler ve kaynak malzemelerinde ki diğer hatalar iç çentikler olarak kabul edilmektedir. Dikiş yüzeyi, tırtıl, kaynak dikiş yüksekliği, nufuziyet oyuğu dış çentikler olarak kabul edilmektedir. Genel olarak kaynaklı parçalarda yorulma kaynak uçlarında başlamakta ve ilerlemektedir [44, 48, 49, 103]. Kaynaklı bağlantılara ait yorulma kırılmalarına Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Yorulma kırılmasına ait örnekler: a) aşırı yüklenme, b) kötü tasarım, c) tali takviye veya fitings [49], d) yorulma kırılmasına ait diğer örnekler [44]

Uzun ömürlü kaynak bağlantılarının olması birleştirme esnasında gösterilecek olan özene bağlıdır. Şekil 4.19 a ve b’de çeşitli çevre şartları altında ve çeşitli kaynaklı birleştirmelere ait yorulma kırılmalarına örnekler verilmiştir [44].



Şekil 4.19. Çalışma koşullarında yorulma kırılmasına ait örnekler: a) titreşim, b) korozif çevre [48, 49]

Çatlak, nufuziyet noksanlığı ve yanma olukları olmayan alın kaynak dikişi perçinli ve cıvatalı bağlantılarda daha yüksek ömre sahiptir. Kaynaklı birleştirmelerde kaynakta oluşacak fazlalıkların tesviye edilerek ana metal yüzeyi seviyesine getirilmesi kaynaklı birleştirmenin ömrünü arttıracaktır. Köşe kaynakları alın kaynaklarına kıyasla daha yüksek gerilim yığılmalarına neden olduğundan yorulma ömürleri alın kaynaklarının 1/5’i kadardır [49].

Kaynaklı bağlantılarda yorulma dayanımını etkileyen faktörler;

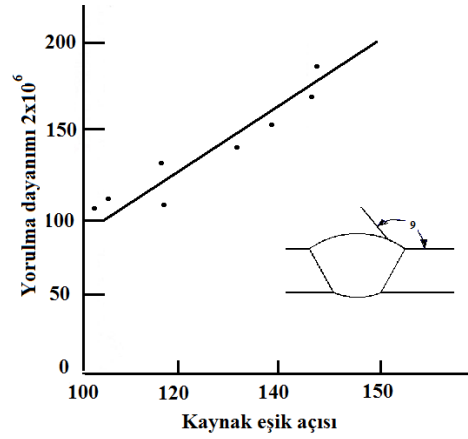
- Esas metalin cinsi
- Nokta dikişinin şekli ve kalitesi
- Yön değiştiren yükün büyüklüğü
- Kaynak yöntemi
- Kaynaklı konstrüksiyonun şekli olarak gruplamak mümkündür [51].

Kaynaklı bağlantılar yapılarak birden fazla yapı malzemesi bir konstrüksiyon oluşturmaktadır. Oluşturulan bu konstrüksiyon maruz kaldıkları değişik yükleri karşılaması gerekmektedir. Eğer karşılamazsa sistem çökecektir. Bu tür yapılarda yorulma dayanımını etkileyen diğer parametreler; yükleme oranı, plaka kalınlığı ve genişliğidir.

Kaynaklı bağlantılarda yorulma dayanımını arttırmak için aşağıda sıralanan bazı tedbirle alınabilir;

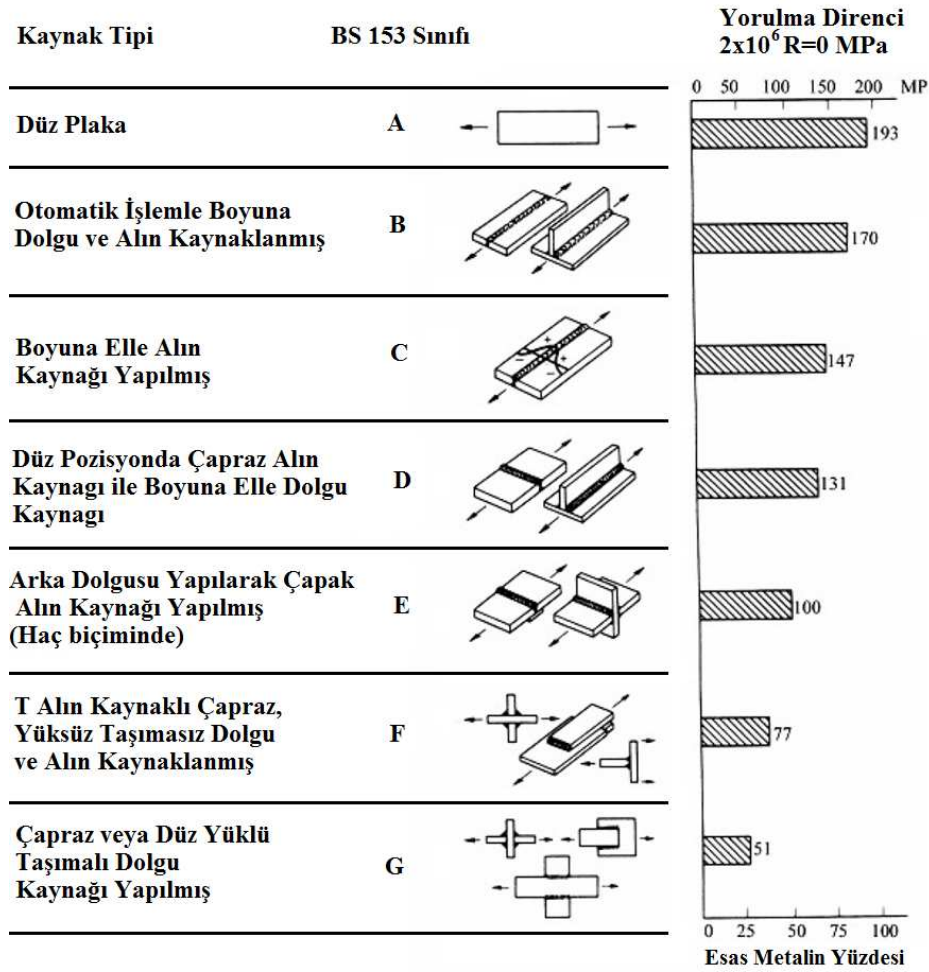
- Gerilim yığılmalarının önlenmesi
- Kalıntı basma gerilmelerinin oluşturulması
- Kaynak dikişinin dolgu fazlalığı ve yanma oluşu gibi kaynak hatalarının giderilmesi
- Kaynak esnasında ve sonradan oluşacak çatlakların tamir edilmesi olarak sıralanabilir [44, 51].

Bazı farklı şekillerde birleştirilen parçaların yorulma dayanımları verilmiştir (Şekil 4.21). Britiş kaynak standartlarına göre Richard tarafından yapılan bu sınıflama 2×10^6 çevrimde $r = 0$ yükleme durumunda yorulma dayanımları [44, 48]. İç gerilme ve gerilme yığılması yorulma dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Alın kaynağında eşik açısı büyüdükçe Şekil 4.20' de görüldüğü gibi yorulma dayanımını arttırmaktadır [72].



Şekil 4.20. Kaynak eşik açısının yorulma dayanımına etkisi [48]

Kaynaklı birleştirmelerde yorulma dayanımını geliştirme yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan: Kaynak dikiş geometrisini iyileştirme metotları (çentik özelliğini iyileştirme metotları) ve artık çekme gerilmelerini azaltıcı yöntemlerdir. Bu yöntemlerde bağlantıda gerilme yığılmalarına neden olabilecek etkenleri minimuma indirmek ve bağlantı üzerindeki gerilmeleri azaltarak bağlantının yük taşıma kabiliyetini arttırmaktadır. Böylece kaynaklı birleştirmelerde çatlak oluşumunu geciktirerek yorulma ömrünün artırılması sağlanmaktadır [49, 109]. Şekil 4.21'de kaynakla farklı şekillerde birleştirilmiş parçaların yorulma dayanımlarındaki değişim verilmiştir.

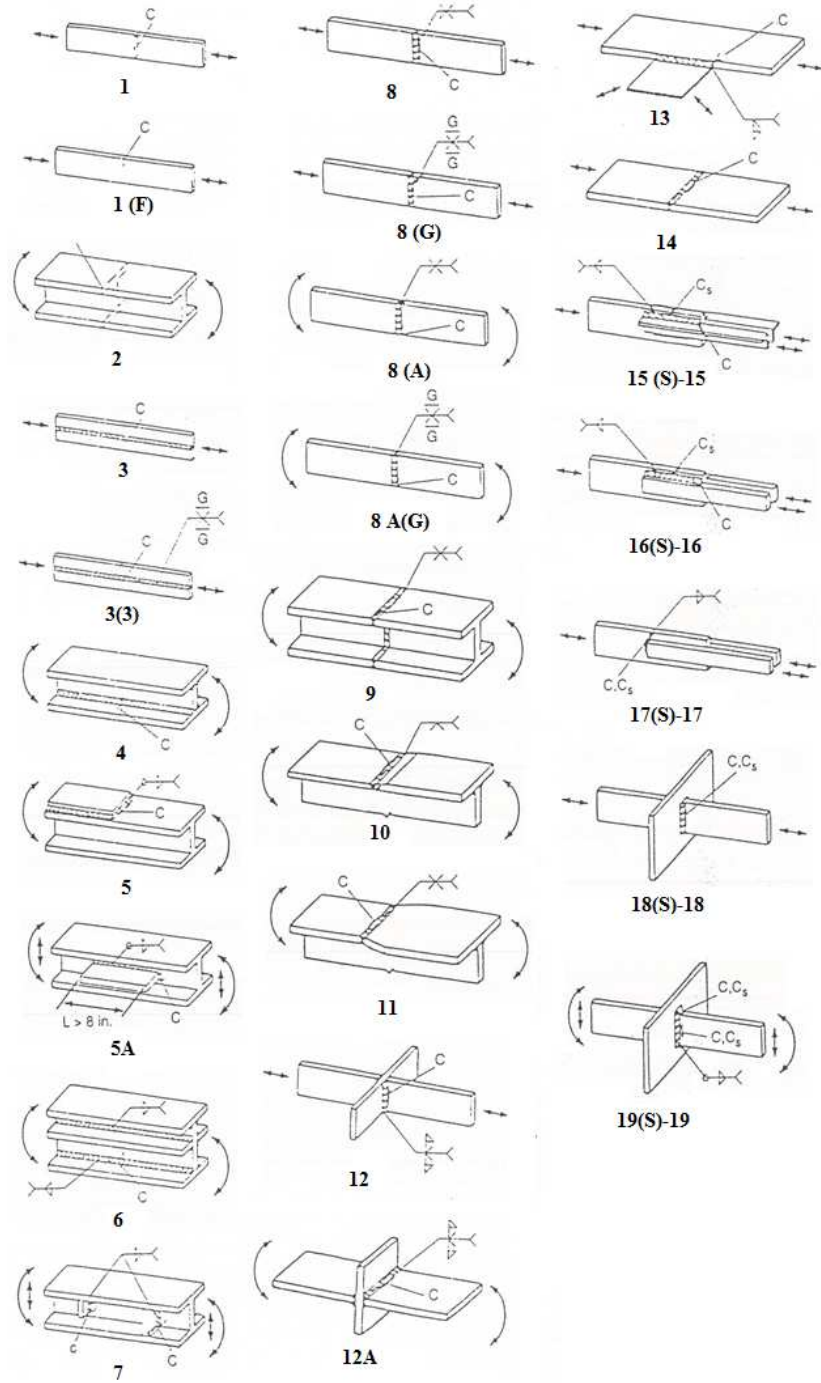


Şekil 4.21. British kaynak standartlarına göre değişik kaynak tiplerine göre yorulma direnci [44, 48]

Munse'nin hazırladığı detaylı kaynak katalogunda farklı yükleme durumlarına göre muhtemel çatlak oluşum noktaları özetle bir kısmı Tablo 4.3'de görüntüleri ise Şekil 4.22'de verilmiştir [48].

Tablo 4.3. Munse'nin detaylı kaynak katalogundan değişik yapılarda yüklemeye göre olası çatlak başlangıç noktaları [48]

	AÇIKLAMA	YÜKLEME DURUMU	YORULMA ÇATLAĞI BAŞLANGIÇ NOK.
1	Düz plaka makine ile kenarları düzeltilmiş	Eksenel	Köşeler
1 F	Düz plaka alevle kesilerek düzeltilmiş	Eksenel	Kenarlar
2	Silindirden işlenmiş I giriş	Eğilme	Köşeler
3 G	Boyuna kaynaklanmış plaka	Eksenel	Köşeler veya süreksizlikler
5	I Kiriş (kaynakla plaka kaynatılmış)	Eğilme	Kaynak eşiği
7	I Kiriş -kiriş gövdesi kaynaklı	Eğilme	Kaynak eşiği
8	Kaynaklı düz bağlantı	Eksenel	Kaynak eşiği
9	I Kiriş kaynaklı düz bağlantı	Eğilme	Kaynak eşiği
10	Eşit olmayan kalınlıkta flanşlı bağlantı	Eğilme	Kaynak eşiği
11	Eşit olmayan genişlikte flanşlı bağlantı (kaynaklı)	Eğilme	Kaynak eşiği
12	Haç biçiminde bağlantı	Eksenel	Kaynak köşesi
13	Plaka kenarında yanal bağlantı	Eksenel	Kaynak sonu
14	Plaka içine işlenmiş eksenel kaynaklı	Eksenel	Kaynak eşiği ve kaynak noktası



Şekil 4.22. Munse'nin hazırladığı detaylı kaynak katalogunda farklı yüklemelerine göre muhtemel çatlak oluşum noktaları [48, 110]

Çentik özelliğini iyileştirme yöntemleri olarak; Taşlama yöntemi, çapak taşlama, disk taşlama, su jeti ile aşındırma, TIG yöntemi gibi yeniden ergitme metodu ve özel kaynak teknikleri sayılabilir. Doğru taraftan, ortak gerilim giderme oluşturma yöntemleri olarak da bilye ile dövme, çekiçle dövme, ultrasonik çekiçle dövme, bölgesel basınç uygulama yöntemleri sayılabilir. Gerilim giderme yöntemleri olarak

gerilim giderme tavlama, titreşimli gerilim başlatma ve noktasal ısıtma teknikleri kullanılabilir [48].

4.4.11. Yorulma Deney Cihazları

Birçok araştırmacı yorulma deneyinde kullanılan cihazlar ile ilgili bilgiler vermektedir. Hatta bazıları çalışmalarında kullanmak üzere yorulma cihazı üretmişlerdir. [91, 97, 111, 105]. Çalışma şartlarında yorulma yükleriyle karşılaşan makine parçalarının imalatı, kullanılacak parçanın davranışını belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılmaktadır. Bu deney cihazlarını aşağıda belirtildiği gibi sıralamak mümkündür [52, 112].

- 1- Dönen – eğmeli makinaları
 - a- Sabit eğme moment tipli
 - b- Değişken (konsol kiriş) eğmeli tipi
- 2- İleri- geri eğmeli makinalar
- 3- Eksenel gerilmeli makinalar
 - a. Çekme –basma kuvvet tipli
 - b. Rezonans tipli
- 4- Titreşimle oluşturulan tekrarlı yüklü makinalar
 - a. Mekanik
 - b. Elektor manyetik
- 5- Tekrarlı burulmalı makinalar
- 6- Birleşik gerilmeli makinalar
- 7- Bilgisayar kontrollü makinalar
- 8- Özel uygulamalar için parça test makinaları
- 9- Dört Noktadan eğilmeli yorulma deney düzeneği
- 10- Sürtünme yorulma deney düzeneği.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler, Kaynak Yöntemi ve Çalışma Programı

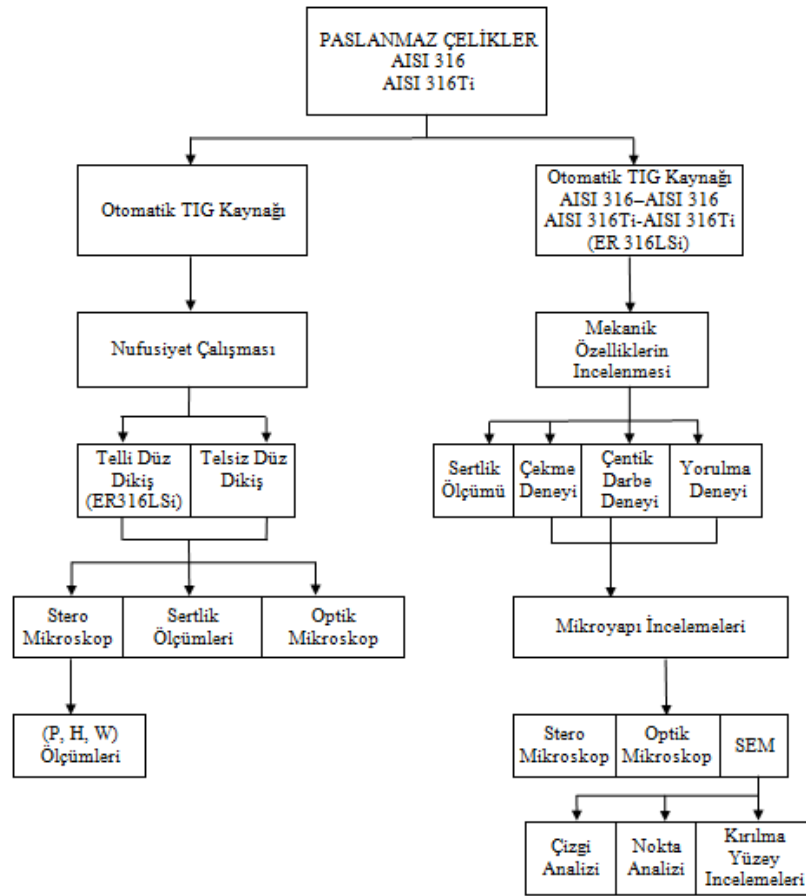
Deneylerde AISI 316 ve AISI 316Ti olmak üzere iki farklı tip de ostenitik paslanmaz çelik kullanılmıştır. AISI 316Ti serisi paslanmaz çelik türünü diğerinden ayıran en önemli özelliği kompozisyonunda titanyum elementini içermesidir. Bu paslanmaz çeliğin oksidasyon ve korozyon direncini artırıcı etki yapmakla beraber kaynak esnasında oluşabilecek krom karbür çökmesini önleyici etki sağlamaktadır. Çalışmada kaynak parametrelerinin nufuziyete ve mekanik özelliklere etkisi olmak üzere iki farklı ana bölümden oluşmaktadır. Kaynak edilen ve kaynakla birleştirilen numunelere sertlik, mikroyapı ve çeşitli mekanik testler uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda izlenen akış şeması Şekil 5.1’de verilmiştir. Kullanılan malzemelerin ve ilave metale ait kimyasal bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan ostenitik paslanmaz çeliklerin ve ilave metalin kimyasal bileşimi [1,113]

Ana malzemeler ve ilave metal	Kimyasal Analiz Değerleri (% Ağırlık)									
	C	N	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P	S	Mo
AISI 316	0,08	-	2	1	18–20	8–10,5	-	0,045	0,03	2–3
316Ti	0,035	0,015	1,67	0,64	16,5	10,7	0,37	0,026	0,001	2,05
ER 316LSi	0,03	-	1,8	0,45	18,5	12,5	-	0,03	0,025	3

Nufuziyet incelemeleri için, 50x70x5 ebatlarında saç levhalar kullanılmış olup, bu levhalara otomatik TIG kaynak makinesi (Şekil 5.2) ile düz dikiş çekilmiştir. Burada farklı kaynak akımı değerlerinde ve hız değerlerinin ilave metal kullanılmadan yapılan kaynaklar ile ER 316LSi ilave teli kullanılarak kaynatılan parçaların nufuziyete etkisi araştırılmıştır. İlave metal kullanılmadan gerçekleştirilen düz dikişler için 4.2 mms^{-1} kaynak ilerleme hızında 110, 125, 140 ve 160 amper değerleri

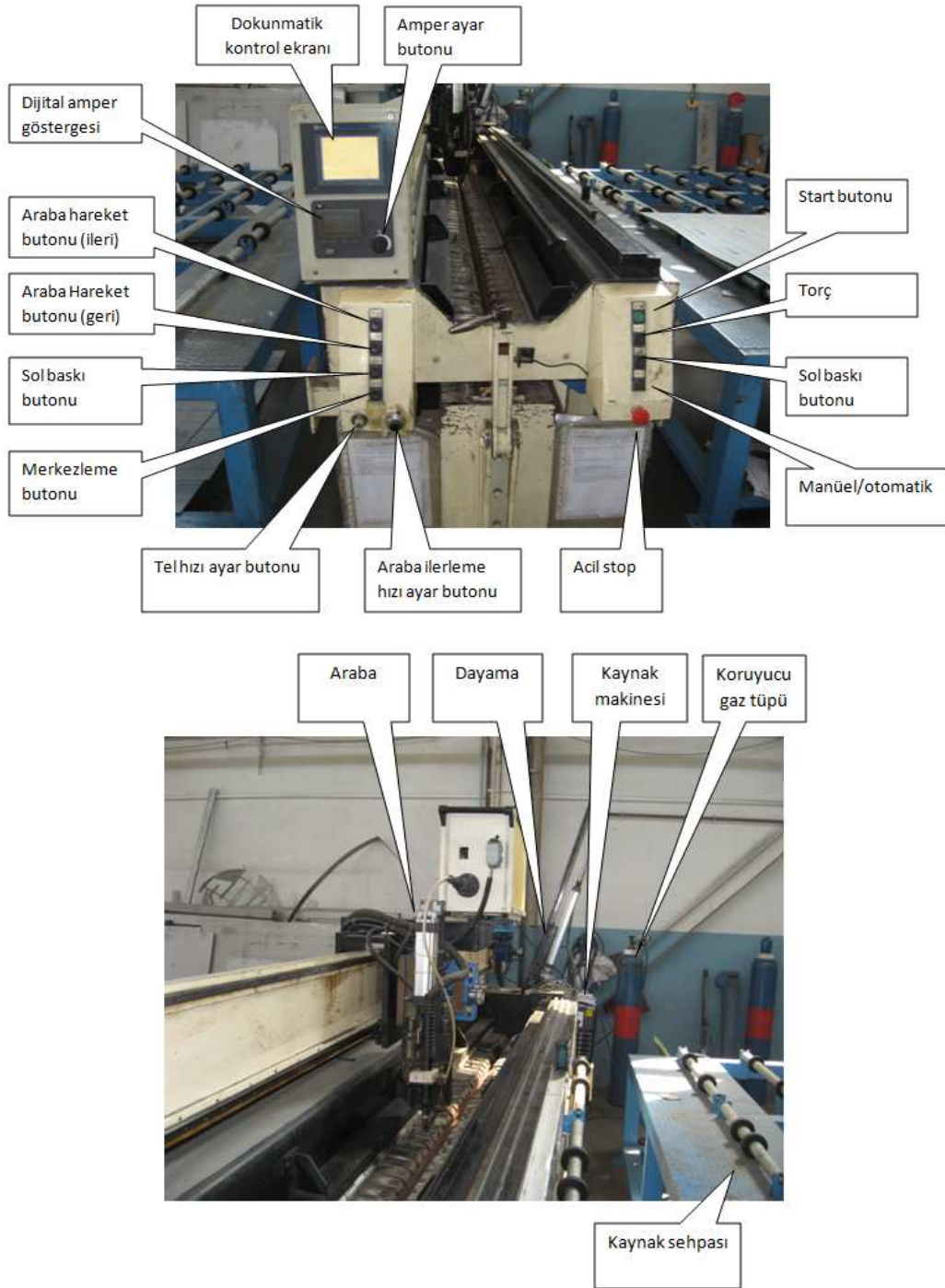
ile 125, 140, 160 amper değerlerinde darbeli (pulsli) akım kullanılarak kaynak işlemi yapılmıştır. Darbeli arkımın frekansı 6 herz olarak seçilmiştir. Kullanılan otomatik kaynak makinesinden kaynak esnasında darbeli akım kullanımında elde edilen darbe akım değişimi Tablo 5.2’de verilmiştir. İlave tel kullanılan deneylerde ise 3.5, 4.2 ve 5.2 mms⁻¹ olmak üzere üç farklı kaynak ilerleme hızlarında 120, 140, 160 ve 180 amper değerleri ile 4.2 mms⁻¹ ilerleme hızında 140, 160 amper değerlerinde darbeli akım kullanılarak kaynak işlemi uygulanmıştır. Yine bu parametrelerde de darbe arkım frekansı 6 herz olarak seçilmiştir. Otomatik TIG kaynak makinesinde kaynak yapılırken kullanılan gazın debisi 8 lt/dk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmaların akış diyagramı

Tablo 5.2. Otomatik TIG kaynak makinesinden kaynak esnasında darbeli akımda elde edilen maksimum ve minimum kaynak akımı değerleri

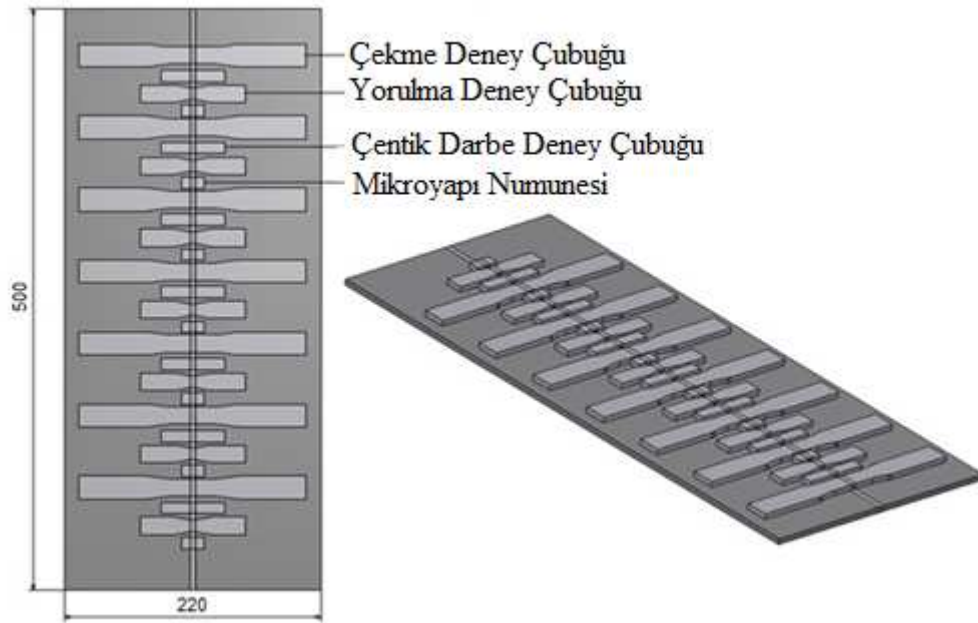
Kaynak parametreleri	Darbe (Puls) zamanı (%)	Akım değeri (Min.)	Akım değeri (Maks.)
125A P	50	119	125
140A P		133	140
160A P		152	160



Şekil 5.2. Otomatik TIG kaynak makinesinin şematik görünümü

Kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi amacıyla, 110x500x5 ölçülerinde kesilen saç levhalar ER316LSi ilave tel kullanılarak otomatik TIG kaynak makinesinde çift taraflı küt kaynak tekniği ile yatay pozisyonda birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kaynak esnasında kullanılan

kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi amacıyla 190 amper'de 3.8 mms^{-1} ile 5.2 mms^{-1} kaynak ilerleme hızları seçilmiştir. Ayrıca 150 amper'de ise darbeli (pulsli) akım ile 3.8 mms^{-1} ile 5.2 mms^{-1} kaynak ilerleme hızları seçilmiştir. Bu parametrelerde ilgili standartlar doğrultusunda hazırlanan deney numunelerine, çekme, çentik darbe, yorulma, sertlik ve mikroyapı deneyleri uygulanmıştır. Deneyler için gerekli olan numunelerin kaynaklı levhalardan kesim yerlerinin şematik gösterimi Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Kaynaklı birleştirmelerden deney numunelerinin çıkarılması işlemlerinin şematik gösterimi

5.2. Mikroyapı İncelemeleri

5.2.1. Stero mikroskop incelemeleri

Optik mikroskop için hazırlanan deney numunelerinin stero görüntüleri NİKON SMZ800 marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Stero mikroskop çalışmalarının yapılaş amacı nüfuziyet inlemelerinde kaynak sonrası banyonun görünümü ve bu banyonun nüfuziyet ile ilgili P (nüfuziyet), H (ana metal üzerinde oluşan kaynağın yüksekliği) ve W (kaynak banyosunun genişliği) değerlerinin tespit edilmesidir. Bunların yanında tespit edilen uygun olmayan kaynak parametrelerinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

5.2.2. Optik mikroskop

Kaynak edilmiş parçalardan çeşitli boyutlarda çıkarılan kaynak numuneleri mikroyapı incelemeleri için bakalite alındıktan sonra sırasıyla 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı SiC zımpara ile su altında zımparalandı. Bu işlemden sonra numuneler, 1 µm'luk elmas pasta kullanılarak mikro keçe kumaş üzerinde parlatıldı. Parlatılan numuneler su ile yıkanıp yüzeylerine alkol püskürtülüp, daha sonra kurutuldu. Mikroskopik incelemeye hazır hale getirilen numuneler, %10 oksalik asit çözeltisinde 10,4 V'ta belirli bir süre tutularak elektrolitik olarak dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra parçalar yıkanıp yüzeyleri alkol ile temizlendi ve sonra kurutulan numunelerin NİKON ECLIPSE L150 optik mikroskobu ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

5.2.3. Tarama elektron mikroskobu (SEM) ve element analizleri

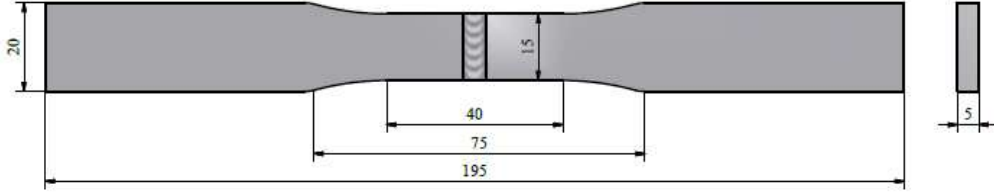
Farklı koruyucu gaz kullanılarak birleştirilen AISI 316 ve AISI 316Ti paslanmaz çeliklerin ITAB içersinde kaynak metali ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgelerde, ana malzeme ve kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri ile kırılma yüzey morfolojileri Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı çalışmaları JEOL JSM-6060LV marka SEM mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. EDS (Elektron Dispersive Spectroscopy) analizleri numunelerin ana metal, kaynak geçiş ve kaynak bölgelerinden noktasal olarak, lineer element analizleri ise bir çizgi boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu analizler SEM mikroskobuna bağlanan IXRF 500 model elektron dağılım spektrometresi yardımıyla yapılmıştır.

5.3. Mekanik Deneyler

5.3.1. Çekme deneyi

Şekil 5.4'de ilgili standart doğrultusunda hazırlanan çekme çubuğunun ölçüleri verilmiştir. Çekme deneyi için DMG-6158 marka çekme cihazı kullanılmış olup her deney parametresi için en az üçer adet deney yapılmıştır. Elde edilen sonuçların

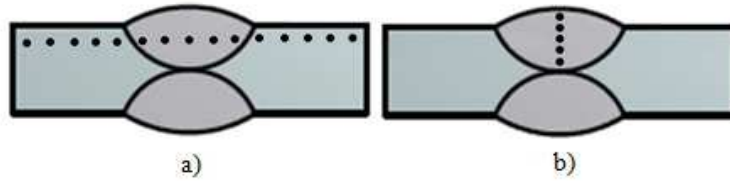
ortalaması çekme deneyi dayanım değerleri olarak kabul edilmiştir. Burada kaynak akımı değerlerinin ve kaynak ilerleme hızlarının çekme deneyi üzerine olan etkisinin tespiti amaçlanmıştır.



Şekil 5.4. Çekme deneyinde kullanılan numunenin ölçüleri

5.3.2. Vickers sertlik deneyi

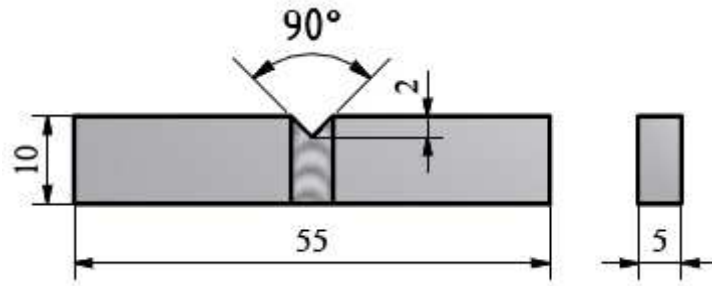
Sertlik ölçümünün yapıldığı yüzeyler Şekil 5.5. a-b de verilmiştir. Sertlik ölçümlerinde LEICA VMHT MOT marka sertlik cihazı kullanılmıştır. Deney esnasında deney numunelerine 10 sn süreyle 300 gr yük uygulanarak 0.5 mm aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Deney numunelerine uygulanan sertlik deneyinin dağılımının şematik görünümü, a) yatay sertlik dağılımı, b) düşey sertlik dağılımı

5.3.3. Çentik Darbe Deneyi

Deneysel çalışmada kullanılan AISI 316 ve AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere Charpy çentik darbe deneyi uygulanmıştır. Çentik darbe deneyi ALŞA 30KPM marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan numunenin ölçüleri Şekil 5.6'de verilmiştir. Bu deneyde her parametre için en az üç adet deney gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerlerin ortalaması alınarak çentik darbe tokluk direnci Joule olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Çentik darbe deneyi için hazırlanan deney numunesinin ölçülerinin şematik gösterimi

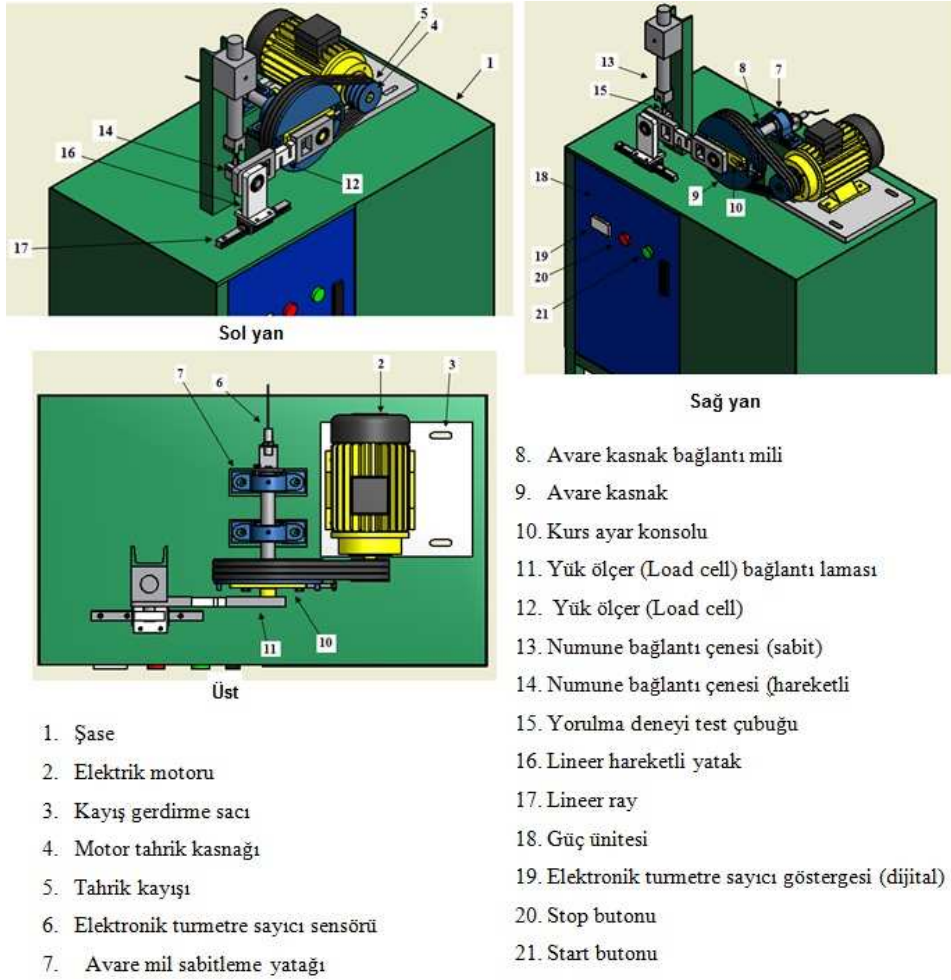
5.3.4. Yorulma Deneyi

5.3.4.1. Yorulma cihazının imalatı

Şık ve Tanrıöver ile yapılan karşılıklı görüşmeler sonucunda ve kendileri tarafından tasarlanarak imal edilen cihazlar incelenerek, şimdiki çalışmada kullanılacak olan eğme gerilmeli yorulma cihazı tasarlanmış ve projelendirilerek üretilmiştir. Bu yorulma cihazı levha tipi deney çubuklarının yorulma ömürlerini belirlemektedir. İmalatı gerçekleştirilen yorulma cihazının görüntüsü Şekil 5.7’de ve üzerindeki elemanları tanıtan şematik görüntüsü ise Şekil 5.8’de verilmiştir. Cihaz 1-10 mm aralığındaki numunelerin yorulma ömürlerini tespit edebilme kapasitesine sahiptir. Bu gücü sağlamak amacıyla, 220 volt da çalışan 3 kw, elektrik motoru kullanılmıştır. Elektrik motorundan elde edilen güç kayış-kasnak gurubuyla sisteme aktarılmaktadır.



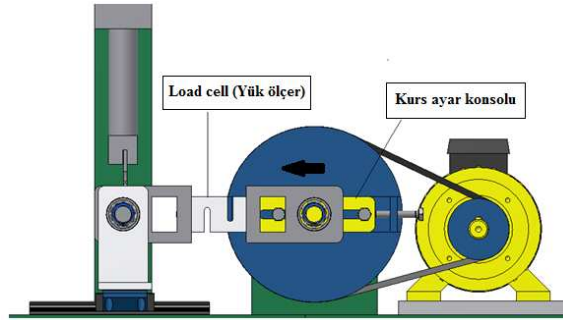
Şekil 5.7. Yorulma cihazının görüntüsü



Şekil 5.8. İmalatı yapılan yorulma cihazının şematik görünümü

Yorulma deneyi malzemenin akma sınırının altında belirlenen yüklere karşı gösterdiği minimum dayanımdan maksimum dayanıma doğru değişik parametrelerin tespitini sonucu elde edilecek olan Wöhler eğrilerinin oluşturulmasını amaçlamaktadır. Bu sebeple deney numunesine uygulanacak olan yükün belirlenmesi ve uygulanması deneydeki en önemli parametrelerden biri olup, bu amaçla 0-1000 kg kapasiteli yük ölçer (load cell) kullanılmıştır. Motordan gelen gücü eksantrik harekete çevirmek amacıyla sistemde bulunan avare kasnak üzerine bir kurs ayar konsolu oluşturulmuştur. Bu parça, üzerinde bulunan kanal içerisinde gezebilmekte ve cıvatalı birleştirme ile istenilen konumda sabitlenebilmektedir. Deney numunesi ile kurs ayar konsolu arasına yük ölçer yerleştirilmiştir. Hareketli konsol bir cıvata yardımıyla avare kasnağın merkezinden kaçırılarak bir eksantrik hareket elde edilmektedir. Yük ölçere doğru uygulanan bu hareket yük ölçerin dijital göstergesinden yük olarak okunmaktadır. Bu göstergede deney için daha önceden

belirlenen değer elde edildiğinde kurs ayar konsolu sabitlenerek cihaz belirlenen parametre için hazır konuma gelmektedir (Şekil 5.9)



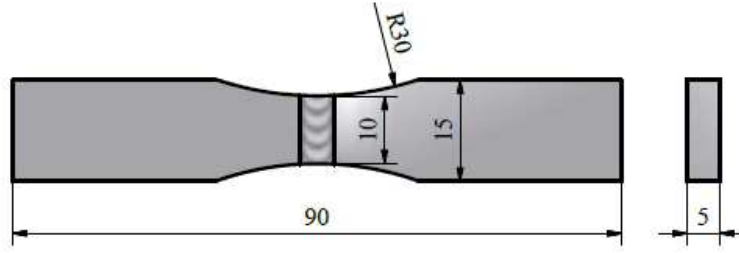
Şekil 5.9. İmalatı yapılan yorulma cihazında kurs ayar konsolunun hareket yönü ve güç ölçerin yük algılama mekanizmasının şematik gösterimi

Kurs ayar konsolu sayesinde elde edilen eksantrik hareket sistemde kullanılan lineer ray ve lineer arabayla doğrusal harekete dönüştürülmektedir. Lineer araba üzerinde bulunan numune bağlantı çenesine (hareketli) bağlanan numune bu sistem sayesinde eksenden eşit mesafede ileri-geri hareketi yapması sağlanarak yorulma deneyi başlatılmış olmaktadır. Bu deneyde önemli parametrelerden bir diğeri de uygulanan yük altında numunenin direnç gösterebileceği maksimum çevrim sayısıdır. Bu parametrenin tespiti amacıyla bir adet elektronik turmetre sayıcı sensörü kullanılmıştır. Cihaza deney için start verildiği andan, numunenin koptuğu ana kadar bu sayıcı çevrim sayısını dijital göstergesi sayesinde tespit etmektedir. Ayrıca gerekli elektrik sistemi kullanılarak deney numunesinin koptuğu anda motora ve bu sayıcı sensöre giden elektriği kesecek bir otomatik durdurma sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem sayesinde çevrim sayısında çevresel etkenler sebebiyle oluşabilecek olan hataların önüne geçilmiştir.

5.3.4.2. Yorulma deneyleri

Yorulma deneyinde kullanılan numunelerin ölçüleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Yorulma deneyi AISI 316 ve AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin 190 amper'de 3.8 mms^{-1} ile 5.2 mms^{-1} kaynak ilerleme hızlarında kaynak edilen levhalara uygulanmıştır. Her deney parametresi için 475-315 MPa olmak üzere farklı gerilim uygulanarak yorulma gerilimi ve yorulma ömrünün eğrisinin çizilmesi

amaçlanmıştır. Yorulma deneyleri kendimiz tarafımdan tasarlanıp imalatı yapılan yorulma test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10. Yorulma deney numunesi

Yorulma cihazının çalışma prensibi şematik olarak Şekil 5.11’de verilmiştir. Deneylede kullanılan eğme momenti (M_e) değerlerinden eğilme gerilmesi (σ) değerlerine klasik mukavemet bilgileri kullanılarak dikdörtgen kesitli parçalar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [49];

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (5.1)$$

$$\sigma = \frac{M_e}{W} \quad (5.2)$$

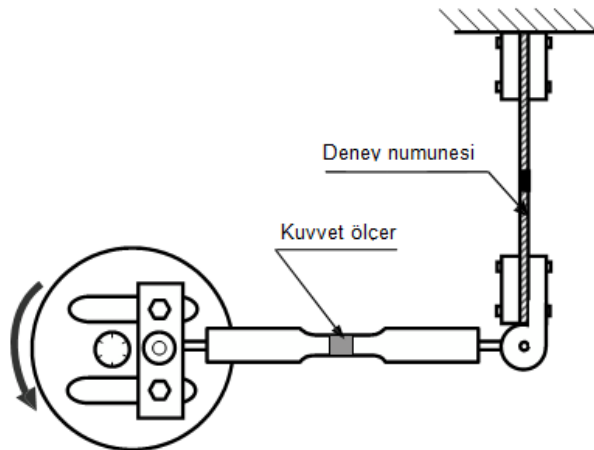
σ = Eğilme gerilmesi (kgcm^{-2}),

W = Eksenel atalet momenti (cm^3),

M_e = Eğilme momenti (kg cm),

b = Genişlik (cm),

h = Kalınlık (cm)



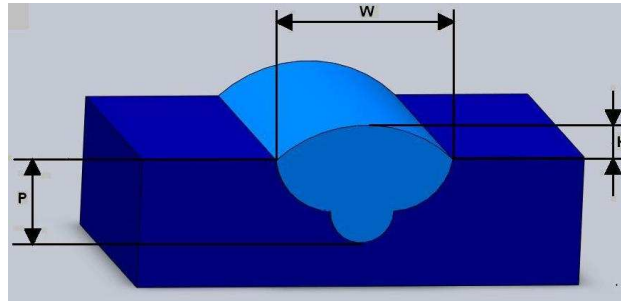
Şekil 5.11. Eğmeli yorulma düzeneğinin şematik gösterilişi [49]

BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

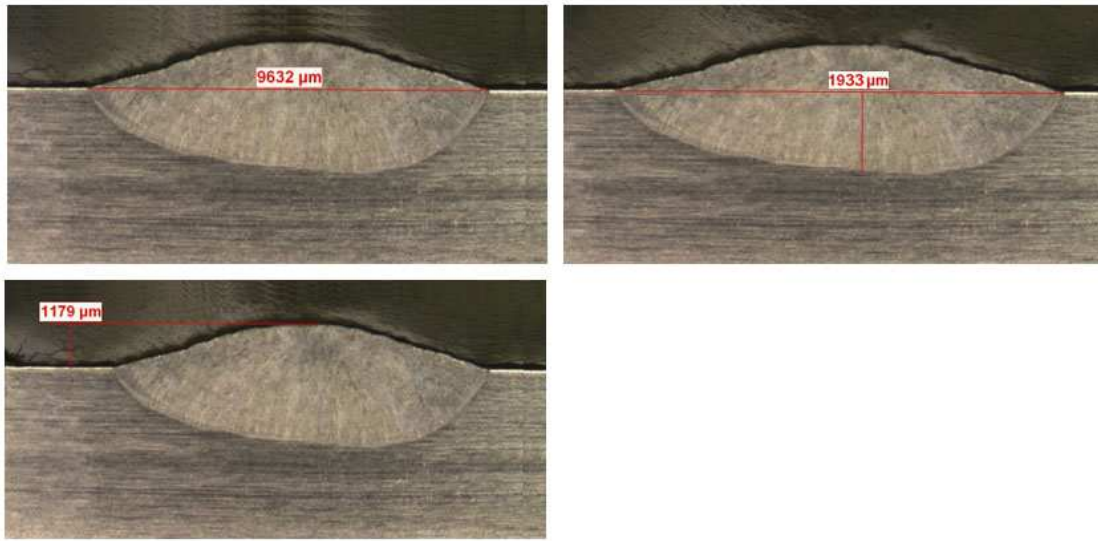
6.1. İlave Metal Kullanılmadan Yapılan Kaynakta Nufuziyet İncelemeleri

6.1.1. Kaynak kaynak akımı değerlerinin nufuziyete etkisi

Kaynak parametrelerinin nufuziyete etkisinin belirlenmesi için ilave metal kullanılmadan sadece tungsten elektrot kullanılarak otomatik TIG cihazı ile ostenitik paslanmaz çeliklerin üzerine farklı kaynak akım değerlerinde düz dikişler çekilmiştir. Daha sonra Şekil 6.1'de görüldüğü gibi nufuziyet ile ilgili derinlik (P), genişlik (W) ve dikiş yüksekliği (H) değerleri Şekil 6.2 deki gibi stero mikroskop görüntüleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin görüntüleri stero mikroskopta alınarak farklı kaynak akımı değerlerinin kaynak nufuziyetine etkisi görülmüştür.

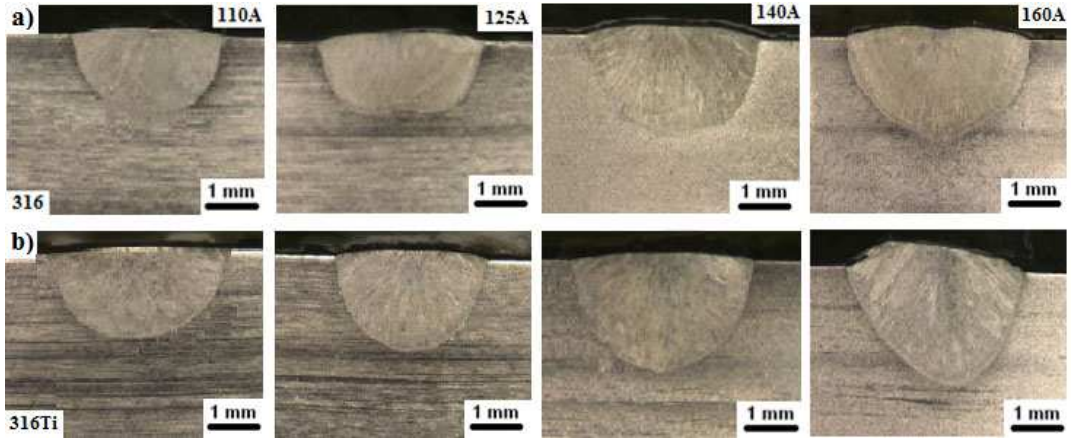


Şekil 6.1. Kaynakta dikiş geometrisinin şematik olarak gösterimi P: Nufuziyet, W: Kaynak genişliği, H: Dikiş yüksekliği

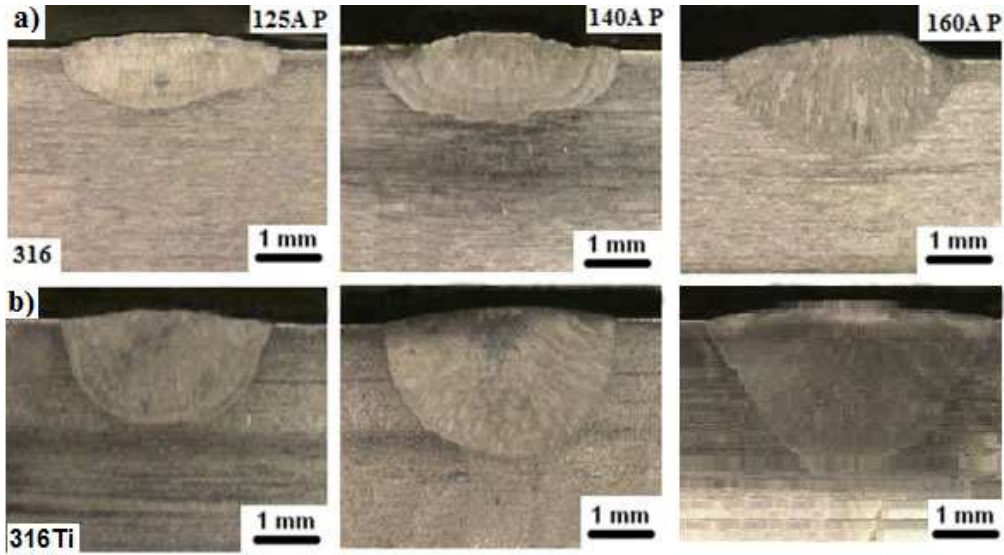


Şekil 6.2. Kaynakta dikiş geometrisinden stereo mikroskop kullanılarak nufuziyet ile ilgili ölçümlerin alınması

4.2 mms⁻¹ kaynak hızında çekilen numunelerin görüntüsü incelendiğinde kaynak akımı artışına paralel olarak hem dikişin nufuziyet derinliğinde hem de kaynak genişliğinde artış görülmektedir (Şekil 6.3). Bu durum darbeli akım kullanıldığında da geçerliğini sürdürmektedir (Şekil 6.4). Paslanmaz çelik malzemeler üzerine ilave metal kullanılmadan çekilen kaynak dikişindeki nufuziyet değerleri ve kaynak dikişi esnasında kullanılan kaynak akımı, kaynak gerilimi ve kaynak hızı gibi parametreler Tablo 6.1’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde kaynak akımı değerinin artışına paralel olarak hem nufuziyet derinliği hem de kaynak genişliği artmaktadır. Genel olarak kaynak dikiş yüksekliği de kaynak akımı değerlerine bağlı olarak bir artış göstermektedir. Kaynak akımı değerleri türüne bağlı olarak da farklılıklar görülmektedir. Darbeli akım kullanıldığında genel olarak kaynak nufuziyet değerleri düşmekte, buna karşılık kaynak genişliği değerleri de artmaktadır. Darbeli akım ile yapılan kaynak dikişlerinde de kaynak akımı değerlerindeki artışa bağlı olarak kaynak dikiş yüksekliğinde de artış görülmektedir.



Şekil 6.3. Farklı kaynak akımı değerlerinde ilave metal kullanmadan kaynatılan a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo görüntüleri



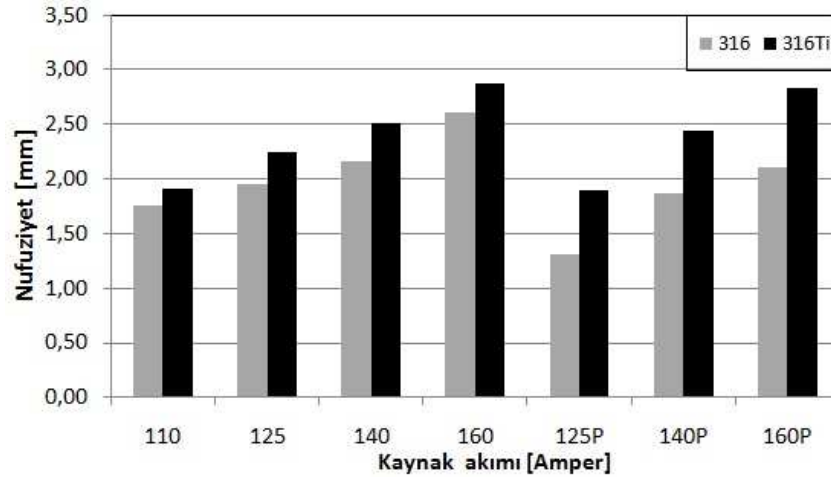
Şekil 6.4. 4.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak farklı kaynak akımı değerlerinde darbeli akımda ve ilave metal kullanmadan kaynatılan a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik parçaların stereo görüntüleri

Tablo 6.1. Telsiz olarak yapılan kaynakta kullanılan kaynak parametreler ve elde edilen nufuziyet ile ilgili ölçümler

Kaynak akımı (Amp.)	Kaynak gerilimi (volt.)	Isı girdisi (Jmm^{-1})	Kaynak hızı (mms^{-1})	Ölçü türü	Malzemeler			
					AISI 316		AISI 316Ti	
					Kaynak yöntemleri			
					TIG	TIG+darbe	TIG	TIG+darbe
					Nufuziyet (μm)			
110	15	125	4,2	P	1762	-	1911	-
				H	276	-	265	-
				W	5342	-	5119	-
125	15,3	319		P	1947	1306	2241	1901
				H	293	318	254	286
				W	6361	6977	5979	6447
140	15,6	364		P	2155	1874	2516	2441
				H	361	414	233	446
				W	6670	7997	6372	8092
160	17,2	459		P	2611	2103	2877	2825
				H	372	562	849	254
				W	8305	8311	7987	7093

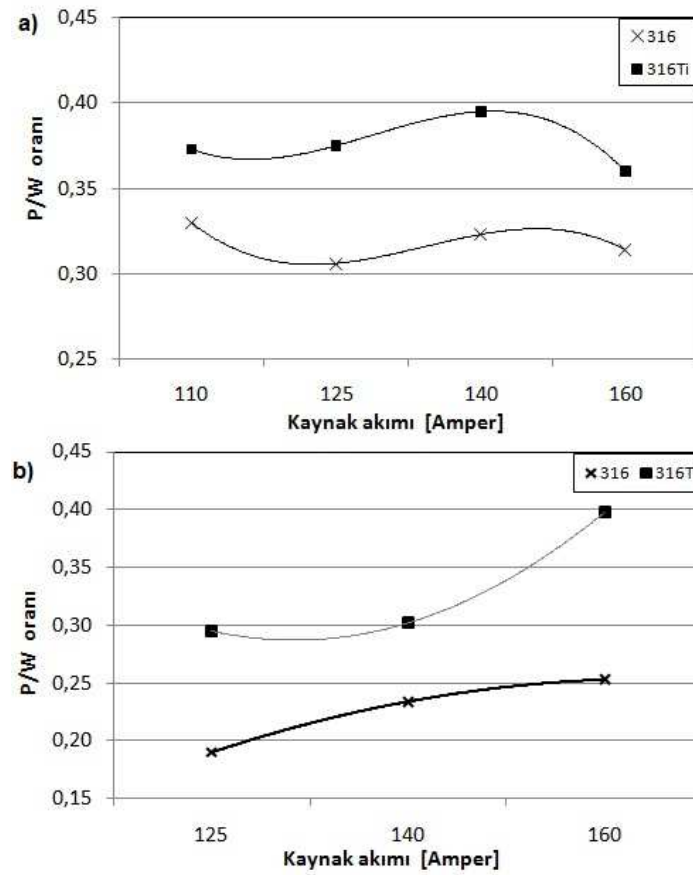
Şekil 6.5’de kaynak parametrelerinin ilave metal kullanılmadan yapılan kaynak dikişlerinden elde edilen nufuziyet değerlerinin değişimi verilmiştir. Şekilden de açık olarak görüldüğü gibi kaynak akımı değerlerinin artışına paralel olarak hem AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde hem de AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde nufuziyet doğrusal olarak artmaktadır. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde nufuziyet değerleri AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı durum farklı kaynak akım değerlerinde darbeli akım ile çekilen kaynak dikişlerinde de görülmektedir. Ancak burada 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere yapılan kaynak dikişlerinde nufuziyet derinliğinin daha çok arttığı görülmektedir. Şekil 6.6’da normal akım ve darbeli akım kullanılarak kaynatılan ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak dikiş derinliğinin, dikiş genişliğine oranının kaynak akımı değerlerine göre değişimleri verilmektedir. Şekil 6.6. b incelendiğinde Darbeli akımda AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak akımı değerinin artışına bağlı olarak P/W oranlarında çok artmamaktadır. Ancak AISI 316Ti ostenitik

paslanmaz çeliklerde 140 amperden sonra çekilen dikişlerde P/W oranı hızla artmakta ve 160 amperde 0.40 değerine ulaşmaktadır. Böyle bir durum bu tür paslanmaz çeliklerde 140 amperden sonra darbeli akımda kaynak edildiğinde daha derin nüfuziyet elde edileceğini göstermektedir.



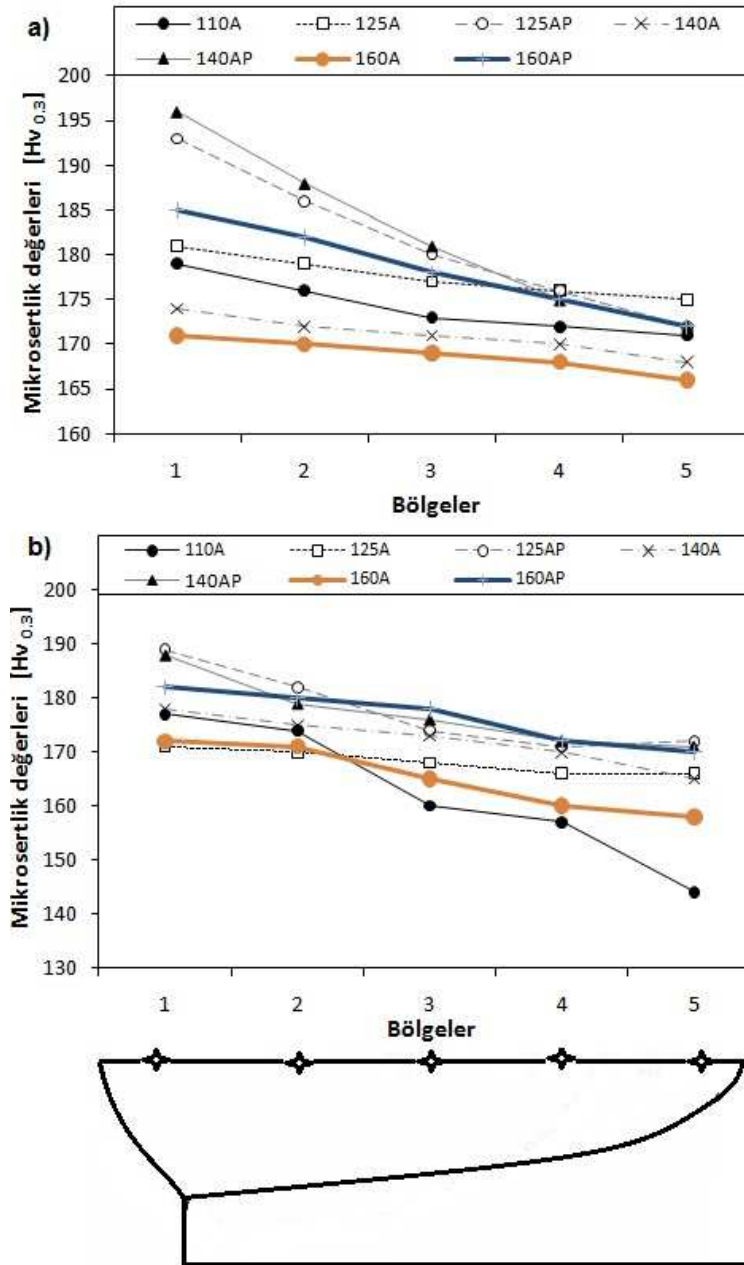
Şekil 6.5. Farklı akım ve türlerinin nüfuziyete etkisi P: Darbeli akım

Şekil 6.6 a'da görüldüğü gibi AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler de kaynak akım değerinin artışına bağlı olarak P/W oranında sürekli değişmektedir. 110 amperden daha da yüksek kaynak akımı değerlerinde yapılan dikişlerde P/W oranları düşmekte ancak bu kaynak akımı değerinin artışına bağlı olarak 140 amperde yapılan dikişlerde P/W oranı maksimum değere ulaşmakta ve daha sonra tekrardan düşmektedir. Benzer durum daha yüksek P/W oranı değerleri elde edilmekle beraber AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde de görülmektedir. Burada en yüksek P/W oranı 140 amperde çekilen dikişlerde görülmektedir. Bu değerden sonra P/W değeri kaynak akımı değerinin artışına bağlı olarak düşmektedir. 140 amperden sonra normal akımda kaynak edildiğinde daha düşük P/W oranlarının elde edileceğini göstermektedir.



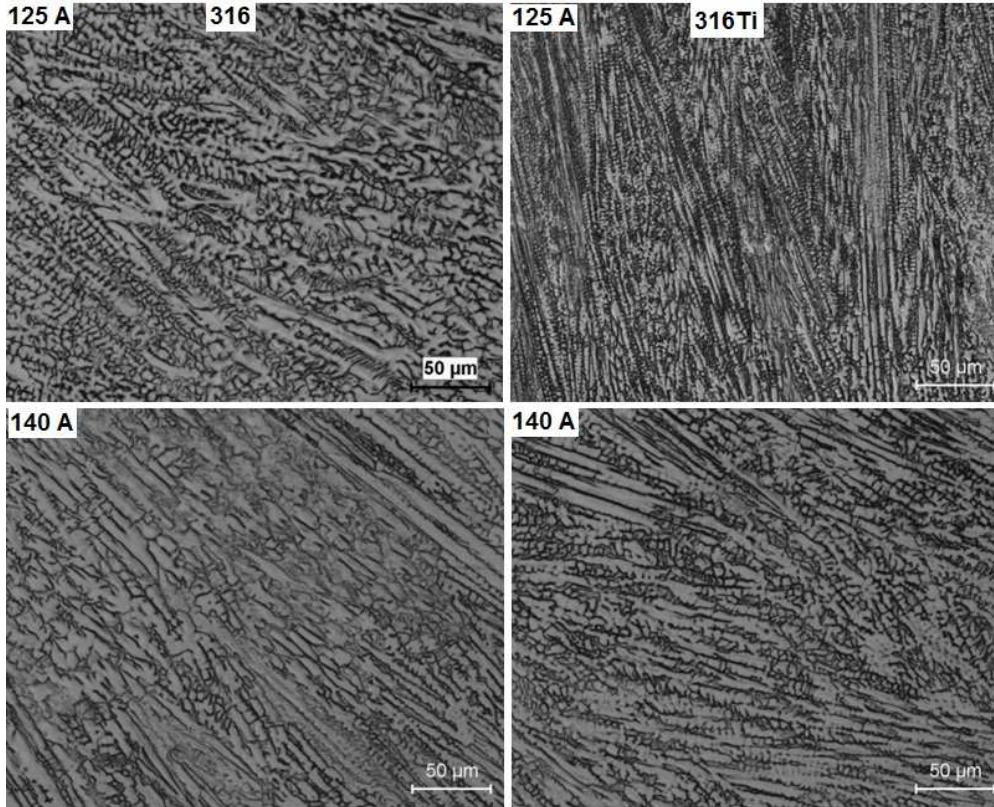
Şekil 6.6. İlave metal kullanmadan a) normal akım b) darbeli akım ile kaynatılan parçalarda kaynak dikiş derinliği/dikiş genişliği (P/W) oranının kaynak akımı değerine göre değişimi

Şekil 6.7’de kullanılan kaynak parametrelerinin mikro sertlik değerlerine etkisi verilmektedir. Şekil incelendiğinde AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak metalindeki sertlik değerlerinin 165 Hv ile 195 Hv arasında değiştiği görülmektedir. Diğer taraftan AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde ise bu değer 140 Hv ile 190 Hv arasında değiştiği görülmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde genellikle sertlik değerleri arasındaki fark daha az olup doğrusal bir eğilim göstermektedir. En yüksek sertlik değerleri 140 amper değerinde ve darbeli akım kullanılarak yapılan dikişlerden elde edilmekte olup, en düşük sertlik değerlerinde ise 160 amper değerinde yapılan kaynak dikişlerinin sahip olduğu görülmektedir. Genelde darbeli akımlarda daha yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde de en yüksek sertlik değerleri darbeli akım kullanılan düşük kaynak akımı değerinde elde edilirken en düşük sertlik değerleri ise 160 amperde çekilen dikişlerde görülmektedir.



Şekil 6.7. Farklı parametrelerde ilave metal kullanmadan kaynak çekilen a) AISI 316 b) AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin kesitlerinden alınan mikrosertlik değerleri

Şekil 6.8’de farklı kaynak akımı değerinde kaynak edilen AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kaynak akımı değerine bağlı olarak mikroyapılarda bazı farklılıklar gözlenmektedir. Kaynak metalinin içerisindeki delta ferrit miktarı ve yönelimleri hem malzeme cinsine göre hem de kullanılan kaynak akımı değerlerine göre farklılık gösterdiği düşünülmektedir.



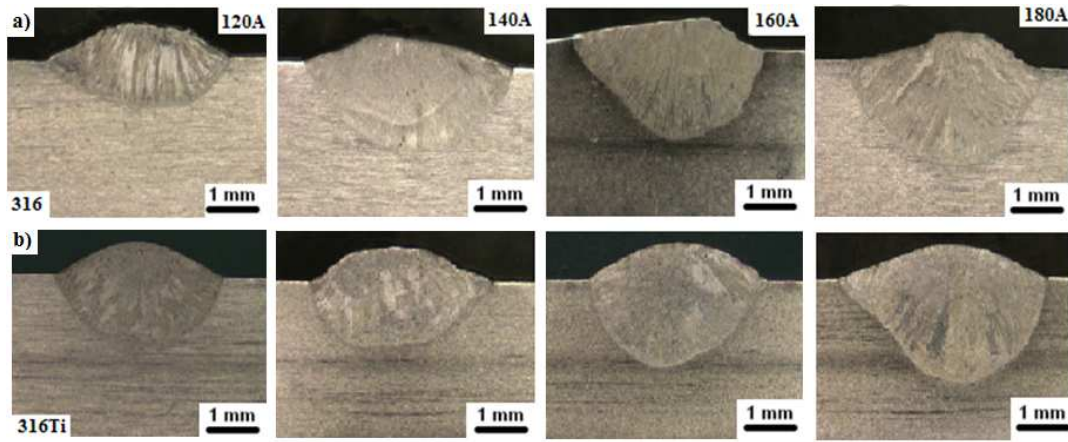
Şekil 6.8. Farklı kaynak akımı değerinde ve ilave metali kullanılmadan kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri

6.2. İlave Metal Kullanılarak Yapılan Kaynakta Nufuziyet İncelemeleri

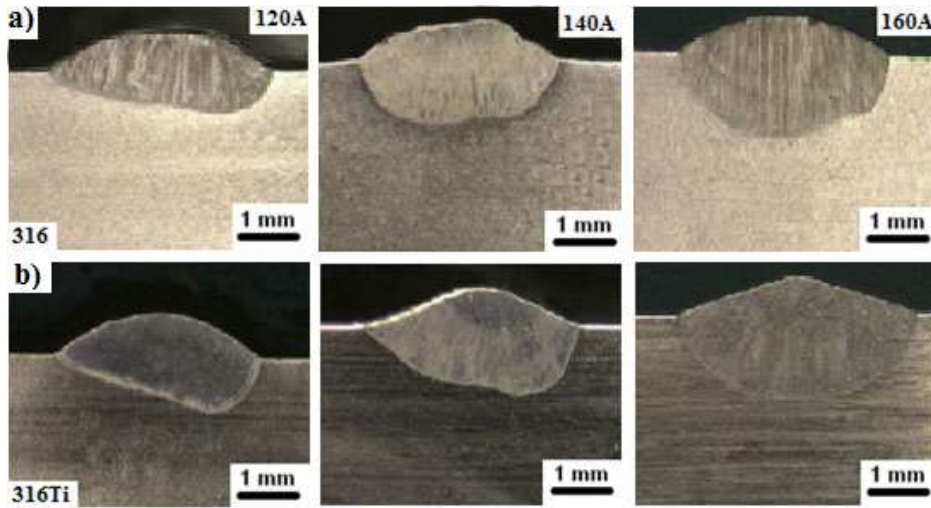
Bu bölümde AISI 316 serisi paslanmaz çeliklerin üzerine farklı kaynak parametrelerinde ilave metal kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak parametrelerinin nufuziyet değerlerine etkisi araştırılmıştır.

6.2.1. Kaynak akımı değerinin nufuziyete etkisi

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da sırasıyla 4.2 mms^{-1} ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızları kullanılarak farklı kaynak akımı değerleri kullanılarak kaynak çekilen numunelerin stereo görüntüleri verilmiştir. Bu iki farklı kaynak hızına göre kaynak nufuziyet değerleri belirtilmiştir. Şekiller incelendiğinde her iki paslanmaz çelik tipi için, kaynak akımı değerinin artışına paralel olarak nufuziyette artış görülmektedir. Tablo 6.2'de yukarıda bahsedilen stereo mikroskop görüntülerinden elde edilen nufuziyet değerleri sayısal olarak ifade edilmiştir.



Şekil 6.9. 4.2 mms^{-1} kaynak hızında farklı kaynak akım değerlerinde ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo mikroskop görüntüleri



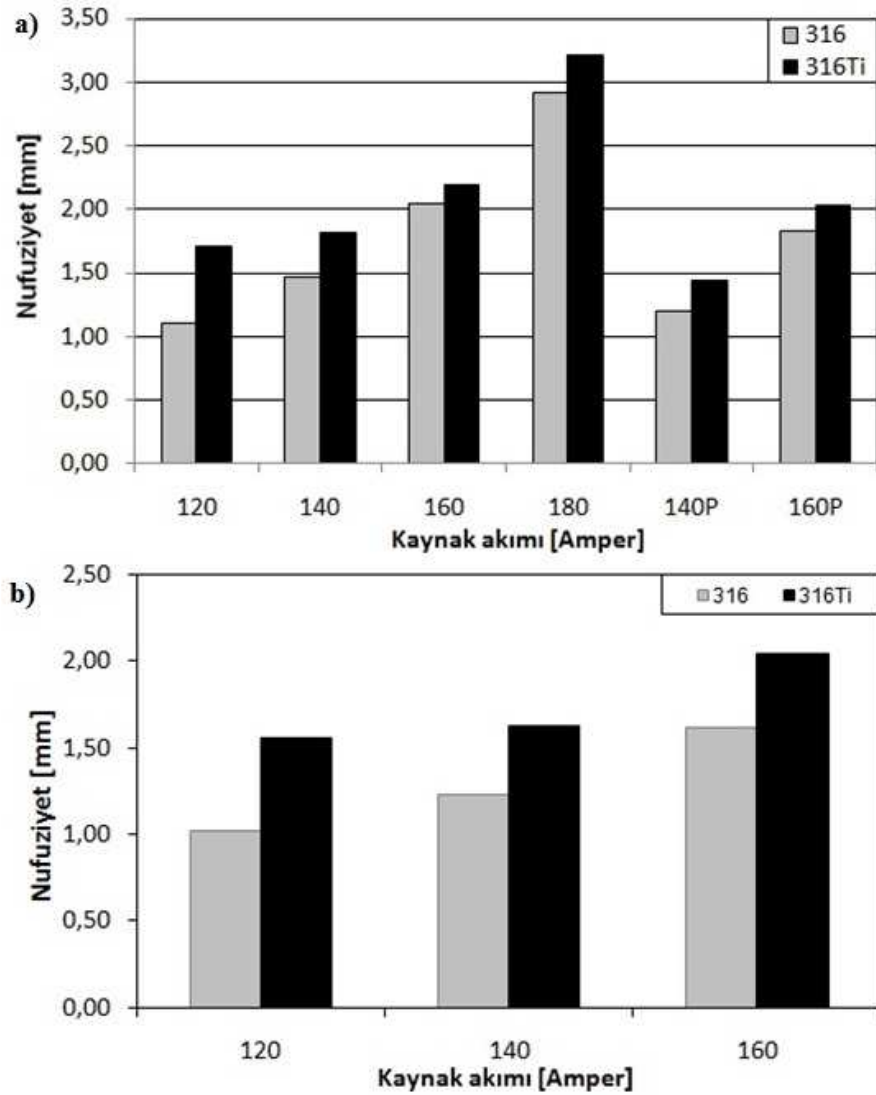
Şekil 6.10. 5.2 mms^{-1} kaynak hızında farklı kaynak akım değerlerinde ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik paslanmaz çelik parçaların stereo mikroskop görüntüleri

Şekil 6.11’de elde edilen nüfuziyet değerleri grafiksel olarak verilmiştir. Şekilden net olarak anlaşıldığı gibi nüfuziyet değerleri kaynak akımına bağlı olarak sürekli artmaktadır. Ancak bu artış düşük kaynak akımı değerinde daha az olmakta, yüksek kaynak akım değerlerinde ise daha çok olmaktadır. Bu durum her iki AISI 316 tipi ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında yüksek kaynak akımı değerinin nüfuziyet bakımından daha etkili olduğu görülmektedir. Darbeli akım kullanıldığında normal akıma göre daha düşük nüfuziyet değerleri elde edilmiştir. Bu durum kaynak esnasında darbeli akımdaki düşük frekans değerlerinden kaynaklandığı ve darbeli

akım türlerinin daha ince malzemelerin kaynağı için kullanıldığından normal karşılanabilmektedir. 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanıldığında yine kaynak akımı değerine bağlı olarak nufuziyet değerleri artmakla beraber bu artış değerleri 4.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak yapılan kaynak dikişlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 6.2. Deneyleerde kullanılan kaynak parametreleri ve elde edilen nufuziyet derinlikleri

Kaynak akımı (Amp.)	Kaynak gerilimi (volt.)	Isı girdisi (J/mm^{-1})	Kaynak hızı (mms^{-1})	Ö l ç ü l e r	Malzemeler			
					AISI 316		AISI 316Ti	
					Kaynak yöntemleri			
					TIG	TIG+darbe	TIG	TIG+darbe
					Nufuziyet (μm)			
120	15,2	304	4,2	P	1105	-	1708	-
				H	1020	-	1193	-
				W	6563	-	5845	-
		246	5,2	P	1019	-	1556	-
				H	1009	-	1189	-
				W	6850	-	6266	-
140	15,6	364	4,2	P	1470	1200	1816	1444
				H	860	1179	1062	1200
				W	7551	8453	7466	7550
		294	5,2	P	1231	-	1625	-
				H	945	-	955	-
				W	6956	-	7211	-
160	17,2	459	4,2	P	2047	1830	2187	2031
				H	672	873	1083	687
				W	8186	9532	9530	8272
		371	5,2	P	1620	1275	2046	1605
				H	688	1104	919	1121
				W	9240	8612	7312	8729
180	17,8	534	4,2	P	2920	-	3217	-
				H	1041	-	934	-
				W	9812	-	9489	-



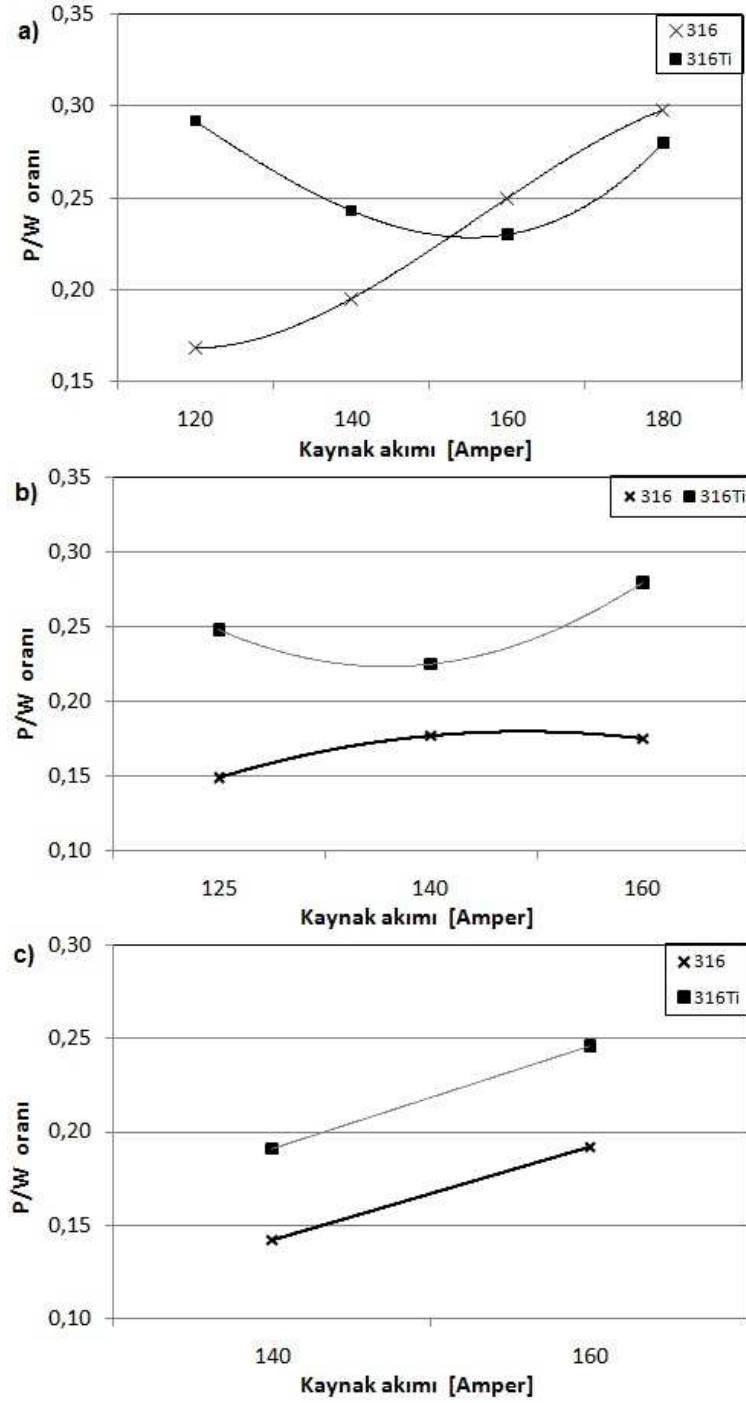
Şekil 6.11. İlave metal kullanılarak a) 4.2 mms⁻¹ b) 5.2 mms⁻¹ kaynak hızlarında farklı akım türü ve değerleri ile kaynatılan malzemede nufuziyet değerlerinin değişimi

AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için normal akımda kaynak akım değerlerinin artışının nufuziyet değerlerinin artışında etkili olduğu söylenilebilir. Diğer taraftan AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler için P/W oranı kaynak akımı değerinin artışına bağlı olarak sürekli düşüş göstermekte, 160 amperden sonra bu değer tekrar artmaktadır. Ancak 180 amperde çekilen kaynak için elde edilen P/W oranı AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerinin kine göre daha düşük değerdedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak akımı değerinin artışına paralel olarak kaynak nufuziyeti sürekli artarken kaynak genişliği de daha fazla artmaktadır (Şekil 6.12 a). Ancak bu çeliklerde düşük akımlarda nufuziyetin daha etkili olduğu görülmektedir. Bu durum AISI 316 tipi ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı iletim katsayısının büyük

olmasından kaynaklanabilmektedir [114]. Buna karşılık 5.2 mms^{-1} hız ve normal akım kullanıldığında AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde P/W oranının bütün kaynak akımı değerlerinde AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek olduğu Şekil 6.12 b'de görülmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde artış çok az olmakla beraber 140 amperden daha yüksek değerlerde P/W oranı sabit olmaktadır. Bu durum AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde bu hız değerlerinde kaynak akımı değerinin artışının nufuziyet değerlerine etkili olmadığını göstermektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde ise önce kaynak akımının artışına paralel olarak P/W oranı bir miktar düşmekte ve 140 amperden sonra ise artışa geçmektedir. Daha yüksek hızlarda yapılan kaynaklarda kaynak akımı değerinin artışının nufuziyete etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da AISI 316Ti malzemelerde ısı iletim katsayısının daha yüksek olmasından kaynaklanabilir. Ostenitik paslanmaz çelikler hızlı kaynak edildiğinde malzeme üzerindeki kaynak edilen bölgelerde daha az enerji verildiğinden ve kaynak hızlı çekilen kaynaklarda enerji girdi değerleri az olduğundan, ısı akışının da sürekli malzeme derinliğine olacağı, böylece malzeme nufuziyet genişliğinin artışının kaynak genişliğinin artışına göre daha fazla olduğu düşünülmektedir. Düşük kaynak hızlarında ise ostenitik paslanmaz çeliklerde malzeme üzerinde enerji değerlerinin yoğunluğu fazla olacağından ısı akışı her tarafa doğru gidecek, böylece nufuziyet derinliği ile beraber kaynak dikiş genişliği de artacaktır. Böylece P/W oranları daha fazla düşecektir. Darbeli akım kullanılarak yapılan kaynak dikişlerinde P/W oranları her iki malzeme türü için kaynak akımı değerine paralel olarak artış göstermektedir. Ancak elde edilen P/W oranları normal akımdakine göre düşüktür. Darbeli akımda da elde edilen P/W oranları AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde daha yüksektir.

Daha önceki çalışmalarda [12, 18, 115] belirtildiği gibi, TIG kaynak işleminde Marangoni ısı iletimi modu olarak belirtilen sistemde kaynak banyosu yüzeyi gerilimi ve kaynak banyosu içerisindeki ısı transfer davranışı ile değişmektedir. Genellikle yüzey gerilimi sıcaklığın artışı ile azalma eğilimindedir. Böyle bir durumda geniş fakat az derinliğe sahip bir kaynak nufuziyeti sağlanmaktadır. Kaynak banyosu yüzeyi ile merkez arasında büyük bir sıcaklık farkı olduğundan yüzey boyunca yüzey gerilim farkı oluşmaktadır. Soğuk kenar bölümlerinde yüzey gerilimi yüksek olduğundan akışkan banyonun merkezinden kenara doğru akarak genişliği

çok ve derinliği az kaynak dikişi elde edilmektedir. Kaynak metalinin yüzeyinde kükürt, oksijen veya selenyum gibi elementler olduğunda yüzey gerilimin sıcaklık katsayısı negatif den pozitif değere doğru yönelmekte ve Marangoni ısı iletimi yönü değişerek merkezde daha derin ve dar kaynak dikişi gerçekleşmektedir [12, 115]. Bahsedilen bu durum kaynak esnasında koruyucu gaz olarak argon içerisine belirli bir miktarda oksijen ya da CO₂ ilave edildiğinde gerçekleşmektedir. Malzeme içerisinde bulunan Cr, Si Mn ve Ti gibi elementler oksijenle reaksiyona girerek malzeme yüzeyinde sınır tabakası oluşturmaktadır. Böylece malzeme içerisinde Marangoni ısı iletimini merkeze doğru yaparak nufuziyet derinliğinin artması sağlanmaktadır [115]. Şimdiki çalışmada koruyucu gaz olarak argon+%5H₂ kullanılmış olup, koruyucu gaz içerisinde oksijen bulunmamaktadır. Ancak hidrojen aktif bir gaz olduğundan malzeme içerisinde herhangi bir şekilde var olan oksijeni süpürebilme ve kaynak metalinden uzaklaştırma özelliğinden dolayı gözeneksiz ve temiz kaynak dikişleri elde edilebilmektedir [17, 19-24]. Hidrojen gazının ısı iletim katsayısının yüksek olması nedeniyle derin nufuziyet sağlamaktadır [19, 20]. AISI 316Ti malzemenin içerisinde titanyum bulunması herhangi bir şekilde titanyum oksit oluşturabileceğinden yukarıda belirtilen etkilerden dolayı daha derin nufuziyetin sağlanabileceği düşünülmektedir. Esasında AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik malzemenin ısı iletim katsayısı (16,3 Wm⁻¹.K⁻¹), ile, AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik ısı iletim katsayısından (15 Wm⁻¹.K⁻¹) daha yüksektir [114].



Şekil 6.12. İlave metal kullanılarak a) 4.2 mms⁻¹ hız ve normal akım b) 5.2 mms⁻¹ hız ve normal akım c) 4.2 mms⁻¹ hız ve darbeli akımda kaynatılan malzemede kaynak dikiş derinliği/dikiş genişliği (P/W) oranının kaynak kaynak akımı değerlerine göre değişimi.

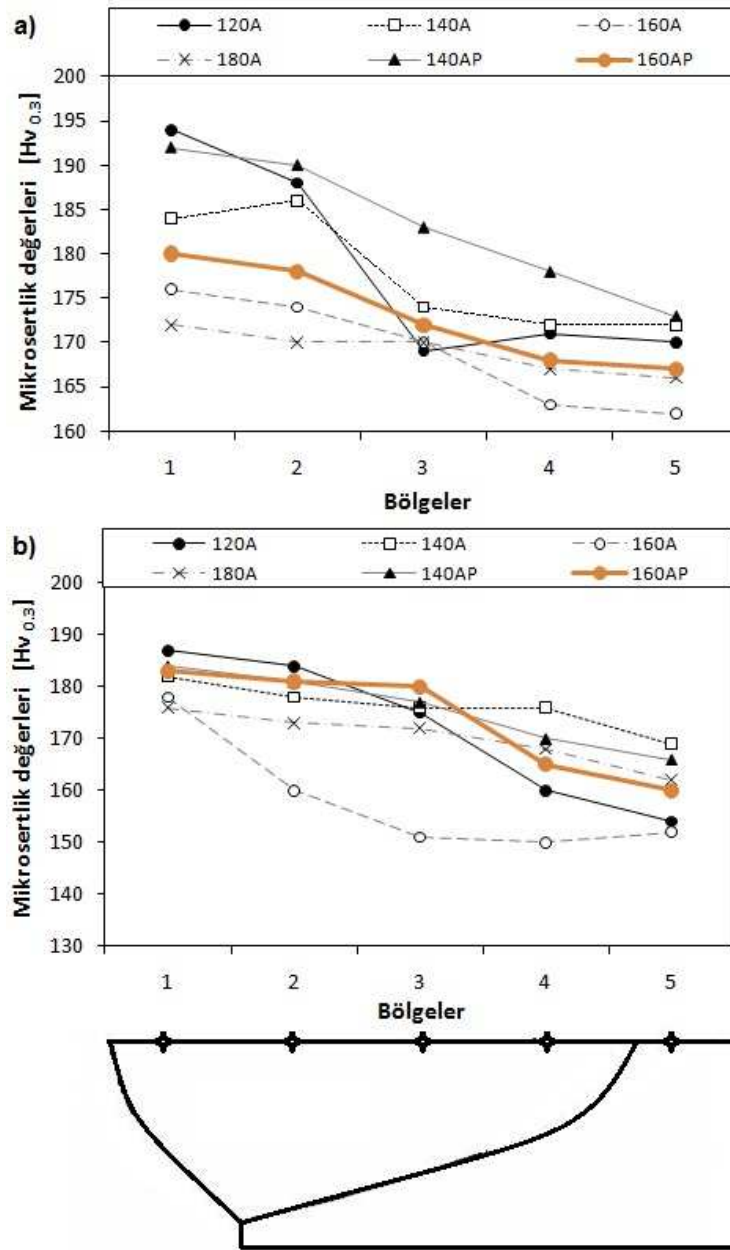
Şekil 6.13'de kaynak esnasında kullanılan farklı parametrelerin mikro sertlik değerlerine etkisi verilmiştir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için en yüksek sertlik değerleri 120 amperde yapılan kaynak dikişlerinden elde edilmiştir. En düşük sertlik değerleri ise 180 amperde yapılan kaynak dikişlerinden elde edildiği

gözlenmektedir. Darbeli akım ile yapılan kaynaklarda sertlik değerlerinin aynı kaynak akımı değerlerinde normal akım kullanılarak yapılan kaynakların sahip olduğu sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Esasında mikro sertlik değerleri arasında çok büyük farklar bulunmamaktadır. Malzemenin ostenitik yapıya sahip olması sebebiyle ısınma ve soğuma sırasında sertlik değerlerinde önemli bir artış olmaması normal karşılanmaktadır. Bu tür malzemelerde malzemenin içerdiği karbon miktarının sertlik değerlerine bir miktar etkisi bulunmaktadır. Bu durumda AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Çünkü AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek miktarda karbon içermektedir. Bu çalışmalarda yapılan sertlik incelemelerinde malzemenin yüzeyinde sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu, aşağı nüfuziyet derinliğine doğru sertlik değerlerinde düşüş görülmektedir. Ayrıca, düşük değerlerdeki kaynak akımlarında mikrosertlik değerlerinin biraz daha yüksektir. Bu malzemelerin yüzeyinden daha hızlı soğuması sonucu hızlı soğumanın getirdiği kalıntı gerilmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca malzeme içerisindeki delta ferrit miktarına bağlı olarak sertlik değerlerinde artışlar görülebilir. Kaynak metalinde bulunan δ -ferritin varlığı ana metale oranla karşılaştırıldığında çok yüksek olduğundan kaynak metalinin daha yüksek sertliğe sahip olmasına neden olmaktadır.

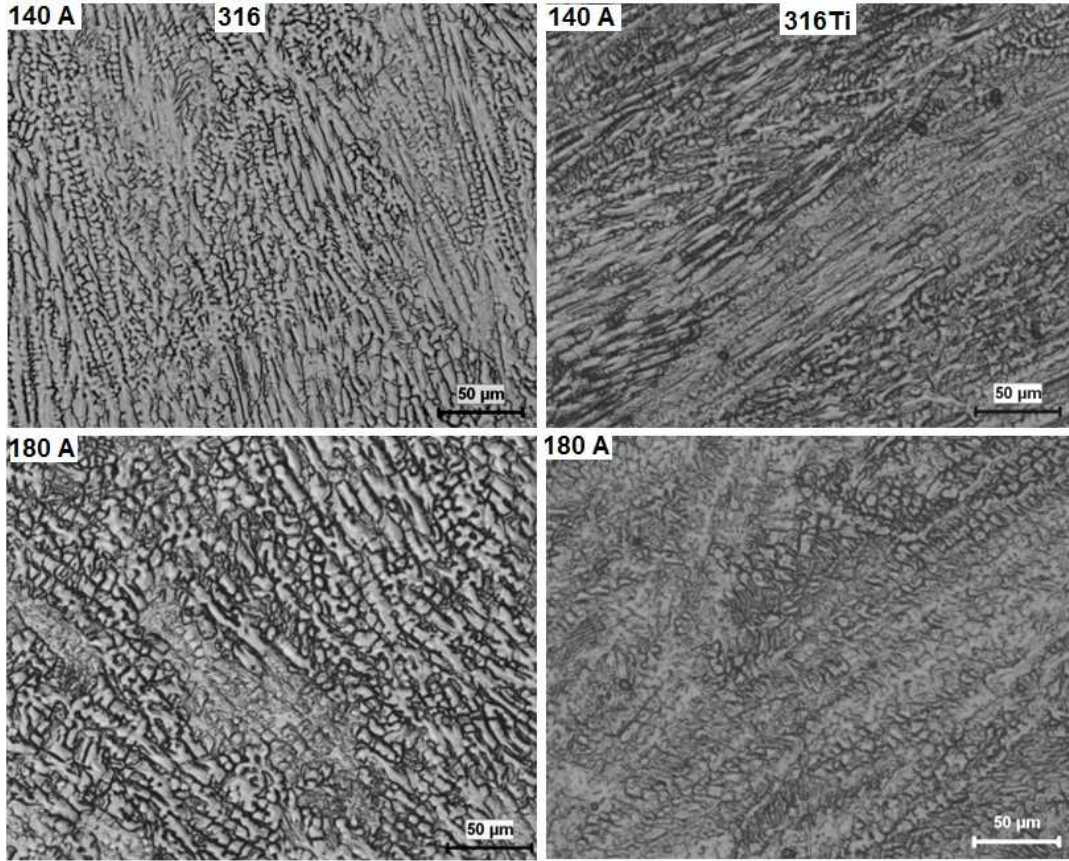
Çalışmada kullanılan her iki ostenitik paslanmaz çeliklerin ana metalden ölçülen sertlik değerleri literatürde her iki malzemenin sertlik değeri 155 HV dir. Çalışmadan elde edilen sertlik değeri literatür değerleriyle uyumaktadır [114].

AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde en yüksek sertlik değerleri 120 amperde yapılan kaynaktan elde edilmektedir. En düşük sertlik ise 160 amperde yapılan kaynaktan elde edilmiştir. Genel olarak darbeli akım kullanılarak yapılan kaynaklarda sertlik değerleri benzer kaynak akımı değerlerinde yapılan kaynaklardan elde edilen sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlarla ilgili AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere benzer yorumlar yapılabilmektedir.



Şekil 6.13. Farklı parametrelerde ilave metal kullanılarak kaynak edilen a) AISI 316 b) AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler üzerinden alınan mikrosertlik değerleri

Şekil 6.14'de farklı kaynak akımı değerinde kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Hem kaynak akımı değerinin türüne hem de malzeme türüne göre şekillerde farklılık görülmektedir. Bu farklılıklar her iki malzemede farklı kimyasal kompozisyonlar, fiziksel özellikler ve kaynak akımı, sonucu malzemeye verilen enerji değerlerine göre değişebilmektedir.



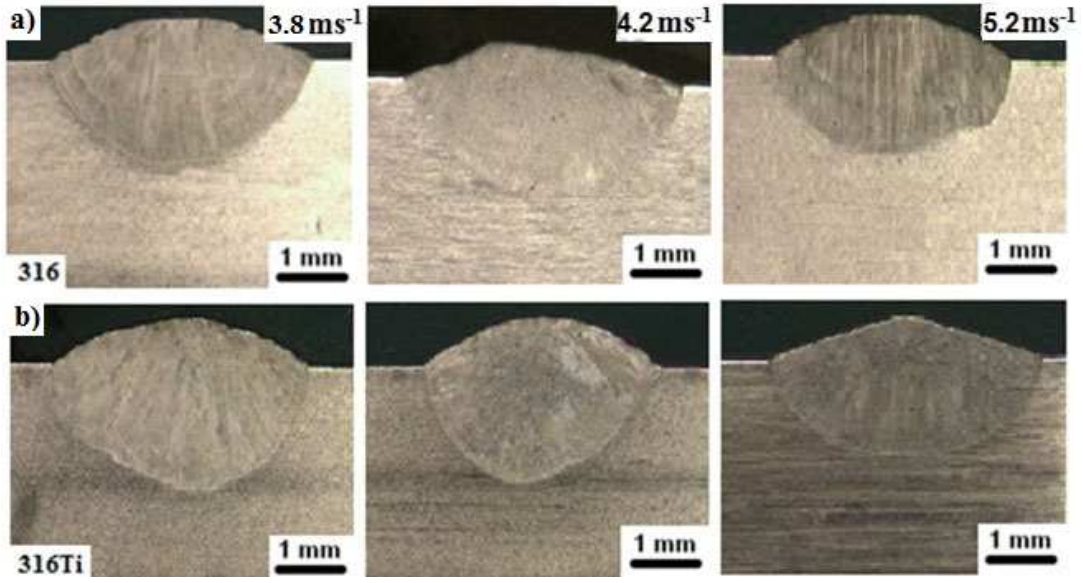
Şekil 6.14. Farklı kaynak akım değerlerinde ilave metali kullanılarak kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metallerinin optik mikroskop görüntüleri

6.2.2. Kaynak hızının nufuziyete etkisi

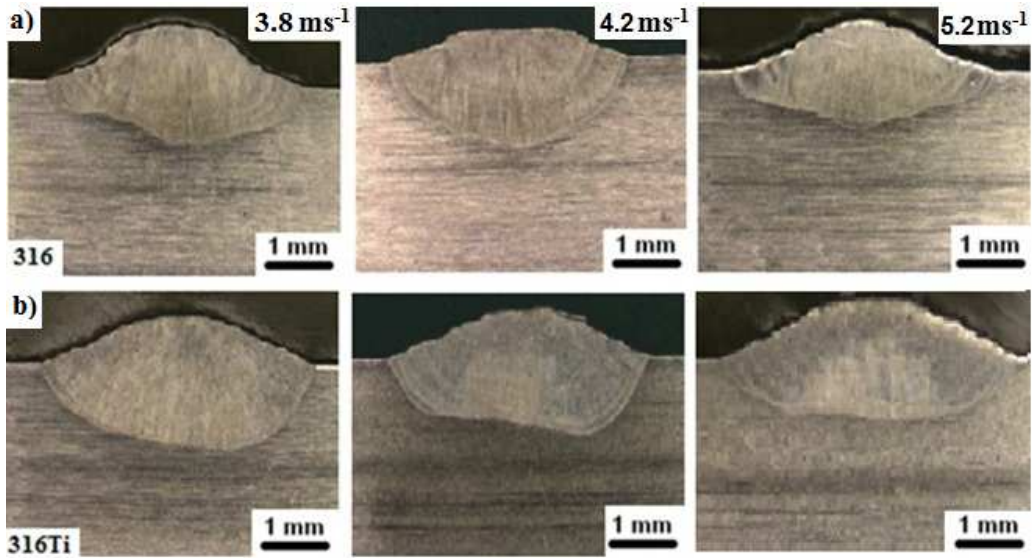
Nufuziyetle ilgili son çalışmalar ilave metal kullanarak 160 amperde ve üç farklı kaynak hızlarında AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere kaynak çekilip, stereo mikroskop görüntüleri alınarak nufuziyet ile ilgili ölçümler alınmıştır. Yapılan çalışmalar optik mikroskop incelemeleri ve sertlik ölçümleriyle desteklenmiştir. Şekil 6.15’de 160 amperde ve farklı kaynak hızlarında kaynak çekilen parçaların stereo mikroskop görüntüleri verilmektedir. Mikroskoptan da görüldüğü kadarıyla hızın artışıyla malzemeye olan nufuziyette bir miktar düşüş görülmektedir. Aynı durum 160 amperde darbeli akım kullanılarak farklı hızlarda kaynak çekilen parçalarda da görülmektedir (Şekil 6.16). Stereo mikroskoptan alınan ölçümlerin sayısal olarak görülebilmesi için bu değerler Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tabloda belirtilen değerlerin net olarak görülebilmesi için grafiksel olarak Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki ostenitik paslanmaz çelikler için

kaynak hızı artına bağılı olarak nufuziyet değerlerinde dūşūş gōrūlmektedir. Bu dūşūş AISI 316 ostenitik paslanmaz eliklerde AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere gōre daha fazladır. Dolayısıyla AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı iletim kat sayısının dūşūk olması kaynak hızı arttığında da nufuziyet derinliğinin daha az olmasına neden olmaktadır. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı iletim kat sayısı fazla olması sebebiyle kaynak hızının artışına paralel olarak nufuziyet derinliği azalma gōstermektedir.



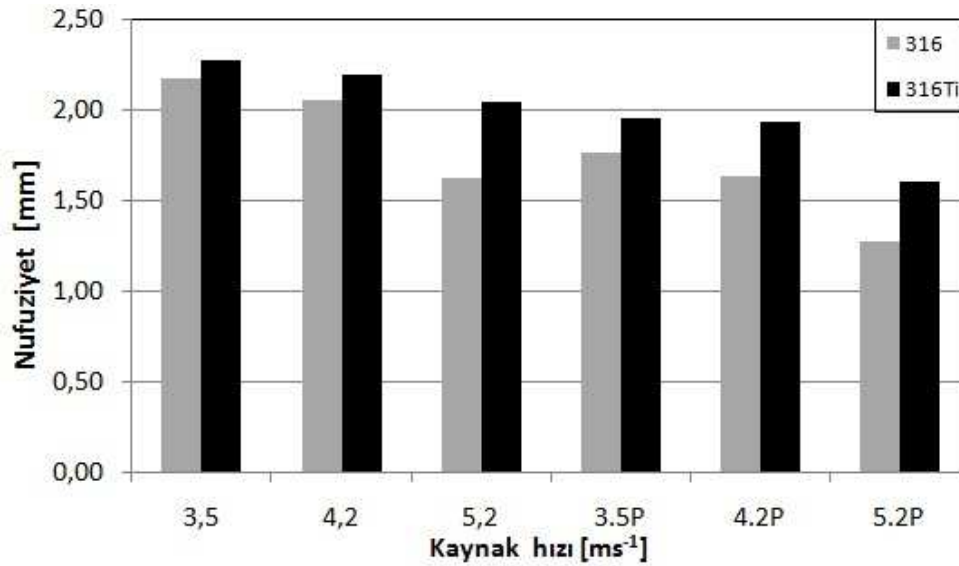
řekil 6.15. 160 amperde ve farklı kaynak hızlarında ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik parçaların stereo mikroskop gōrūntūleri



řekil 6.16. 160 amperde darbeli akım ile farklı kaynak hızlarında ve ilave metal kullanılarak kaynak çekilen a) AISI 316, b) AISI316Ti ostenitik parçaların stereo mikroskop gōrūntūleri

Tablo 6.3. Deneysel olarak kullanılan kaynak parametreleri ve elde edilen nüfuziyet derinlikleri

Kaynak akımı (Amp.)	Kaynak gerilimi (volt.)	Isı girdisi (Jmm^{-1})	Kaynak hızı ($mm s^{-1}$)	Ölçü l e r	Malzemeler			
					AISI 316		AISI 316Ti	
					Kaynak yöntemleri			
					TIG	TIG+darbe	TIG	TIG+darbe
					Nüfuziyet (μm)			
160	17,2	550,4	3,5	P	2167	1760	2371	1933
				H	959	1361	1215	1179
				W	9372	9867	9991	9632
		459	4,2	P	2047	1630	2187	1931
				H	672	873	1083	687
				W	8186	9532	9530	8272
		371	5,2	P	1620	1275	2046	1605
				H	688	1104	919	1121
				W	9240	8612	7312	8729

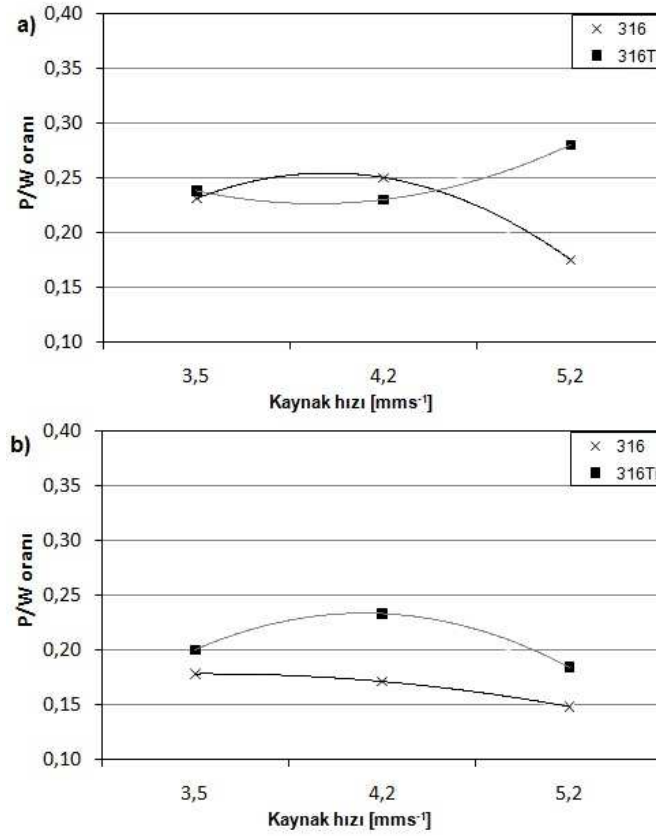


Şekil 6.17. İlave metal kullanılarak normal ve darbeli akımda kaynak edilen parçalarda nüfuziyet değerlerinin kaynak hızına göre değişimi. P: Darbeli akım

Darbeli akımlarda ise benzer durumlar görülmekle beraber nüfuziyet derinliklerinin normal akıma göre daha az olduğu görülmektedir. Şekil 6.18'de kullanılan kaynak hızlarının P/W oranlarına etkisi verilmektedir. Şekil 6.18 a'da normal akım kullanılarak yapılan kaynağın P/W oranları verilmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde P/W oranları kaynak hızının artışına bağlı olarak çok az artış

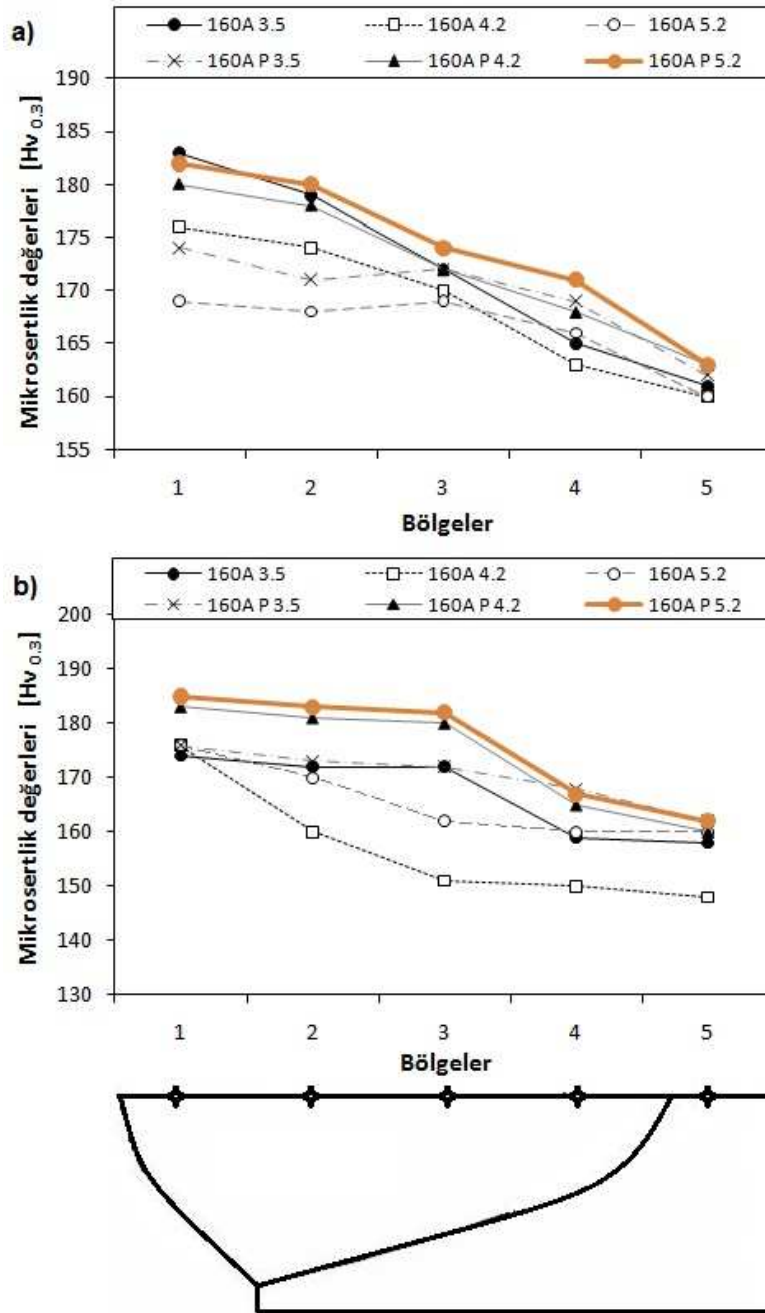
göstermekte, kaynak hızı 4.2 mms^{-1} yi geçtiğinde düşüş artarak, 5.2 mms^{-1} hızla kaynak edilen dikişte en yüksek değere ulaşmaktadır. Yine daha önce açıklandığı gibi AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı kaynak esnasındaki düşük enerji girdilerinde ısı dağılımı nufuziyet derinliğine doğru ısı akışı daha çok olmakta ve kaynak nufuziyet derinliğinin, kaynak genişliğine oranı yükselmektedir. Bu durumda bu tür malzemelerde yüksek kaynak hızlarında kaynak nufuziyet deki düşüşün daha etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 6.18 b'de darbeli akım kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklarda P/W oranları verilmektedir. Darbeli akımda P/W oranlarının daha düşük olduğu ve kaynak hızı arttıkça her iki tür malzemedede de P/W oranlarının azaldığı gözlenmektedir. P/W oranları AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için kaynak hızına bağlı olarak bir miktar artıyor gibi olsa da daha yüksek hızlarda düşmektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde bu tür akımda yapılan birleştirmelerde ise AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek oranlar elde edilmektedir. Genel olarak darbeli akım ile kaynakta kaynak hızları, kaynak nufuziyetine olumsuz etki etmektedir.

Kaynak akımı önemli değişkenlerden biridir [10, 13, 14, 16, 17, 47]. Kaynak akımındaki değişim nufuziyet derinliği, kaynak hızı, ısı girdisi, ilave metal yığılma miktarı ve kaynak kalitesini etkilemektedir [10]. Darbeli ark ile nufuziyet miktarı maksimum olmakta iken kaynak edilen bölüme ısı uygulaması minimum olmaktadır. Darbeler arasında gerekli hareketin zamanında olmasını sağlayarak kaynak banyosunun katılaşmasını sağlamaktadır. Daha önceki çalışmalarda kaynak hızındaki artış nufuziyete olumsuz etki yaptığı belirtilmektedir [12, 16, 17]. Darbeli ark ile ark bölgesinde düşük ısı uygulanarak çalışmak mümkündür. Böylece ince kesitli malzemelerin kaynak edilebilmesi kolaylaştırılmaktadır [8, 10]. Darbe frekans ayarlaması ile kaynak metaline istenilen sayıda ve irilikte metal girişi sağlanabilmektedir. Düşük frekanslarda nufuziyet derinliği az olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan 6 Hz frekans değeri oldukça düşük olduğundan nufuziyet derinlik değeri düşük olmaktadır. Bu sonuç literatür ile uyumludur [9].



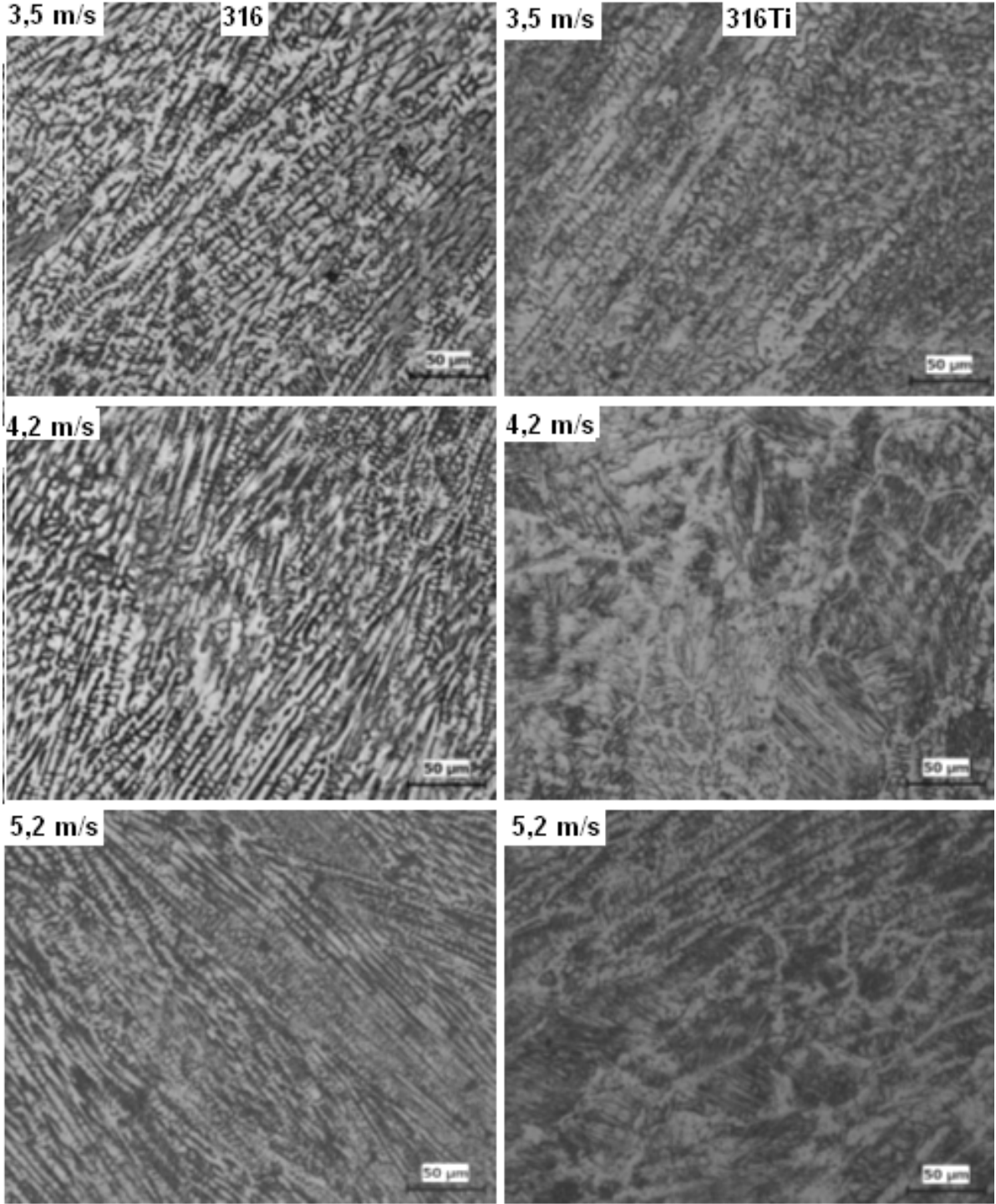
Şekil 6.18. 160 amper ve farklı hızlarında kaynak edilen malzemede a) normal b) darbeleri için kaynak dikiş derinliği/dikiş genişliği oranının kaynak hızına göre değişimi

Şekil 6.19’da kaynak hızlarının kaynak metalindeki sertliğe etkisi verilmektedir. Kaynak hızı arttıkça sertlik değerlerinde de bir miktar düşme görülmektedir AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için en düşük sertlik değerleri 3.5 mms⁻¹ hızla normal akımda kaynak edilen numunelerin sahip olduğu, en yüksek sertlik değerininse 5.2 mms⁻¹ hızla kaynak edilen parçaların sahip olduğu görülmektedir. Darbeleri akımlarda durum tam tersine dönmekte ve yüksek hızlarda yapılan kaynakların daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde ise sertlik değerleri bir birine çok yakın olup yüksek sertlik değeri darbeleri akımda 5.2 mms⁻¹ kaynak hızında yapılan kaynak dikişlerinin sahip olduğu, en düşük sertliğin ise 4.2 mms⁻¹ hızla kaynak edilen parçaların sahip olduğu görülmektedir. Her iki malzeme bir birine kıyaslandığında AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde malzeme yüzeyine yakın olan nokta ile en derin nokta arasındaki sertlik değerleri arasındaki fark AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha fazladır. Bu durumda AISI 316Ti malzemelerde daha yüksek ısı iletim kat sayısına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.19. Farklı hızlarda ve akımlarda ilave metal kullanılarak kaynak edilen a) AISI 316 b) AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler üzerinden alınan mikrosertlik değerleri

Farklı kaynak hızları kullanılarak kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.20’de verilmiştir. Şekle bakıldığında hem malzeme cinsi, hem de kaynak hızına göre mikroyapı görüntülerinde farklılıklar görülmektedir.



Şekil 6.20. Farklı kaynak hızlarında ilave metali kullanılarak kaynak dikişi çekilen ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri

Farklı hızlarda kaynak edilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerinin mikroyapıları birbirlerine benzemektedir. İçerisindeki delta ferrit oranlarında da önemli bir farklılık görülmemektedir. Ancak AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında daha çok farklılık olduğu görülmektedir. Kaynak metali

içindeki δ -ferrit miktarı ana metal ve ilave metalin kimyasal kompozisyonları dikkate alınarak Cr ve Ni eşdeğerliğinin hesaplanması sonucu Scheaffler, De Long ve WRC-92 diyagramları yardımı ile belirlenmektedir. Bu çalışmada, Scheaffler diyagramı ile yapılan hesaplama göre AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik kaynak metali içerisinde ostenit+ferrit şeklinde oluşmakta %6,4 iken δ -ferrit içermektedir. Diğer taraftan AISI 316Ti %4,1 miktarında ferrit bulunmaktadır. Her iki kaynak metalinde $Cr_{eş}/Ni_{eş}$ oranı 1,5'ten daha düşük olduğundan malzemedeki çatlama eğilimi bulunmamaktadır [15]. Bu çalışmada AISI 316 için $Cr_{eş}/Ni_{eş}=1,61$ iken AISI 316Ti için $Cr_{eş}/Ni_{eş}=1,55$ olarak hesaplanmış olup mikroyapılarda herhangi bir mikro çatlama rastlanmamıştır.

6.3. Birleştirilen Paslanmaz Çelik Malzemelerin Mikroyapıları İncelemeleri

6.3.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler

AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çelikler farklı kaynak akım değerlerinde ve kaynak hızlarında çift taraflı kaynatılarak, kaynak parametrelerinin malzemenin sertlik dağılımına, çekme dayanımına, çentik darbe tokluğuna ve yorulma özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu malzemelerin optik mikroskop ve kırılma yüzeylerine ait SEM incelemeleri de yapılmıştır. AISI 316 tipi ostenitik paslanmaz çelikler malzemeler için optik görüntüleri Şekil 6.21 ile Şekil 6.24 arasında verilmiştir. Şekiller incelendiğinde ilk karşılaşılan özellik düşük kaynak hızı ve yüksek kaynak akımı değerlerinde kaynak metali ile ana metal arasında kalan ITAB'da ki geçiş bölgesindeki farklılıklardır. Bu geçiş bölgesinde yüksek kaynak akımı değerinde ve düşük kaynak hızlarında yapılan numunelerde geçiş bölgesinin daha geniş ve tanelerin ana malzeme ile karşılaştırıldığında bozulduğu ve bazı bölgelerde incelendiği bazı bölgelerde ise irileştiği görülmektedir. Esasında ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak işleminde veya daha sonra uygulanan herhangi bir ısıl işlem sonucu tane yapısında bir değişim görülmemektedir. Ancak çok kısa da olsa geçiş bölgesinde farklılıklar kendini hissettirmektedir. Ayrıca, kaynak akımı değerinin artışı ve kaynak hızının düşük olması kaynak esnasında malzemeye ısı girdisinde artış sağlayarak kaynak metali bölgesinin genişlemesine neden olmaktadır. Şekil 6.21'de görüldüğü gibi geçiş bölgesinde kaynak metaline benzer yapıların

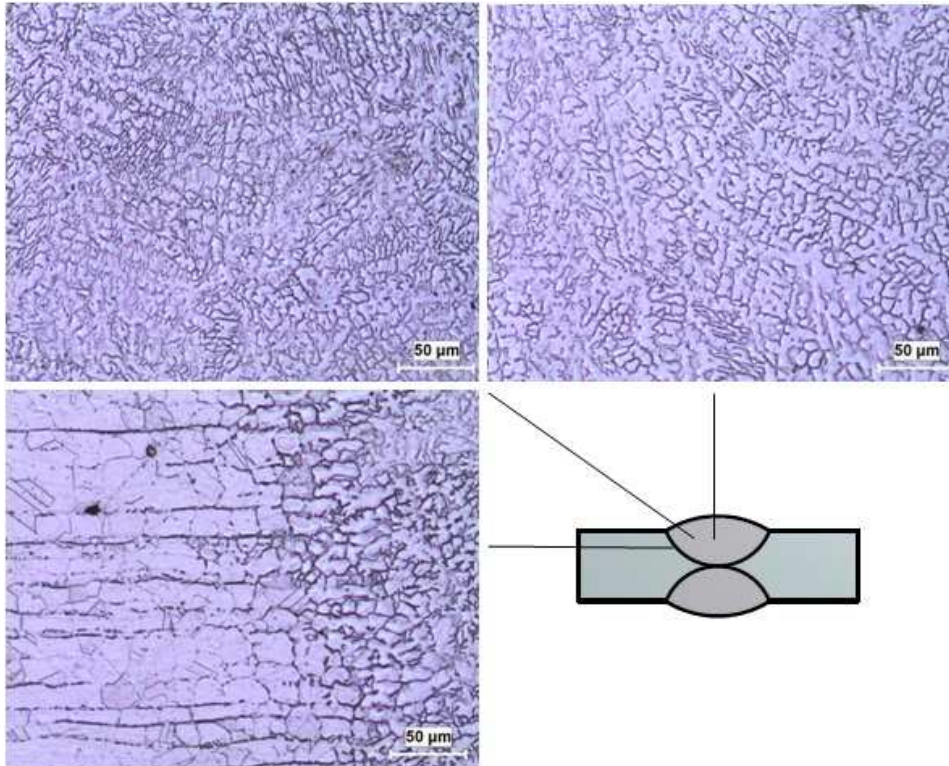
tanelerin arasına yayıldığı gözlenmiştir. Kaynak hızındaki artış ile ana metal ile kaynak metali arasındaki geçiş bölgesi daralmakta ve tane büyüklükleri arasındaki farklılıklar azalmaktadır (Şekil 6.22). Özellikle 150 amperde darbeli akım ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde geçiş bölgesinin çok dar olduğu ve o bölgede bulunan tanelerde herhangi bir irileşme veya küçülmenin oluşmadığı net bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 6.24).

Şekiller incelendiğinde görüldüğü gibi kaynak metalinde bulunan δ -ferrit fazının ince ve dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan kaynak parametrelerdeki farklılıklar kaynak metali içerisindeki δ -ferritin miktarı ve bu fazların yönlendirilmesi gibi farklılıkların oluşmalarına neden olduğu düşünülmektedir. Yüksek kaynak akımı değerinde ve düşük kaynak hızı değerleri kullanılarak yapılan kaynaklarda δ -ferritin tanelerinin daha yoğun olduğu ve geçiş bölgesi diye belirtilen alanın daha geniş olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan birleştirmelerde kaynak metali içerisindeki δ -ferritin miktarı Schaeffler, Delong, WRC 1992 diyagramları ile önceden tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ostenitik paslanmaz çelikler için uygun ilave metalinin kullanılmasıyla yapılan birleştirmelere ait $C_{e\delta}$, $Ni_{e\delta}$ ve δ -ferritin değerleri Tablo 6.4'de verilmiştir. Bu değerlere göre gerçekleştirilen birleştirmelerde herhangi bir problem ile karşılaşılmadan kaynatılabilmekte ve kaynağın gerçekleştirilmesi esnasında herhangi bir önlem alınmasına gerek kalmamaktadır. Bu çalışmadan elde edilen mikroyapılar daha önce elde edilen görüntülerle benzerlik göstermektedir [25, 32, 38, 42, 43]. Ancak, Schaeffler, Delong, WRC 1992 gibi diyagramlar genel bir mikroyapı tahmini vermektedir. Kaynak parametrelerindeki değişimin etkisi bahsedilen diyagramlara yansımamaktadır. Durumun daha net bir şekilde belirlenebilmesi için her bir parametrede gerçekleştirilen birleştirmelerdeki kaynak metalinden alınacak mikro spektral analizler, δ -ferritin miktarının belirlenmesinde kolaylık sağlayacaktır. Ayrıca, kaynak metalinde yapılacak ferroskop ölçümleri δ -ferritin miktarının daha doğru olarak belirlenmesinde büyük kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada optik mikroskop görüntülerinden anlaşıldığına göre kaynak parametreleri oluşan δ -ferritin yapısına, büyüklüğüne ve miktarına etki ettiği düşünülmektedir. Yüksek kaynak akımı değerinden ve düşük kaynak hızının δ -ferritin oranını bir

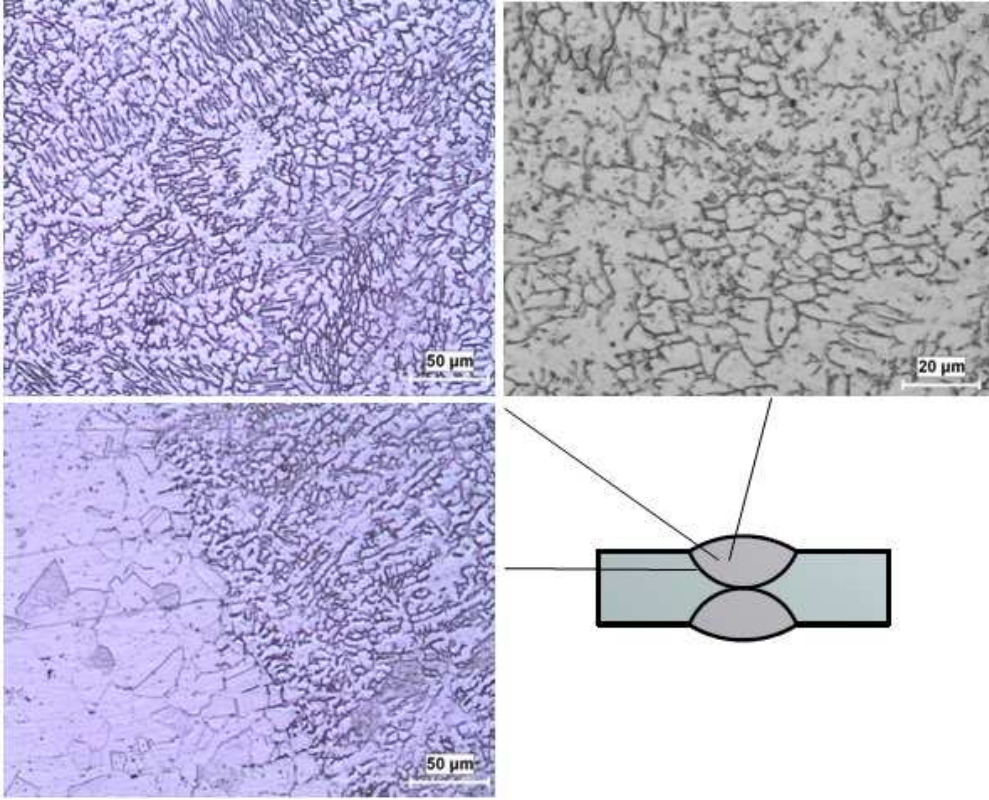
miktar arttırdığı düşünülmektedir. Uygulanan darbeli akımda ise δ -ferritin yapısına, miktarına ve yönleneşine etki ettiği düşünülmektedir.

Tablo 6.4. İlave metal kullanılarak yapılan birleştirmelerde çeşitli diyagramlar kullanılarak elde edilen $Cr_{eş}$, $Ni_{eş}$ ve ferrit değerleri

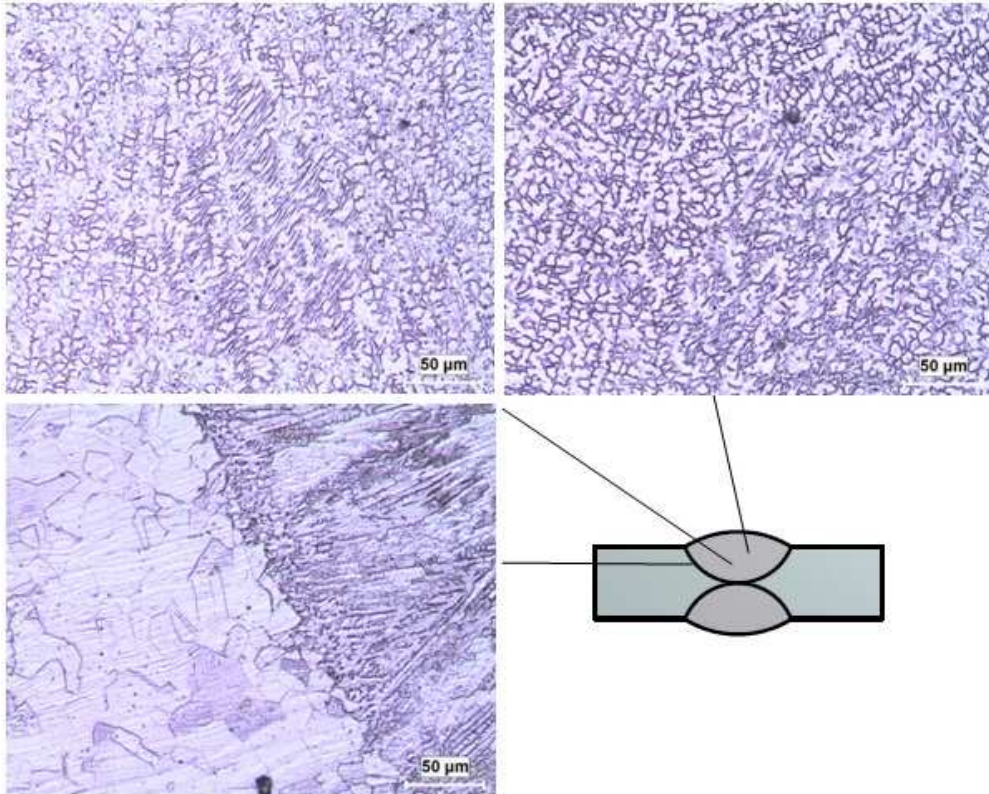
Malzeme ve ilave metal	Schaeffler		Mikroyapı ve % ferrit miktarı	De Long		Ferrit No (FN) % ferrit miktarı	WRC-1992		Ferrit No (FN)
	$Cr_{eş}$	$Ni_{eş}$		$Cr_{eş}$	$Ni_{eş}$		$Cr_{eş}$	$Ni_{eş}$	
AISI 316 ER 316LSi	22.42	13.96	Ostenit + ferrit % 6.4	22.42	13.96	14.1 12.3	21.50	13.25	10.4
AISI 316Ti ER 316LSi	21.38	13.79	Ostenit + ferrit % 4.1	21.38	13.79	9.9 9.1	20.62	13.06	7.8



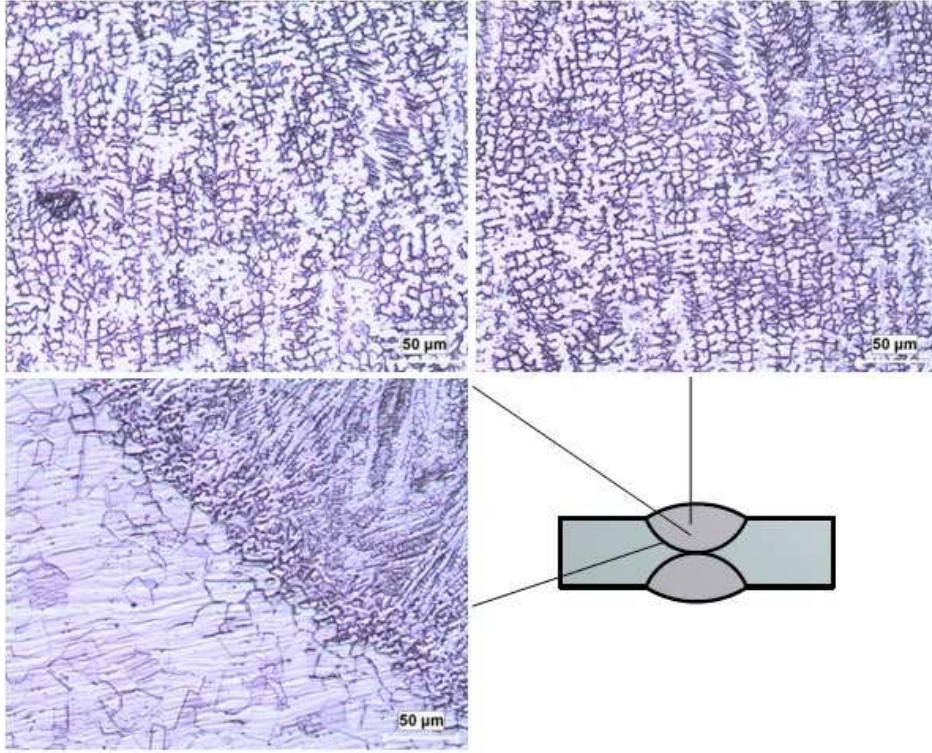
Şekil 6.21. 190 amper değerinde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 6.22. 190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



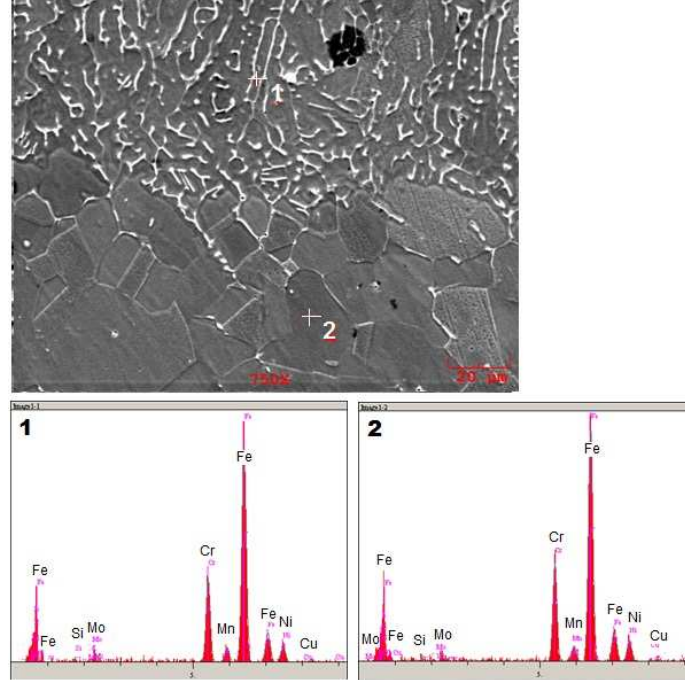
Şekil 6.23. 150 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



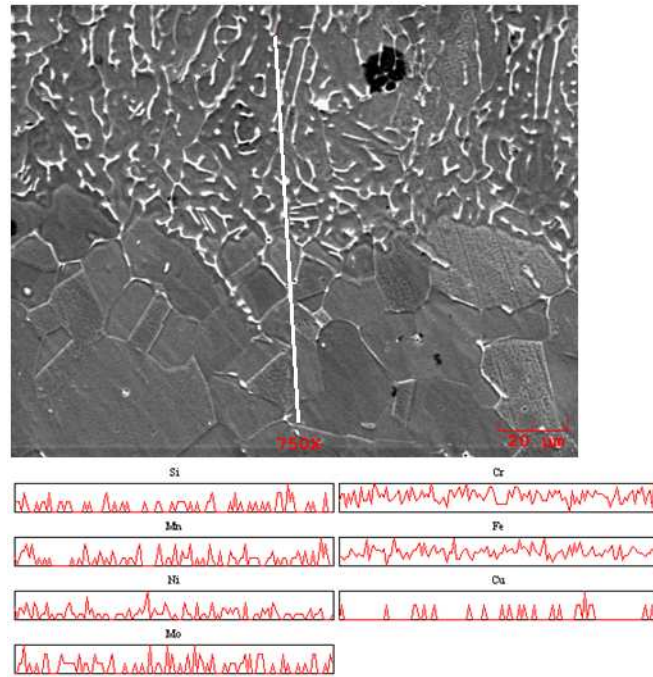
Şekil 6.24. 150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri

TIG kaynağı ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerden sadece 150 amperde darbeli akım ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında birleştirilen numunelerden EDS analizi alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.25’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında kaynak metaline ile ana metalden alınan EDS analiz değerlerinde farklılıklar gözlemlenmektedir. Kaynak metalinde krom, mangan ve nikel miktarında azalma görülürken molibden miktarında bir miktar artış gözlenmektedir. Diğer taraftan bakır miktarında herhangi bir değişim neredeyse söz konusu değildir. Böyle bir oluşum kaynak metalinde farklılığın meydana gelmesine neden olabilmektedir. Mikroyapı analizinde son olarak özellikle geçiş bölgelerinde malzeme içinde bulunan elementlerin dağılımının belirlenmesi için kaynak metalinden ana metale doğru çizgisel analizler alınmıştır. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızında yapılan numunelerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.26’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde ana metalde Si miktarının biraz daha fazla olduğu, geçiş bölgesinde nikel ve mangan miktarının arttığı, molibden miktarının ise kaynak metalinde daha yüksek miktarlarda olduğu gözlenmektedir. SEM resimlerine bakıldığında geçiş bölgesi dar olmakla beraber,

çok dar bir alanda tanelerin ana malzemenin sahip olduğu tanelerden daha küçük boyutlarda olduğu daha net şekilde görülmektedir.



Şekil 6.25. 150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin farklı noktalarından alınan EDS analizi sonuçları

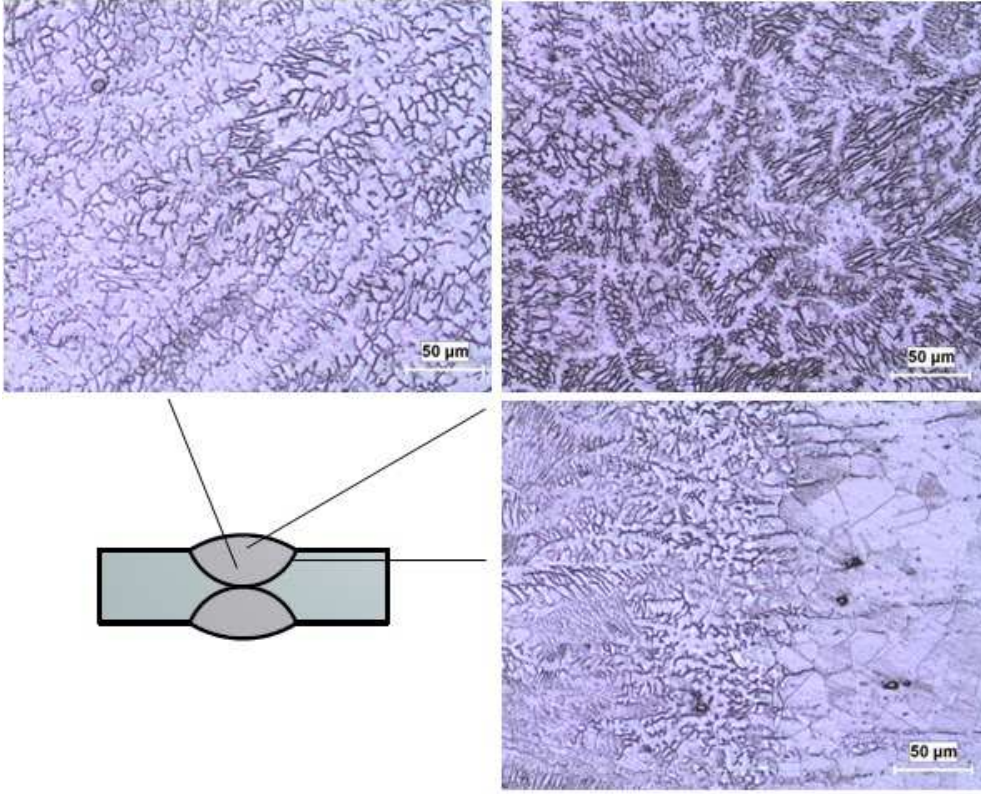


Şekil 6.26. 150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin SEM mikroyapısı üzerinde belirtilen çizgi boyunca elementlerin lineer analiz diyagramı

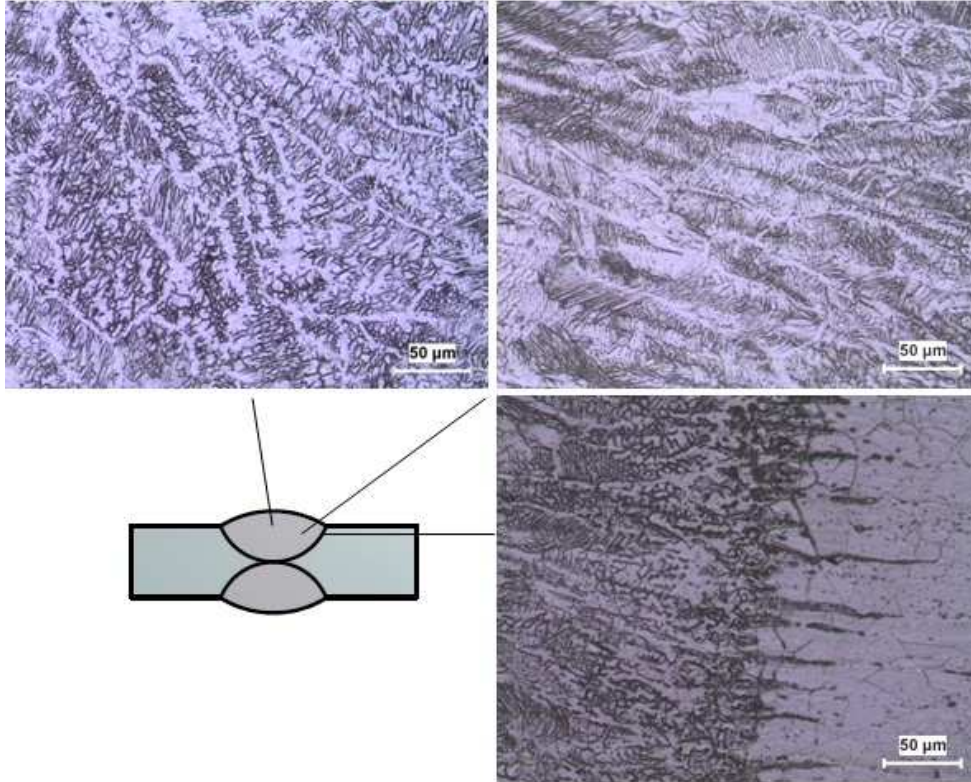
6.3.2. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler

AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler için optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.27 ile Şekil 6.30 arasında verilmiştir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak metalinin geometrisi AISI 316 ya göre daha farklıdır. Ayrıca yüksek kaynak akımı değerlerinde kaynak metali ile ana metal arasındaki geçiş bölgesinin daha geniş olduğu gözlenmektedir. Kaynak hızının artışı ve kaynak akımı değerinin düşmesiyle geçiş bölgesi daralmakta ve neredeyse tane büyüklüklerinde herhangi bir fark bulunmamaktadır. Bu bakımdan 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile yapılan birleştirmelerde ana metalde tane boyutlarında herhangi bir farklılık gözlenmemektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerinin ısı iletim kat sayısının yüksek olması nedeniyle özellikle yüksek kaynak akımı değerinde ve düşük kaynak hızlarında kaynak esnasında kaynak metalinin ana metal ile kaynak metali arasındaki geçiş bölgesinde tanelerin arasına girişi ve yayılma miktarında artış görülmektedir.

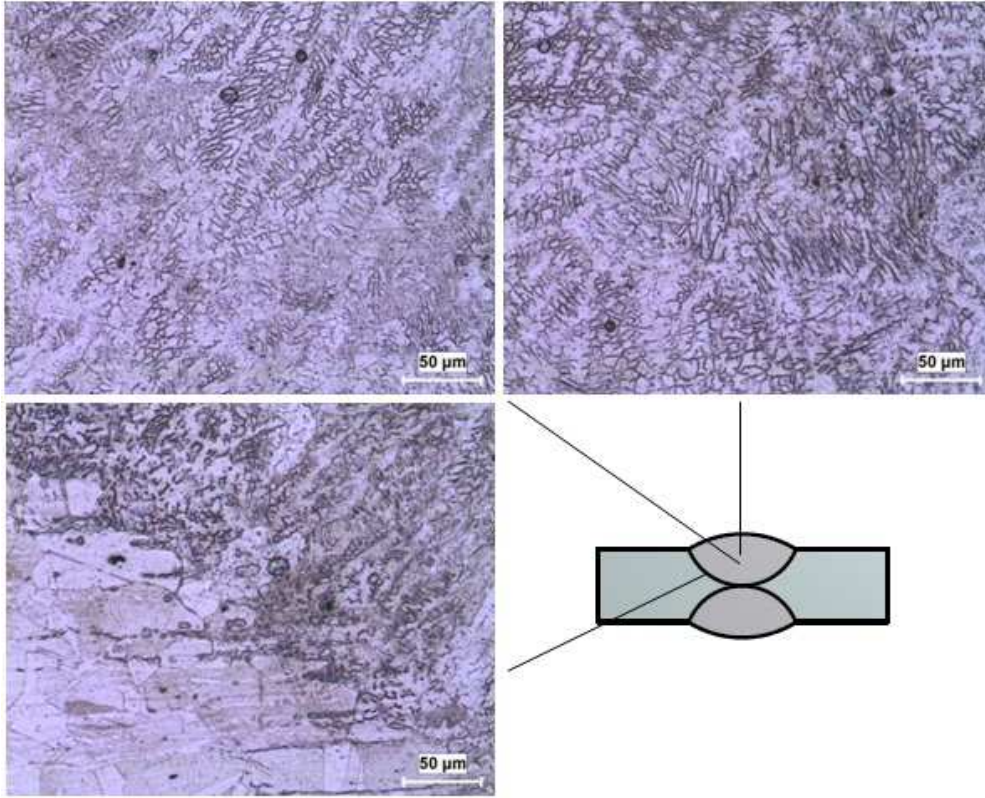
AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde esas farklılık kaynak metalinde görülmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler ile kıyaslandığında kaynak metali oldukça farklıdır. δ -ferrit miktarının oldukça farklı olduğu gözlenmektedir. Bu farklılık geçiş bölgesinde ve kaynak metalinin orta noktasında da farklılıklar gözlenmektedir. Bu tür malzemelerin EDS analizleri sadece 150 amperde darbeli akımda ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 6.31'de verilmiştir. Analiz değerlerine bakıldığında kaynak metalinde titanyum, nikeli, mangan ve molibden miktarı daha yüksek iken, her iki bölgede krom miktarının birbirine eşit olduğu görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi kaynak metali ile ana metal arasında geçiş bölgesi görülmemekte ve tane büyüklüklerinde de herhangi bir farklılık gözlenmemektedir. Çizgi analizinde (Şekil 6.32) ise kaynak metalinden ara yüzeye kadar olan alanda titanyum oranı bir miktar fazla olduğu mangan ve nikel oranlarının kaynak metalin içerisinde arttığı, ara yüzeyde ise molibden miktarında bir artış olduğu gözlenmektedir. Malzeme içerisindeki bakır elementinin kaynak metali alanında az da olsa bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir.



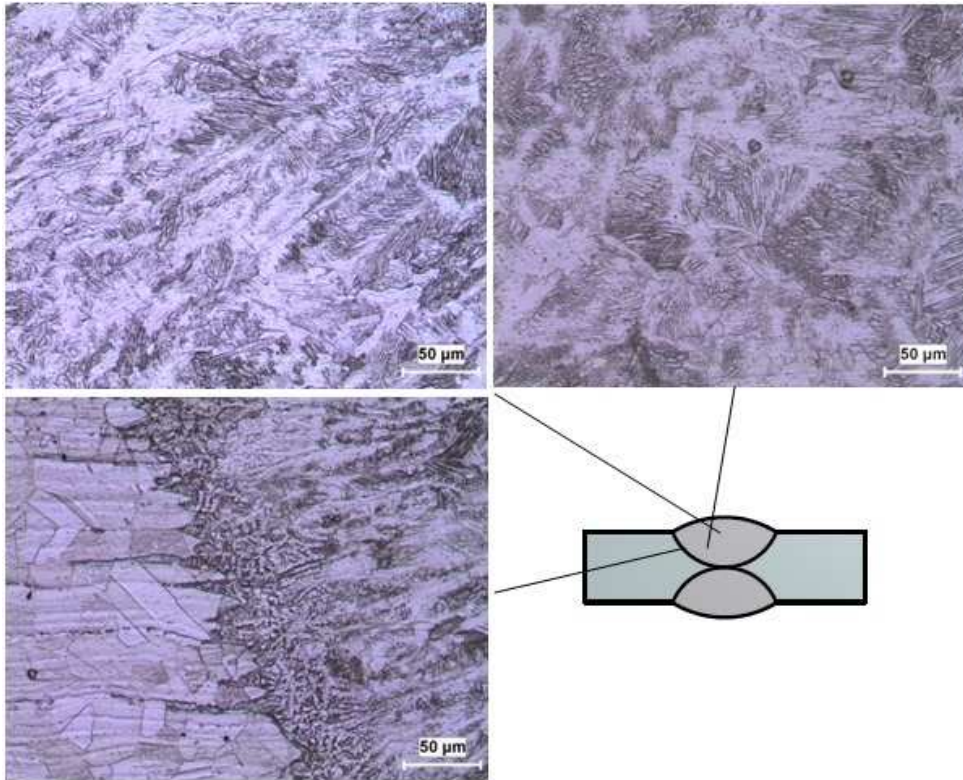
Şekil 6.27. 190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



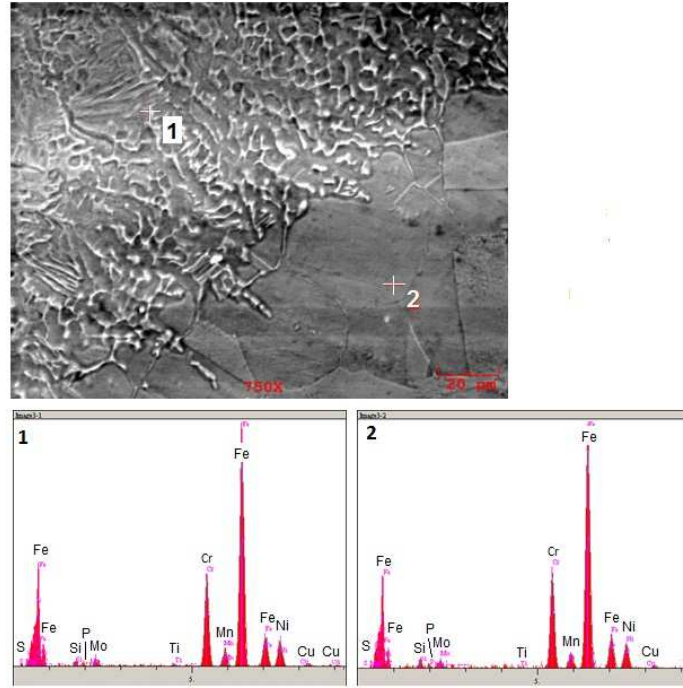
Şekil 6.28. 190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



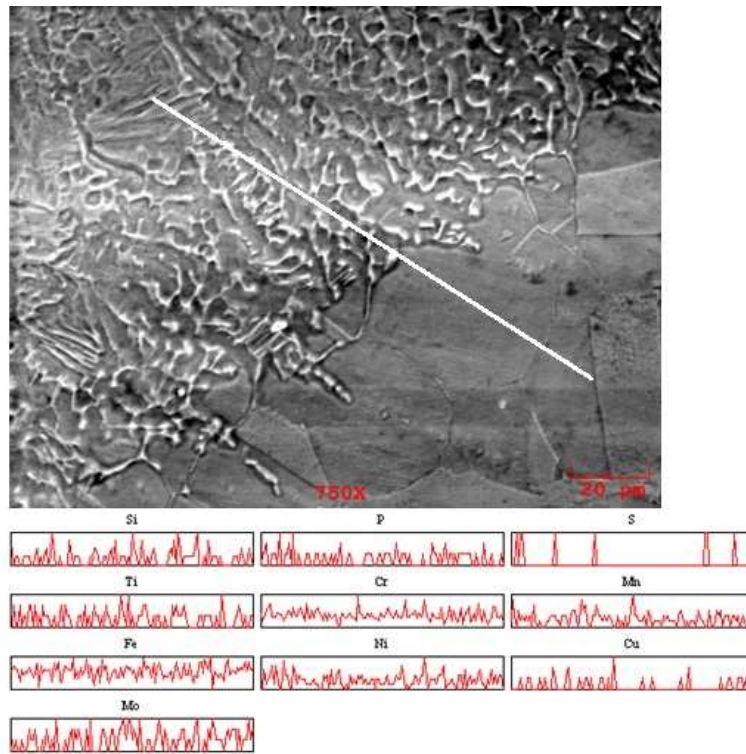
Şekil 6.29. 150 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 6.30. 150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 6.31. 150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin farklı noktalarından alınan EDS analizleri

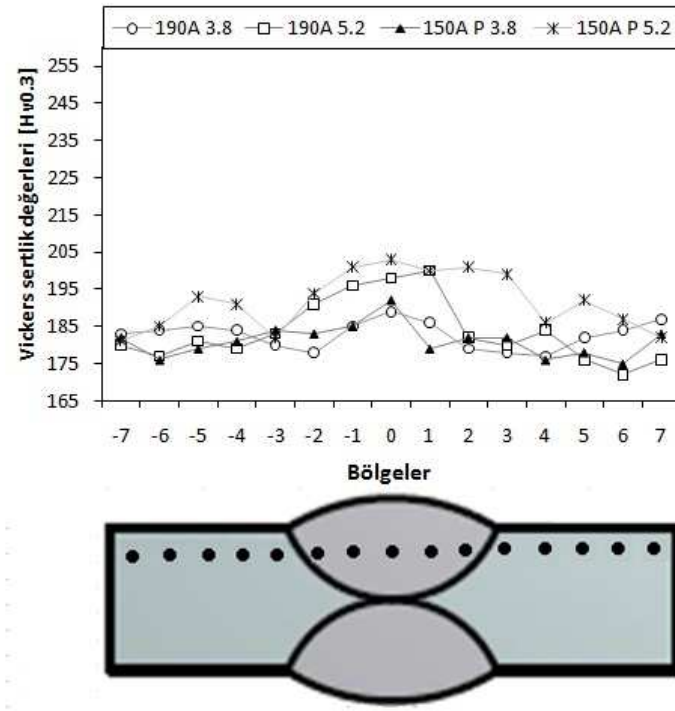


Şekil 6.32. 150 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin SEM mikroyapısı üzerinde belirtilen çizgi boyunca elementlerin lineer analiz diyagramı

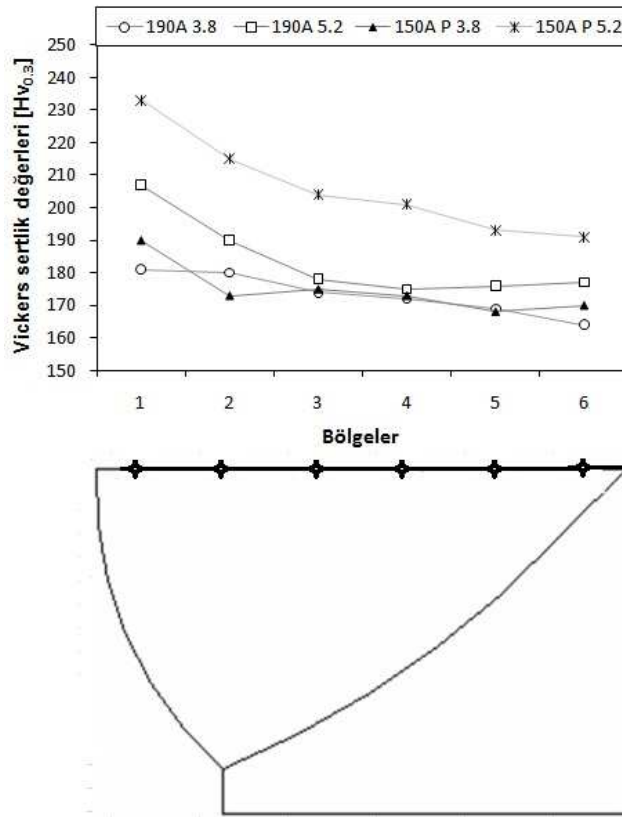
6.4. Sertlik Ölçümleri

6.4.1. AISI 316 paslanmaz çelikler

AISI 316 ve AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler otomatik TIG kaynak yöntemiyle birleştirildikten sonra kesit yüzeylerinden sertlik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri AISI 316 tipi malzemeler için Şekil 6.33'de verilmiştir. Ayrıca aynı malzemelerin farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen parçaların kaynak metali içerisinde en üst noktadan metalin ortasına kadar, diğer bir ifadeyle bu pasonun nufuziyetinin bittiği noktaya kadar yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen dağılım Şekil 6.34'de verilmiştir. Kaynakların çift taraflı yapıldığından dolayı ikinci yapılan paso, ilk çekilen pasoda ısıl işlem etkisi göstermektedir. Böyle bir durumun sertlik değerlerine etkisini azaltılması amacıyla sertlik dağılım değerleri ikinci pasonun üzerinden alınmıştır. Şekillerden anlaşıldığı gibi kaynak metali içerisinde en yüksek sertlik değerlerine 150 amper ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akımda yapılan birleştirmelerin sahip olduğu görülmektedir. Sertlik dağılımları incelendiğinde, kaynak merkezinde sertliklerin ana metal ve ITAB'da ki sertlik değerlerinden bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. En düşük sertlik değerlerinin dağılımı ise 190 amper değeri, 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve 150 amper ile 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akımda yapılan birleştirmelerin sahip olduğu görülmektedir. Kaynak merkezinden aşağı doğru alınan sertlik değerlerinde ise en yüksek sertlik değerleri 150 amper ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akımda yapılan birleştirmelerin sahip olduğu, en düşük sertlik değerleri ise 190A 3.8 ve 150A P 3.8 numunelerin sahip olduğu görülmektedir.



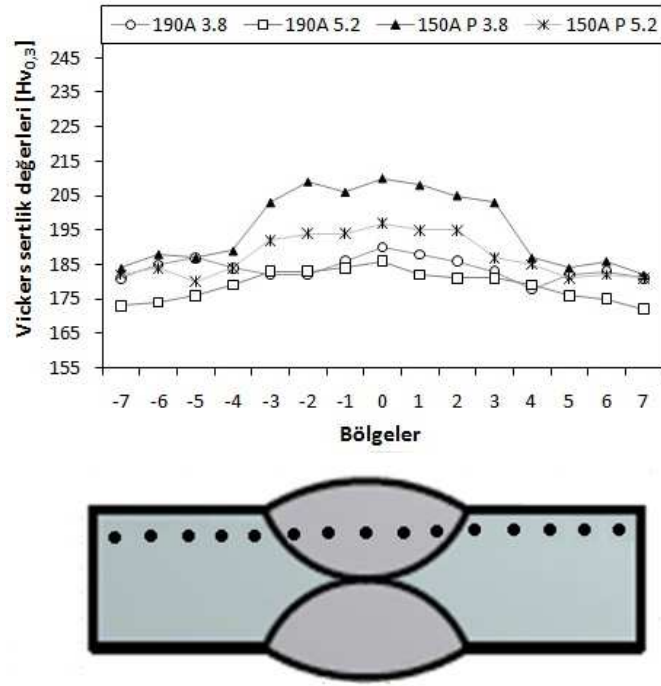
Şekil 6.33. Otomatik TIG kaynak cihazı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin sertlik dağılımına etkisi



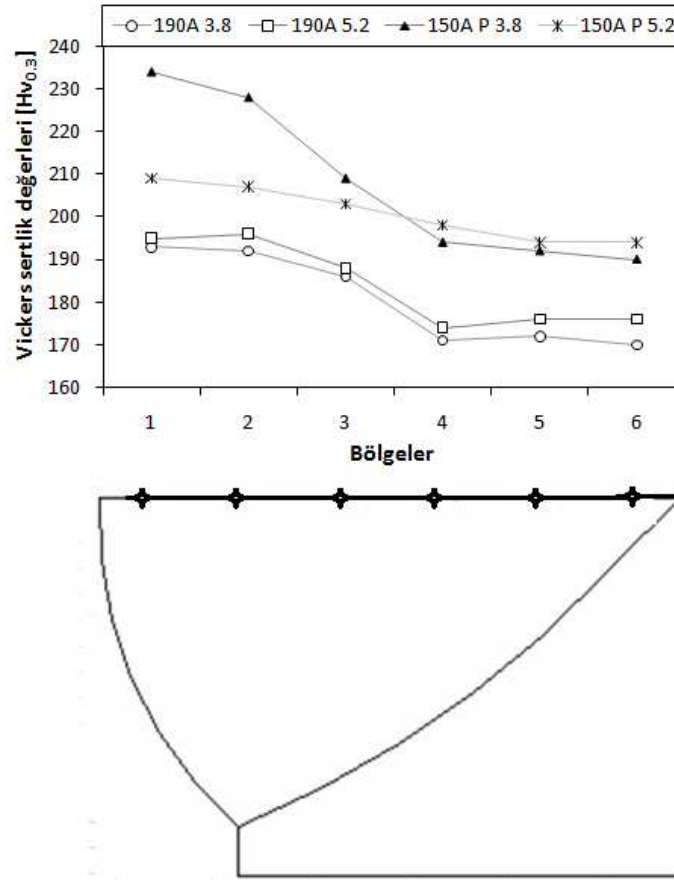
Şekil 6.34. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde farklı kaynak akımı değerinde ve hızlarında elde edilen dikişin yüzeyinden aşağıya doğru elde edilen mikrosertlik değerleri

6.4.2. AISI 316Ti paslanmaz çelikler

AISI 316Ti kaynaklı birleştirmelerin sertlik değerleri Şekil 6.35’de verilmiştir. Diğer taraftan kaynak metali bölgesinde yukarıdan aşağıya doğru yapılan sertlik değerlerinin ölçümleri de Şekil 6.36’da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, en yüksek sertlik değerleri düşük kaynak akımı değerlerinde ve darbeli kaynak akımı kullanılarak yapılan birleştirmelerin sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde birleştirmelerde yukarıdan aşağıya yapılan sertlik ölçümlerinde de benzer eğilim görülmektedir. En düşük sertlik değerleri ise 190 amperde 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kaynak hızında yapılan birleştirmelerin sahip olduğu görülmektedir. Kaynak hızının artışıyla beraber aynı kaynak akımı değerlerinde ve daha hızlı birleştirilen 190A 5.2 kodlu numunelerin sertlik değerlerinin çok azda olsa yüksek olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sertlik sonuçları arasındaki farklar düşük olmakla beraber düşük kaynak akımı değerinde ve yüksek hızlarla yapılan birleştirmelerin daha yüksek sertlik değerlerine sahip olurken, yüksek kaynak akımı değerinde ve düşük kaynak hızlarında yapılan birleştirmelerin daha düşük sertlik değerleri dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum bu tür malzemelerin birleştirilmesinde ısı girdisinin önemli olduğu ve kaynak metalinin sahip olduğu sertlik değerlerini etkilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, düşük kaynak akımı değerinde ve yüksek hızda yapılan birleştirmelerde veya diğer bir deyişle düşük ısı girdisi değerlerinde yapılan birleştirmelerde ergiyen kaynak metalinin daha hızlı soğuması ve hızlı katılaşması sonucu kaynak metali içerisinde gerilmelerin meydana gelmesi nedeniyle, bu bölgelerde sertlik değerlerinin daha yüksek olmasını sağladığı düşünülmektedir. Sertlik değerlerinin sadece kaynak esnasında kaynak metalinde meydana gelen δ -ferritin miktarına bağlı olmadığı, farklı katılaşma hızlarında ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin de neden olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar daha önceden yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyusmaktadır [17, 116].



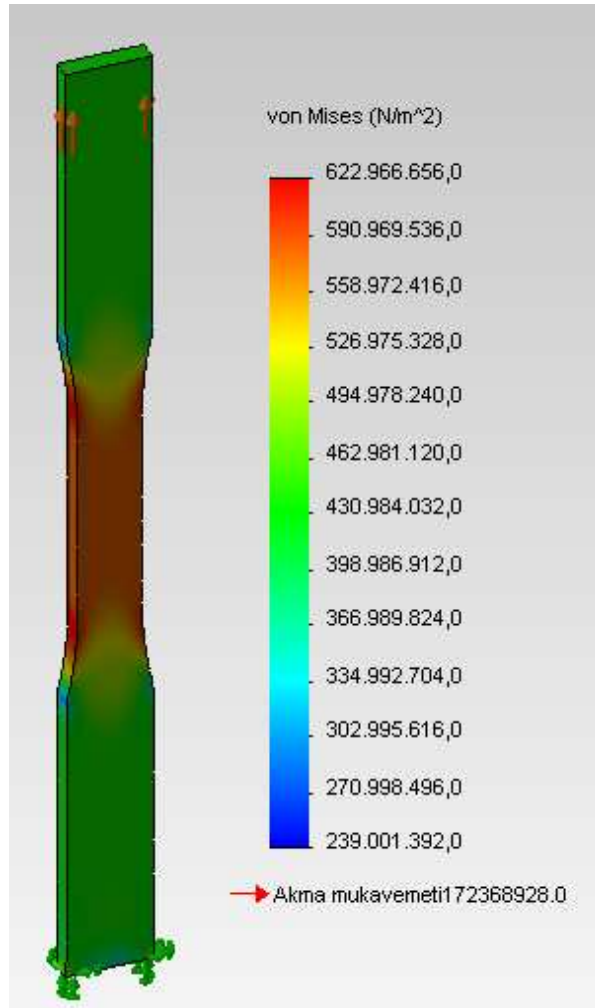
Şekil 6.35. Otomatik TIG kaynak cihazı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin sertlik dağılımına etkisi



Şekil 6.36. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde farklı kaynak amperi ve hızlarında elde edilen dikişin yüzeyinden aşağıya doğru elde edilen mikrosertlik değerleri

6.5. Çekme Deneyleri

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen iki farklı kompozisyona sahip AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çelikler çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri yapılmadan önce çekme deneyi için hazırlanan deney numunesinin ölçülerinde inventor çizim programında çizilerek, programın sağladığı imkânlar ile numunenin hangi noktasında gerilme yığılmalarının arttığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 6.37’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek gerilmelerin numunelerin en dar kesitinde olduğu gözlenmektedir. Çekme deneylerinde büyük bir olasılıkla deney sonrasında numuneler en fazla gerilim yığılmalarının görüldüğü ve dolayısıyla en zayıf olduğu bölgeden kırılma gerçekleşmektedir.



Şekil 6.37. Çekme numunesine deney esnasında 436 MPa yük uygulanması halinde bu yükün numune yüzeyinde dağılım yoğunluğunun gösterimi

6.5.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler

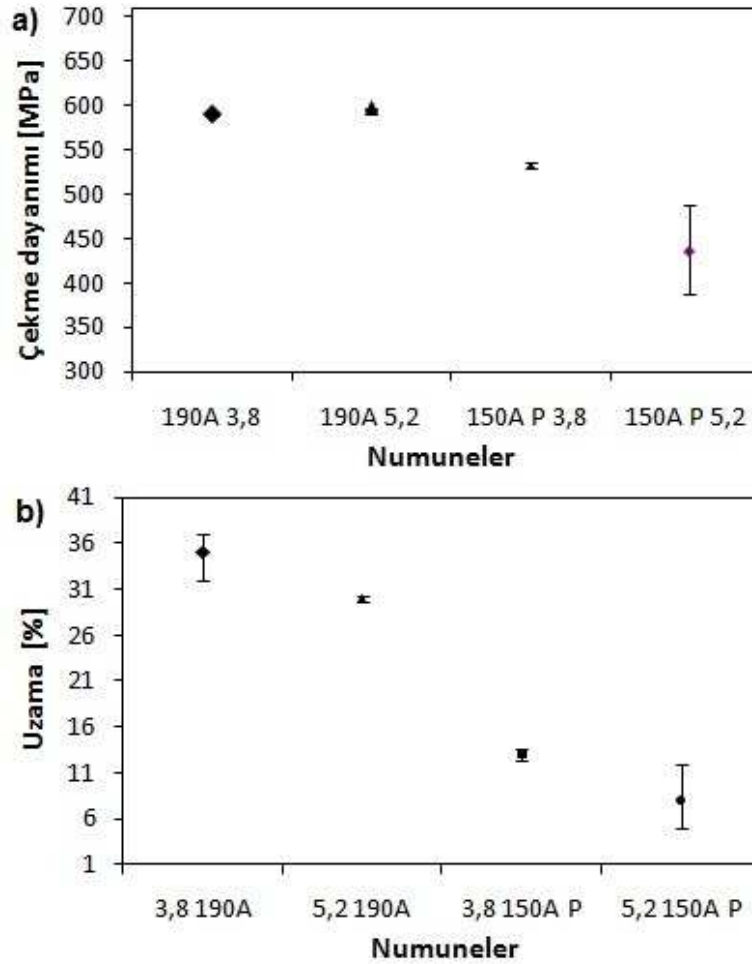
İlgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilen çekme deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 6.5’de ve grafiksel olarak Şekil 6.38’de verilmiştir. Tabloda ve şekilde görüldüğü gibi, kaynak parametrelerinin, kaynağın çekme dayanım değerlerine etki ettiği görülmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 190 amper değerinde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin çekme dayanımı 587 MPa civarında olurken, kaynak hızı arttığında kaynaklı malzemelerin çekme dayanımı da % 2 civarında artış sağlayarak 597 MPa değerine ulaşmaktadır. Ancak, düşük kaynak akımı değerleri ve darbeli akım kullanıldığında kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanım değerleri düşmektedir. 150 amperde, 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli kaynak akımı kullanıldığında 532 MPa civarında çekme dayanımı değeri elde edilmiştir. 190 amperde ve 3.8 mms^{-1} hızda yapılan kaynaklı birleştirmenin sahip olduğu çekme dayanımı değerinden % 10 daha düşük bir değere sahiptir. Çekme dayanımı değerindeki düşüş kaynak hızının artışına bağlı olarak çok daha artmaktadır. Kaynak hızı 5.2 mms^{-1} olduğunda kaynaklı parçaların sahip olduğu çekme değeri % 27 oranda azalarak 436 MPa civarına düşmektedir. Kaynaklı malzemelerin çekme değerlerinde elde edilen sonuçlar kaynak esnasında seçilen kaynak akımı türü, kaynak akımı değerine ve hız değerlerinin çok önemli olduğunu vurgulamaktadır. Seçilen kaynak akımı değeri 190 amper kaynak akımı değeri olduğunda, düşük hızda yapılan kaynakta daha önceden de incelendiği gibi kaynak nufuziyeti ve kaynak metali alanının genişliği daha yüksek olacaktır. Böylece iki taraflı kaynak yapıldığında, her iki taraftan yapılan nufuziyetin fazla olması (Şekil 6.39 a) ve kaynak metalinin uç kısımlarının tekrar ergiyip katılaşması kaynak metalinde farklı ve arzu edilmeyen mikroyapıların oluşmasına neden olabilmektedir. Bundan dolayı kaynak hızındaki artış ile birleştirilen malzemelerde daha optimum nufuziyet ve kaynak genişliği değerlerine ulaşılabilir (Şekil 6.39 b). Böylece daha yüksek çekme dayanımı değerlerine ulaşılması sağlamaktadır. Çok daha düşük kaynak akımı değerlerinde gerçekleştirilen birleştirmelerin sahip olduğu çekme dayanımı değerlerinin düşük olması nufuziyetin yeterli seviyede olmaması ve kaynak genişliğinin nufuziyete oranının yüksek olmasından kaynaklanabilmektedir. Düşük kaynak akımı değerlerinde yüksek hızlarda zaten az olan nufuziyet değerlerinin daha düşük olması nedeniyle çok daha

düşük çekme dayanımı sonuçları elde edilmektedir (Şekil 6.40 a ve b). Kaynaklı birleştirmelerde kaynak bölgesinde bulunan olan ufak bir gözenek (Şekil 6.41 a ve b) çekme deneyinde olduğu gibi herhangi bir yüke maruz kaldığında o bölgede gerilim yoğunlaşmaları oluşturacak ve malzemenin daha düşük yüklerde daha hızlı bir şekilde kopmasına neden olacağı düşünülmektedir. Darbeli akım kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak hızı arttıkça birden fazla numunelere uygulanan çekme deneylerinde elde edilen maksimum ve minimum değerler arasındaki farkların arttığı görülmektedir. Bu da darbeli akım kullanıldığında kaynak hızı artışı ile beraber kaynak boyunca nufuziyet azaldığından birleşmeyen bölgelerin varlığı ve büyük boşluklar ortaya çıkmakta (Şekil 6.42 a ve b ve Şekil 6.42 a ve b), dolayısıyla çekme dayanım değerlerinde düşüşe neden olmaktadır.

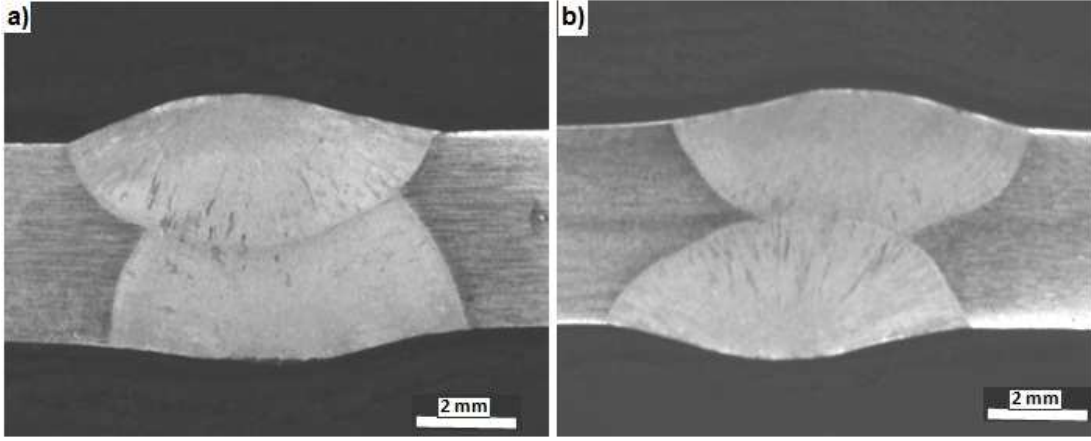
AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrasında elde edilen % uzama değerleri Tablo 6.5’de, grafiksel olarak ise Şekil 6.38 b ‘de verilmiştir. Elde edilen % uzama değerleri çekme deneyinde elde edilen sonuçlara paralellik göstermektedir. En yüksek uzama değeri 190 amper ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin sahip olduğu, en düşük % uzama değerinin ise 150 amperde ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin sahip olduğu görülmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi, kaynak akımı değerleri düştüğünde ve kaynak hızı artığında kaynaklı birleştirmede nufuziyet eksiliği ve boşluk gibi hataların oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.42). Bu tür hatalar çekme deneyi esnasında gerilin yığılmalarına neden olacak ve kaynaklı birleştirme daha hızlı ve daha düşük gerilmelerde kolayca hasara uğramaktadır. Dolayısıyla daha düşük % uzama değeri elde edilmektedir.

Tablo 6.5. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak otomatik TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklere uygulanan çekme deneyi ile elde edilen değerler.

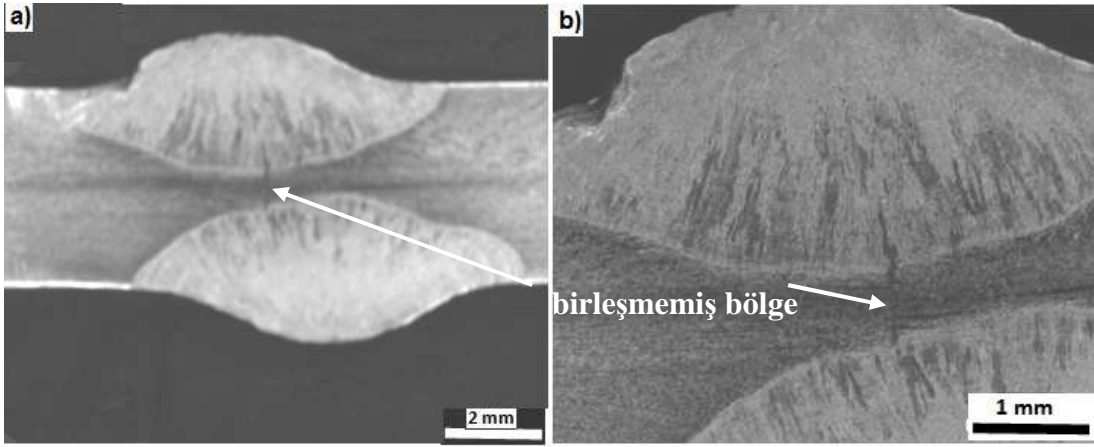
Ana Malzeme	Malzeme kodu	Isı girdisi (Jmm^{-1})	İlave Metal	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	% Uzama Miktarı
AISI 316	190A 3.8	1274	ER 316LSi	412 ± 5	591 ± 3	35 ± 3
	190A 5.2	932		405 ± 5	597 ± 2	30 ± 1
	150A P 3.8	1066		415 ± 2	532 ± 3	13 ± 1
	150A P 5.2	735		378 ± 1	436 ± 51	8 ± 4
AISI 316Ti	190A 3.8	1274		395 ± 5	578 ± 1	45 ± 1
	190A 5.2	932		397 ± 7	561 ± 1	31 ± 1
	150A P 3.8	1066		397 ± 3	589 ± 0,3	50 ± 2
	150A P 5.2	735		388 ± 2	518 ± 11	18 ± 2



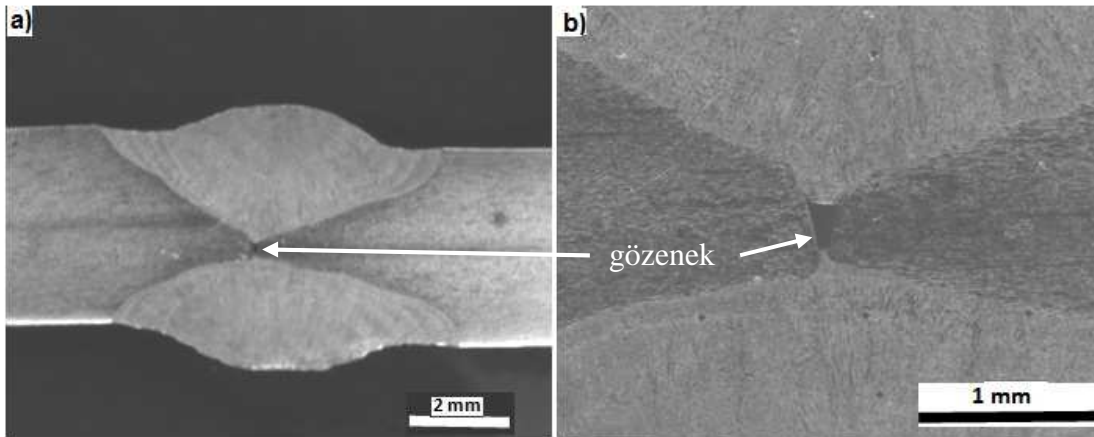
Şekil 6.38. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametrelerinin a) çekme dayanımına b) % uzama değerlerine etkisi



Şekil 6.39. 190 amper değeri a) 3.8 mms^{-1} b) 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin stereo mikroskop görüntüleri

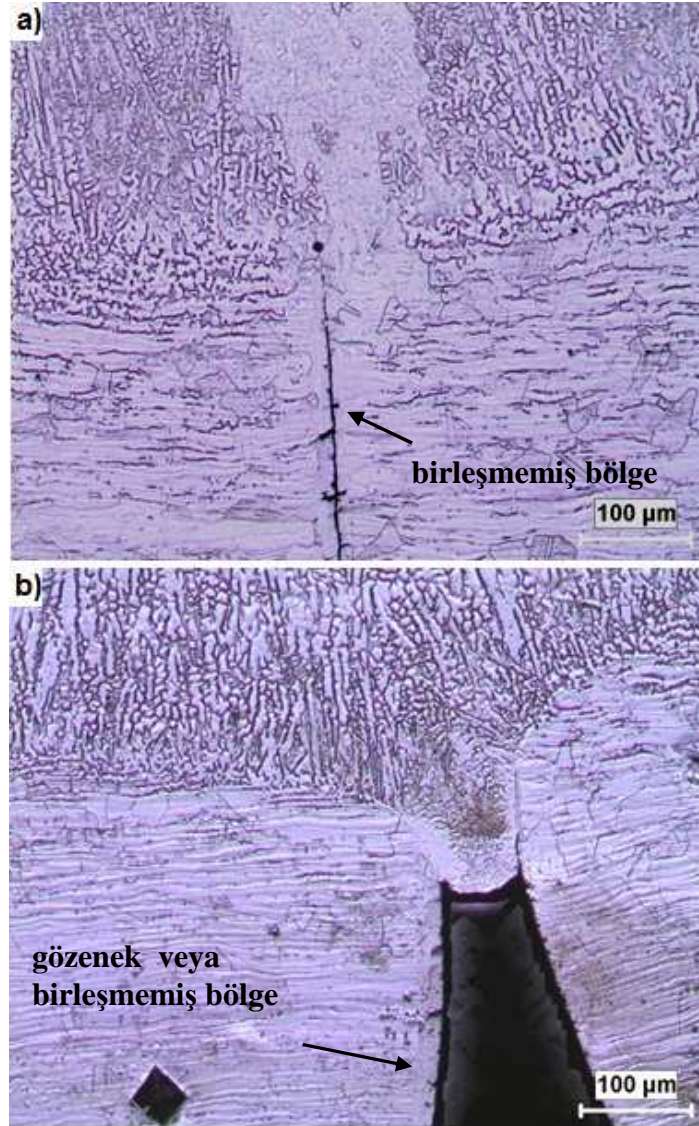


Şekil 6.40. 150 amper kaynak akımı, 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kaynak hatasının a) 12x b) 30x büyültmelerde stereo mikroskop görüntüleri



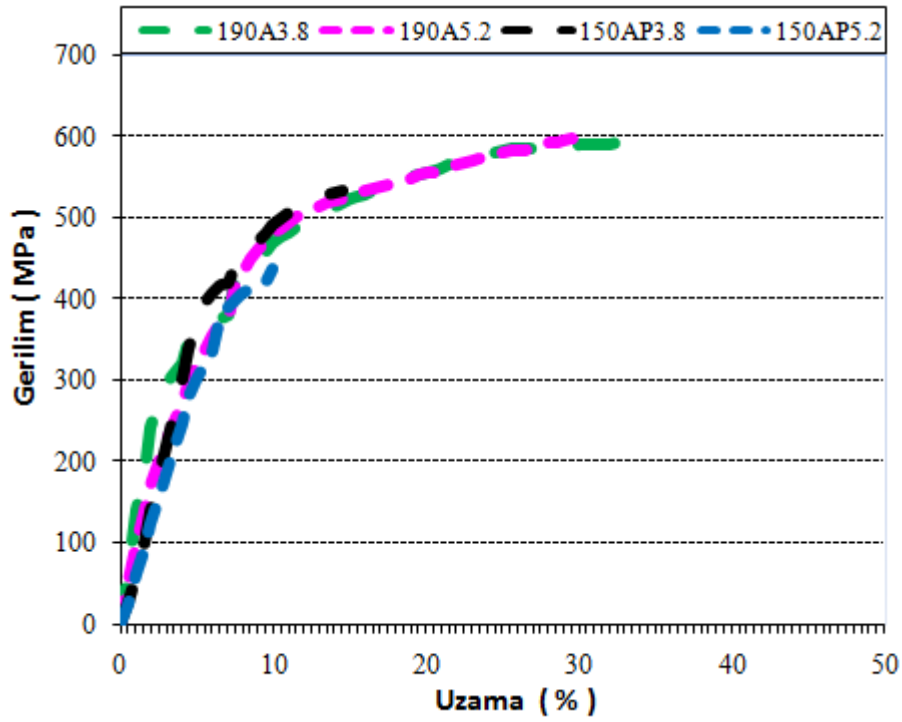
Şekil 6.41. 150 amper kaynak akımı, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kaynak hatasının a) 12x b) 40x büyültmelerde stereo mikroskop görüntüleri

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyleri esnasında elde edilen gerilme uzama eğrilerin hepsi bir arada Şekil 6.43'da verilmektedir. Şekilde 190 amper değerinde ve 3.8 mms^{-1} ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin yüksek çekme dayanımı gösterdikleri ve 150 amperde darbeli akım ile 3.8 mms^{-1} ve özellikle 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin daha düşük çekme ve % uzama değerlerinin elde edildiği görülmektedir. İçerisinde nufuziyet hatasının ve boşluğun varlığı daha net olarak görülen 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çok düşük % uzama değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Çekme deneyinden elde edilen gerilme-uzama eğrisinin altında kalan alanın malzemenin tokluğunu gösterdiği bilindiğine göre, 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin çok düşük tokluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

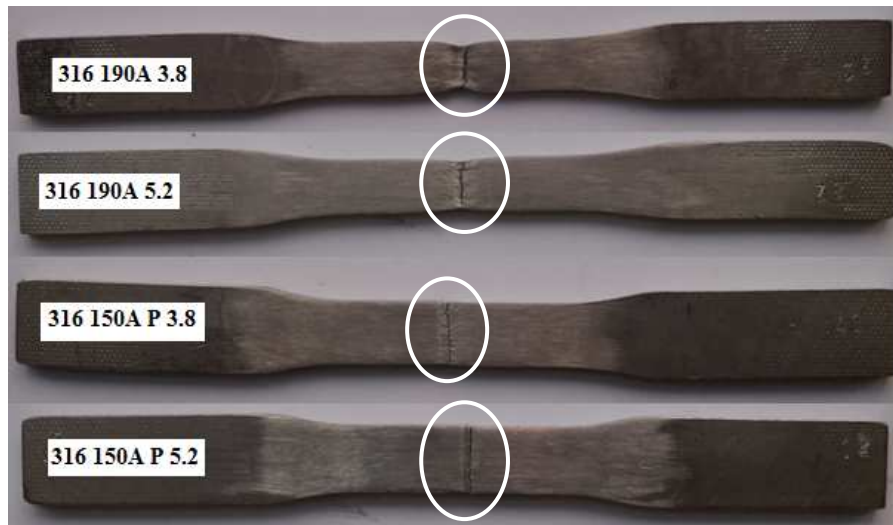


Şekil 6.42. 150 amper kaynak akımı, a) 3.8 mms^{-1} ve b) 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan kaynak hatalarının optik mikroskop görüntüleri

Şekil 6.44'de farklı kaynak parametrelerde birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası görüntüleri verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde, 190 amper değeri ve 3.8 mms^{-1} ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyinde kırılmaların kaynak metalin yanındaki ana metalde gerçekleştiği ve uzamaların ve kesit daralmaların diğer kalan numuneye göre daha çok olduğu net olarak görülmektedir.



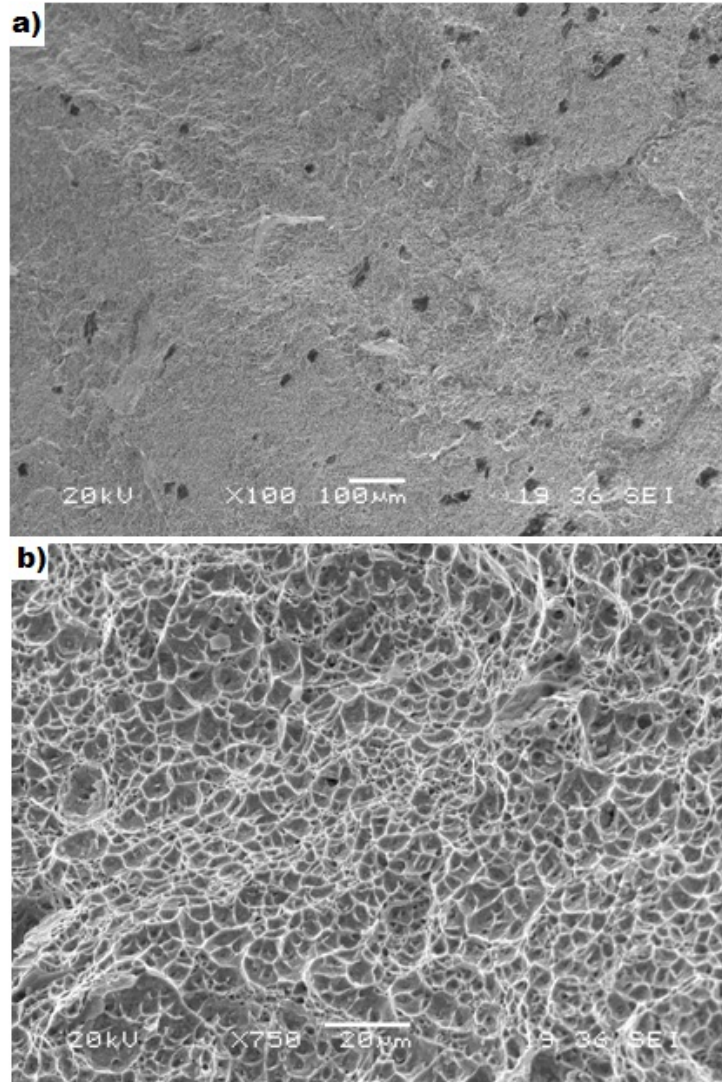
Şekil 6.43. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneylerinde elde edilen gerilme uzama eğrilerinin tümünün birlikte gösterimi



Şekil 6.44. Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri

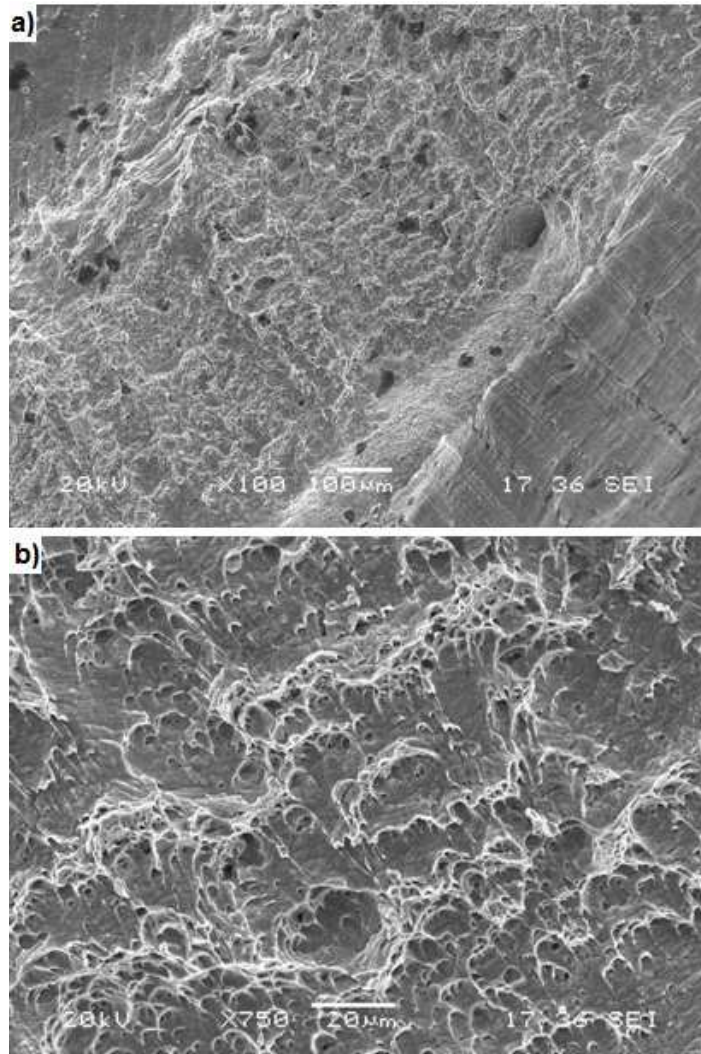
150 amperde darbeleri akım ile 3.8 mms^{-1} ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde çekme deneyi sonrasında kırılmalar kaynak metalinde meydana gelmektedir. Birleştirme esnasında nüfuziyet azlığı ve birleştirilemeyen bölgelerin varlığı bu şekilde kırılmaya neden olmaktadır. Yeterli nüfuziyetin olmadığı içerisinde gözenekte bulunan 150 amperde darbeleri akım ile 5.2

mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde çok daha az uzama görülmektedir ve kesit daralması olmamıştır. En yüksek ve en düşük çekme dayanımı gösteren AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik çekme deneyi sonrasında elde edilen görüntülerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.45 ve Şekil 6.46'da verilmiştir. 190 amper ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin kırılma yüzey morfolojisi, gamze şeklinde delikli ve bir ağ gibi kırılma yüzeyini kaplamaktadır. Bu şekildeki görüntüye sahip kaynaklı birleştirmelerin sünek bir davranış gösterdiği düşünülmektedir. Bu görüntü çekme deneyinde elde edilen yüksek uzama değerinin doğruluğunu ispatlamaktadır.



Şekil 6.45. 190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası a) $100\times$ b) $750\times$ büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

Şekil 4.46'da 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerde ise çekme deneyi sonrasında kırılma yüzeyinin bir kısmını düz bir yüzey şeklinde görülmektedir. Bu yüzeylerin kaynak esnasında nüfuziyetin sağlanamadığı ve gözeneğin bulunduğu bölgelerin olduğu düşünülmektedir. Çekme deneyi esnasında bu bölgelerde gerilme yığılmaları sonucunda hızlı bir şekilde kırıldığı ve kırılma yapı gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 6.46 b deki büyütülmüş kırılma yüzeyinden farklı olduğu görülmektedir. Bu şekilde yüzeylerdeki kırılmanın delikli gonca şeklinde olmadığı, olanların ise bir ağ oluşturmadığı net bir şekilde görülmektedir. Dolayısıyla görüntü malzemenin sünek davranış göstermediği, 190 amper ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen numuneye göre kırılma bir davranış gösterdiğini göstermektedir.

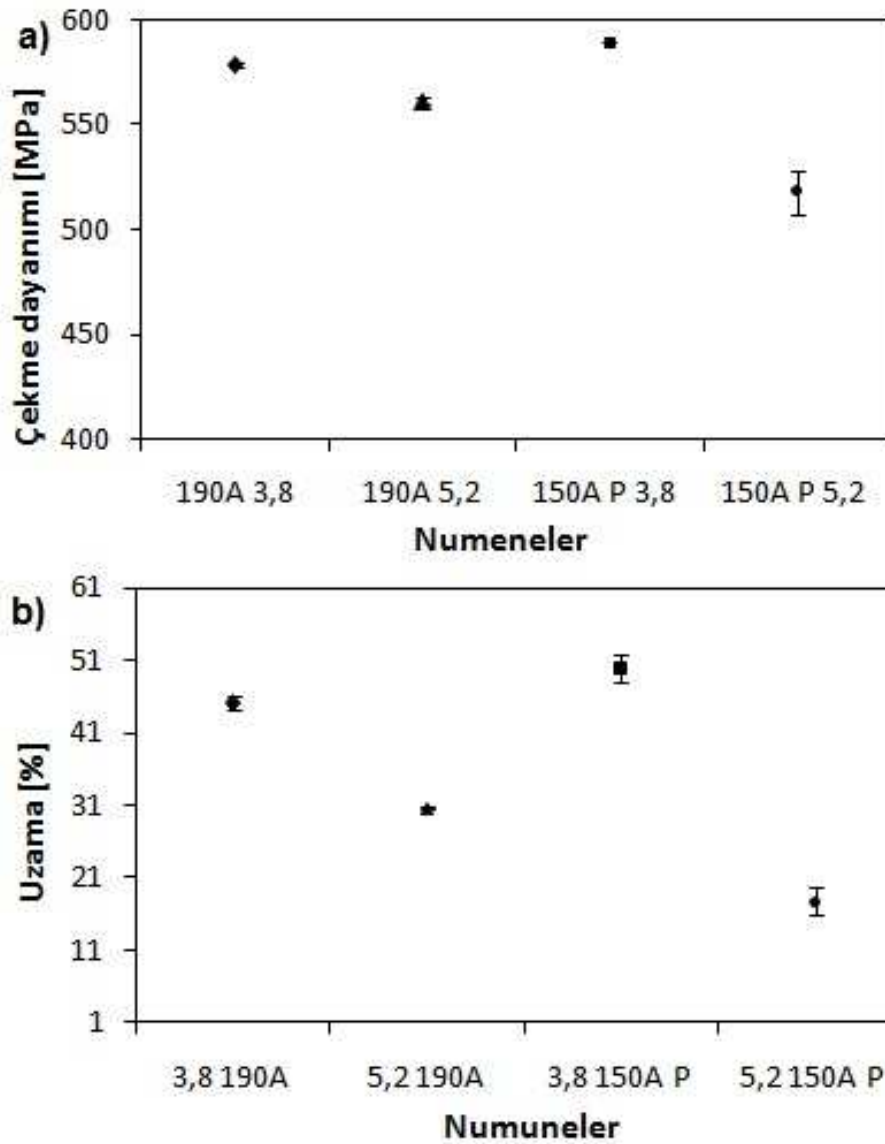


Şekil 6.46. 150 amper kaynak akımı, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası elde edilen a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

6.5.2. AISI 316Ti paslanmaz çelikler

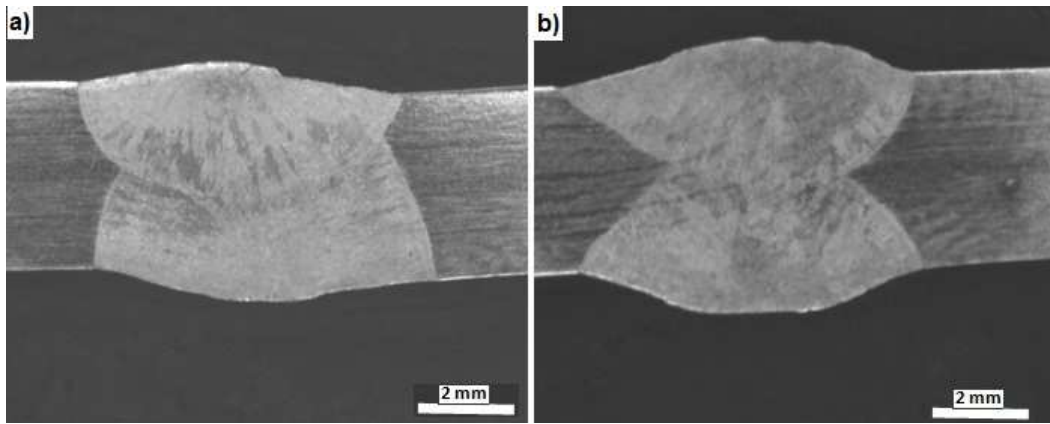
Kimyasal kompozisyonda özellikle bu tür ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin yüksek sıcaklık çalışma ortamlarında krom-karbür çökmesi ve taneler arası korozyonun önlenmesi amacıyla, malzemenin içerisine bir miktar titanyum katılarak AISI 316Ti ticari ostenitik paslanmaz çelik levhalar üretilmektedir. Bu çalışmada AISI 316Ti paslanmaz çeliklerde de AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik çeliklerinin birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametreleri uygulanmıştır. Çekme deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 6.5’de ve grafiksel olarak Şekil 6.47’de verilmiştir. Tabloda ve şekilde görüldüğü gibi, kaynak parametrelerinin, kaynağın çekme dayanım değerlerine etki ettiği görülmektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde 190 amperde, 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmenin çekme dayanım değerleri 190 amperde ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerin sahip olduğu çekme dayanım değerlerinden daha yüksektir. Ancak, bu değerler aynı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 malzemelerin sahip olduğu değerlerden daha düşüktür. Titanyum içeren AISI 316 serisi paslanmaz çeliklerin nufuziyet değerleri daha fazla olduğu önceki bölümde belirtilmiştir. İki taraflı çekilen kaynaklarda aşırı nufuziyetin kaynak metalinin şeklini ve mikroyapısını değiştirebileceğinden optimum çekme dayanımını sağlayacak birleştirme şeklini, geometrisini ve mikroyapısını bozacaktır (Şekil 6.48 a). Bu da çekme deneylerinde elde edilen sonuçları olumsuz etkilemektedir. Daha düşük kaynak akımı değerleri kullanılarak birleştirilen 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde daha arzu edilen nufuziyet geometrisi elde edilmektedir (Şekil 6.48 b). Dolayısıyla, 150 amperde, 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmenin sahip olduğu çekme dayanımı değerleri diğerlerine göre daha yüksektir. Ancak aynı kaynak akımı değerlerinde kaynak hızı arttıkça kaynaklı birleştirmenin mikroyapısı, kaynak geometrisi değişeceğinden ve yeterince nufuziyet sağlamadığından çok daha düşük çekme dayanımı sonuçları verdiği düşünülmektedir. Şekil 6.49 a ve b ve Şekil 6.50’de 150 amper, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere ait stereo ve optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi kaynağın yeterli nufuziyeti sağlayamadığı, iki paso arasında boşluk olması ve kaynak esnasında oluşan ısı

etkiler sonucunda türbülanslı bir bölgenin oluştuğu görülmektedir. 150 amper kaynak akımı değerinde, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirme düşük çekme dayanımı değerlerine sahip olurken maksimum ve minimum çekme değerleri arasındaki farkın daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak aynı parametreler kullanılarak birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikle karşılaştırıldığında bu fark daha düşük olduğu görülmektedir. Bu titanyum içeren AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında daha yüksek nüfuziyet derinliğine ulaşıldığını göstermektedir.

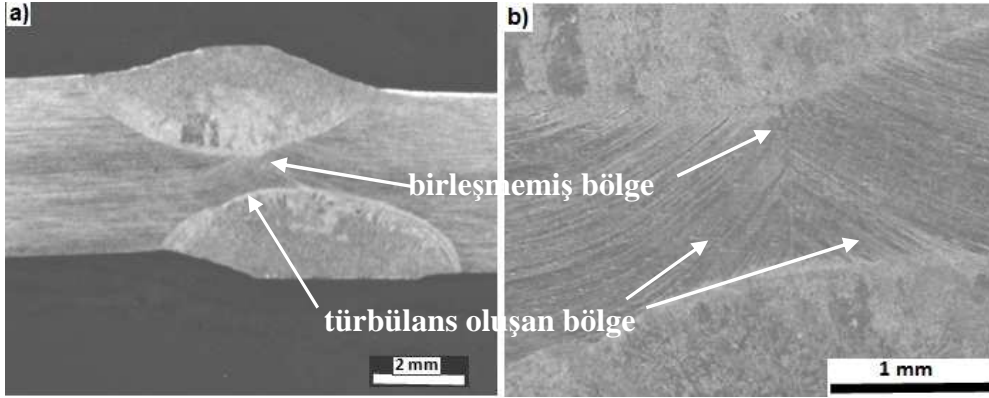


Şekil 6.47. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin a) çekme dayanımına b) % uzama değerlerine etkisi

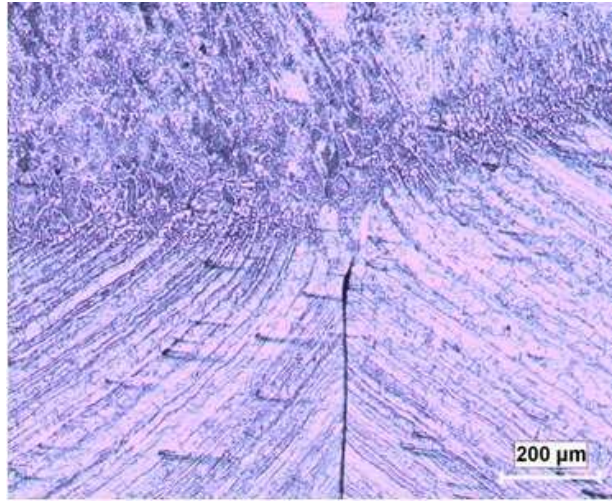
AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrasında elde edilen % uzama değerleri Tablo 6.5’de ve daha net olarak görülebilmesi için grafiksel olarak Şekil 6.47 b’de verilmiştir. Elde edilen % uzama değerleri bu tür ostenik paslanmaz çeliklerde de çekme deneyinde elde edilen sonuçlar ile aynı eğilimdedir ve paralellik göstermektedir. En yüksek uzama değeri 150 amperde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızında ve darbeli akım kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin sahip olduğu, en düşük % uzama değerinin ise 150 amperde ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında ve darbeli akım kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmenin sahip olduğu görülmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi, kaynak akımı değeri düştüğünde ve kaynak hızı artığında kaynaklı birleştirmede nufuziyet eksikliği gibi kaynak hataları meydana gelmektedir (Şekil 6.49 a, b ve Şekil 6.50). Yine daha önce belirtildiği gibi meydana gelen bu tür hatalar çekme deneyi esnasında gerilim yığılmalarına neden olmakta ve kaynaklı birleştirmelerin düşük gerilmelerde şekil değiştirerek yeterince uzama göstermeden çabucak hasara uğramakta ve böylece düşük % uzama değerleri elde edilmektedir.



Şekil 6.48. a) 190 amper kaynak akımı, 3.8 mms^{-1} b) 150 amper değerinde, darbeli kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin stereo mikroskop görüntüsü



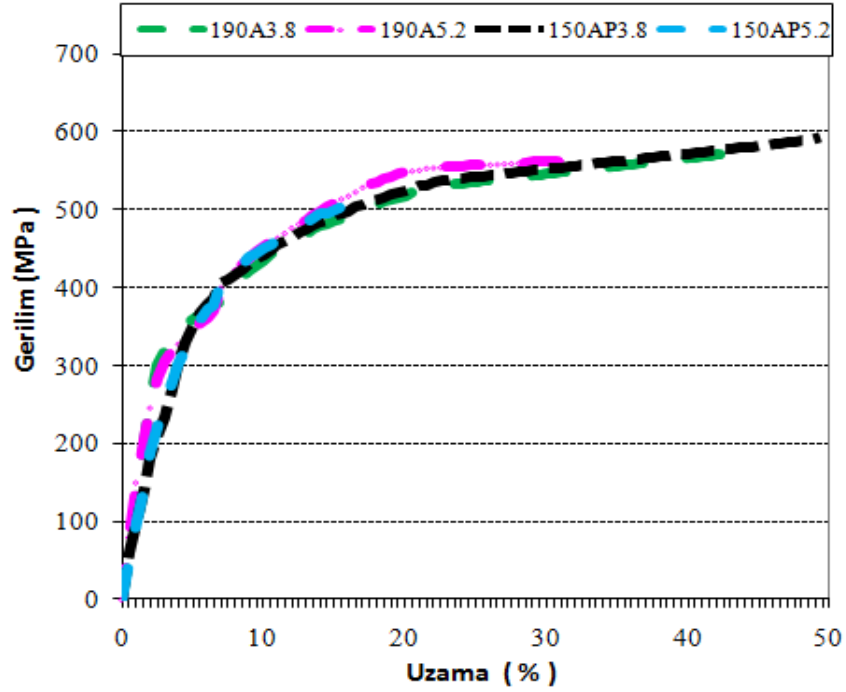
Şekil 6.49. 150 amper değerinde, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan birleşme bölgelerinin a) 12x b) 40x büyültmelerde stereo mikroskop görüntüleri



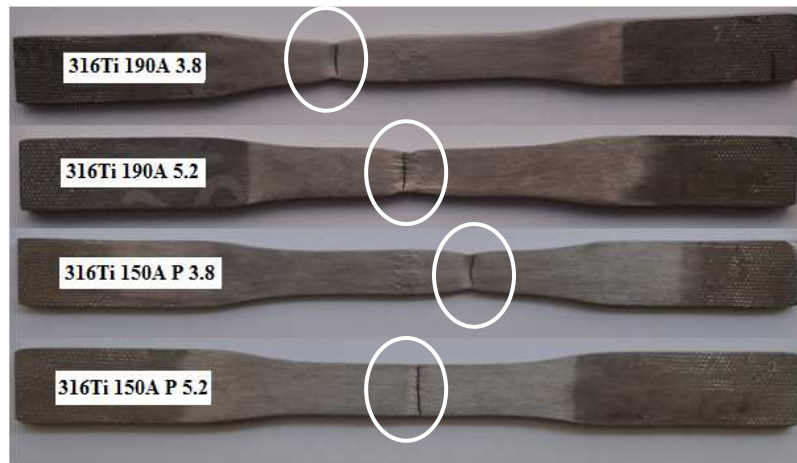
Şekil 6.50. 150 amper kaynak akımı, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde oluşan hatalarının optik mikroskop görüntüleri

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyleri esnasında elde edilen gerilme uzama eğrilerin hepsi bir arada Şekil 6.51'de verilmektedir. Şekilde 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen ostenitik paslanmaz çelikler hariç diğerlerinin yüksek çekme dayanımı gösterdikleri anlaşılmaktadır. Aynı şekilde bahsedilen numunelerin yüksek % uzama değerlerinin elde edildiği görülmektedir. İçerisinde nufuziyet yetersizliği bulunan 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin düşük % uzama gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 6.52'de farklı kaynak parametrelerde birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası görüntüleri verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde, 190 amperde 3.8 mms^{-1} ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızları ile

150 amperde darbeli akım ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyinde oluşan kırılmaların ana metalde gerçekleştiği ve yüksek uzama ve kesit daralması göstermektedirler. Diğer taraftan, 150 amperde darbeli akım ile 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrasında kırılmalar kaynak metalinde meydana gelmektedir. Birleştirme esnasında nüfuziyet azlığı bu şekilde kırılmaya neden olmaktadır.



Şekil 6.51. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneylerinde elde edilen gerilme uzama eğrilerinin tümünün birlikte gösterimi

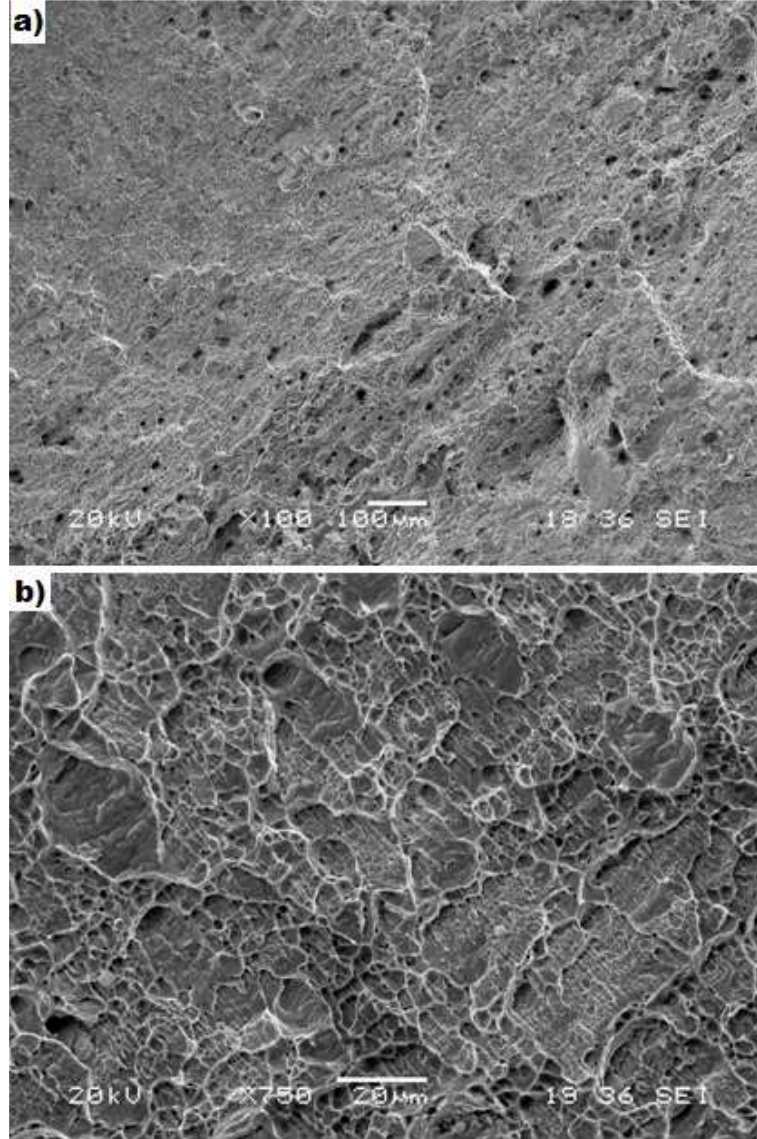


Şekil 6.52. Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri

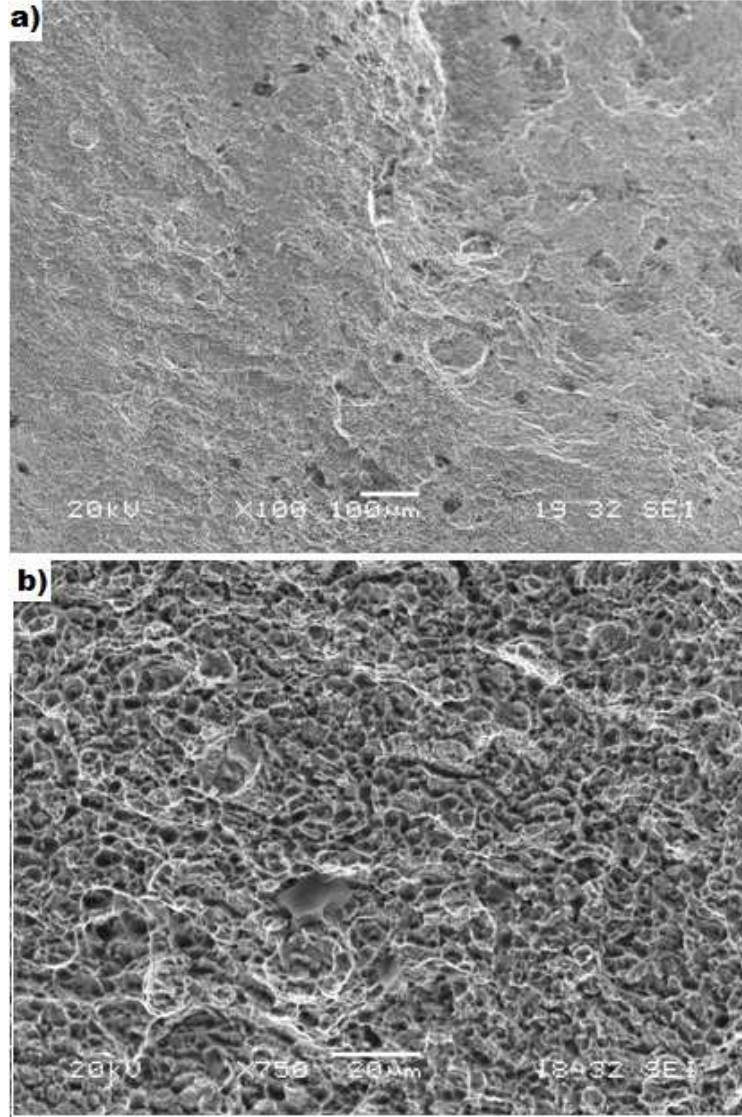
Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde çekme deneyi sonrasında yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilen numuneler arasında 150 amperde darbeli kaynak akımında 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ve 190 amperde 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin, en yüksek ve en düşük çekme değerleri elde edilen numunelerin, kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.53 ve Şekil 6.54’de verilmiştir.

Yüksek çekme dayanımı gösteren 150 amper değerinde darbeli kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızında gerçekleştirilen birleştirmenin kırılma yüzeyinin görüntüsünde delikli ve ağ biçiminde kırılma yüzeyi görülmüştür. Kırılma yüzeyinin bazı bölgelerinde düz yüzeyler görülmektedir. % uzama değerlerine bakıldığında sünek kırılma gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak bu görüntüde delikli gonca şeklindeki yapının ağ olarak bütün kırılma yüzeyini kaplamadığı görülmektedir.

Daha düşük çekme dayanımı ve % uzama elde edilen 190 amperde ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliğin kırılma yüzeyine ait görüntü Şekil 6.54’de görülmektedir. Kırılma yüzeyine bakıldığında delikli bir görüntü göstermekle beraber her hangi bir ağ görüntüsü sergilememektedir. Kırılma yüzeyinin bazı bölgelerinde küçük boyutlarda da olsa düz yüzeyler görülmektedir. Delikli gamze şeklinde görüntülerin çok küçük olması ve bunların ağ şeklinde olmamaları daha düşük uzama değerlerinin sonucu olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.53. 150 amper değerinde darbeli kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası elde edilen a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

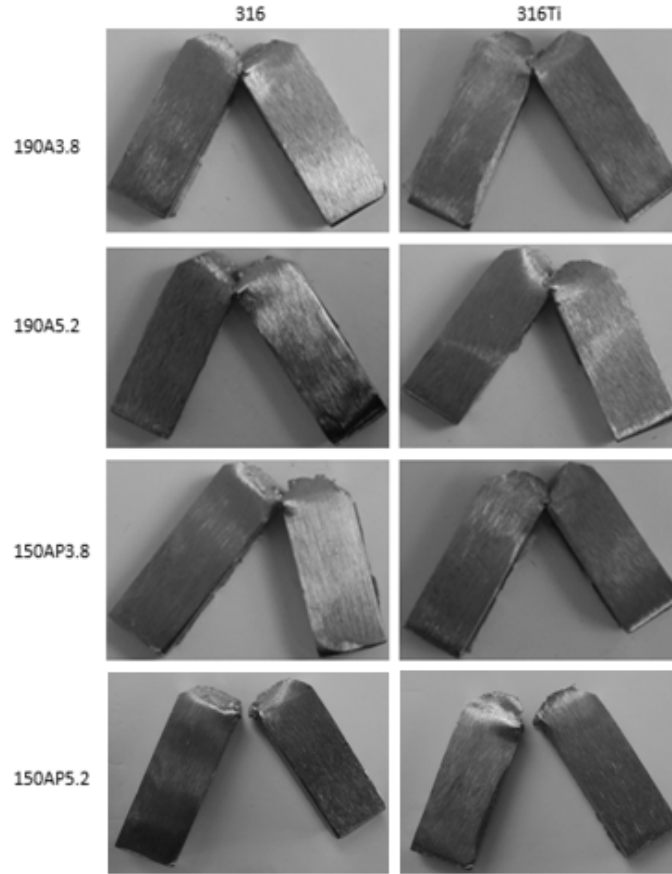


Şekil 6.54. 190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

Bu çalışmada otomatik TIG kaynak yöntemi ile iki ayrı taraftan iki paso halinde kaynak çekilmiştir. Kaynak ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çelik parçalara kaynak ağzı açılmamıştır. Daha önce yapılan çalışmada [42] aynı tip ostenitik paslanmaz çelik TIG kaynağı elle çekilmiştir. O çalışmada farklı koruyucu gazların mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmada kaynaklar el ile çekildiğinden ve kaynak hızı kaynakçı tarafından ayarlandığından optimum nüfuziyet için gerekli kaynak hızı ve kaynak akımı değerleri elde edilmiştir. Bu da kaynak akımı değerinin, akım ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerinin optimum mekanik özelliklerin elde edilmesi açısından önemli olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca kaynak ağzı açılması da önemli olduğu düşünülmektedir.

6.6. Çentik Darbe Deneyleri

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çelik parçaların ilgili standartlarda belirtildiği gibi numunelerin yüzeyine çentik açılarak Charpy çentik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çentik darbe deneyi uygulanan bazı parçaların görüntüleri Şekil 6.55’de verilmiştir.



Şekil 6.55. Çentik darbe uygulanan numunelerin görüntüleri

6.6.1. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler

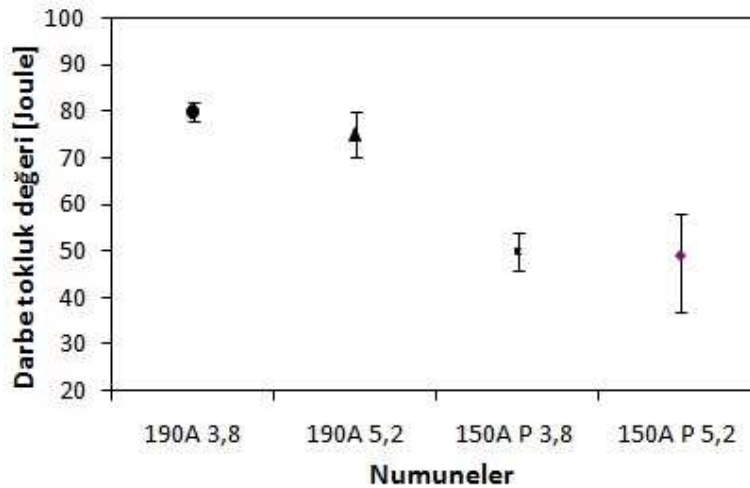
Çentik darbe deneyi sonrası elde edilen değerler Şekil 6.56’da verilmiştir. Şekil incelendiğinde AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için en yüksek çentik darbe tokluk değerleri 80 joule ile 190 amper değerinde 3.8 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirmede, en düşük çentik darbe tokluk değeri ise ortalama 44 joule değeri ile 150 amper değerinde 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akımda birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerden elde edildiği görülmektedir. Normal akımda yapılan birleştirmede kaynak hızının artışına paralel olarak çentik darbe tokluk değerinde bir

miktar düşme görülmektedir. Aynı durum darbeli akımda birleştirilen numuneler için de geçerlidir. 150 amper değerinde darbeli akımda ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen malzemelerde daha önce belirtildiği gibi nufuziyet yetersizliği ve gözenek gibi kaynak hataları nedeniyle düşük değerler elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek ve en düşük tokluk değerleri diğer parametrelerde elde edilenlere göre daha fazla olmuştur.

AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çelik parçaların çentik darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.6'da verilmiştir.

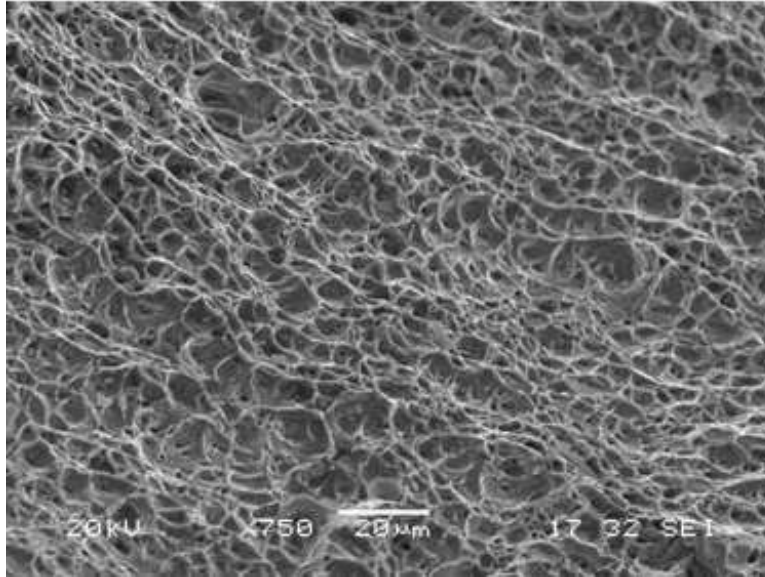
Tablo 6.6. AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklere uygulanan çentik darbe tokluk deneyi sonrası elde edilen tokluk değerleri

Malzeme kodu	Kaynak akımı değeri	Kaynak hızı (mms^{-1})	İlave metal	Darbe tokluk direnci (Joule)
316 190A 3.8	190	3.8	ER 316LSi	80 ± 2
316 190A 5.2	190	5.2		75 ± 5
316 150A P 3.8	150	3.8		50 ± 4
316 150A P 5.2	150	5.2		49 ± 12
316Ti 190A 3.8	190	3.8		64 ± 4
316Ti 190A 5.2	190	5.2		87 ± 4
316Ti150A P 3.8	150	3.8		71 ± 8
316Ti 150A P 5.2	150	5.2		58 ± 11



Şekil 6.56. AISI 316 ostenitik paslanmaz birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin çentik darbe tokluğuna etkisi

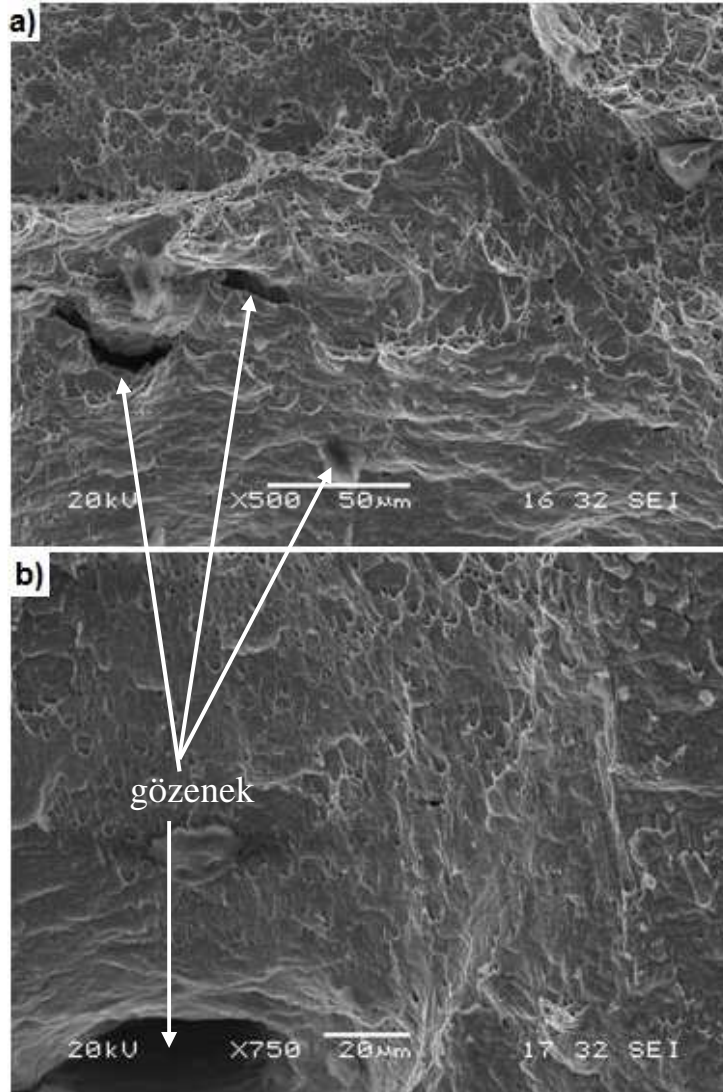
Şekil 6.57’de 190 amperde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası elde edilen kırılma yüzeylerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. Kırılma yüzeylerine bakıldığında kaynaklı ostenitik paslanmaz çeliklerin tipik kırılma morfolojileri görülmektedir. Bu görüntüler gamze şeklinde delikli bir ağ şeklinde delikli kırılma morfolojisindedir ve bunların bir ağ şeklinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Böyle bir görüntü bu parametrelerde kaynak edilen malzemenin çentik darbe deneyinde kırılmanın sünek olduğu ve numunenin dinamik yüklere karşı mukavemetinin iyi olduğunu göstermektedir. Ağ şeklindeki bu görüntüde çentik darbe deneyinde meydana gelen çatlak ve ilerlemeleri esnasında harcanan enerji değerlerinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.57. 190 amper kaynak akımını ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

Şekil 6.58’de çentik darbe deneylerinde en düşük darbe tokluğu elde edilen 150 amperde, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası elde edilen kırılma yüzeylerinin farklı büyütme görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde kırılma yüzeylerinin üzerinde küçük, büyük boyutlarda çatlaklar ve gözenekler bulunduğu görülmektedir. Bu çatlaklar çentik darbe deneyi gibi dinamik yükler altında ani gerilim yoğunlaşmalarını artırarak çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla çentik darbe deneyi esnasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi için harcanan enerji değerlerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Elde

edilen görüntülerden de anlaşıldığı gibi gamze şeklinde delikli görüntülerin azalması ve düz yüzeylerin artması düşük tokluk değerlerinin nedenini ispatlamaktadır.

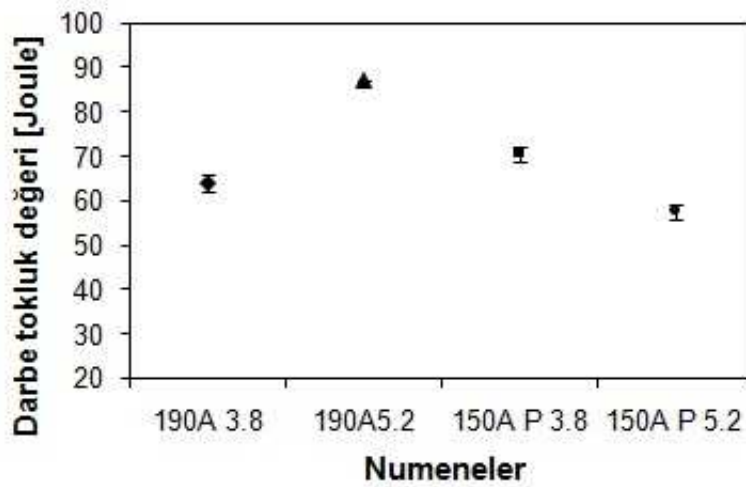


Şekil 6.58. 150 amper kaynak akımı, 5.2 mms^{-1} kaynak hızında darbeli akım ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

6.6.2. AISI 316Ti paslanmaz çelikler

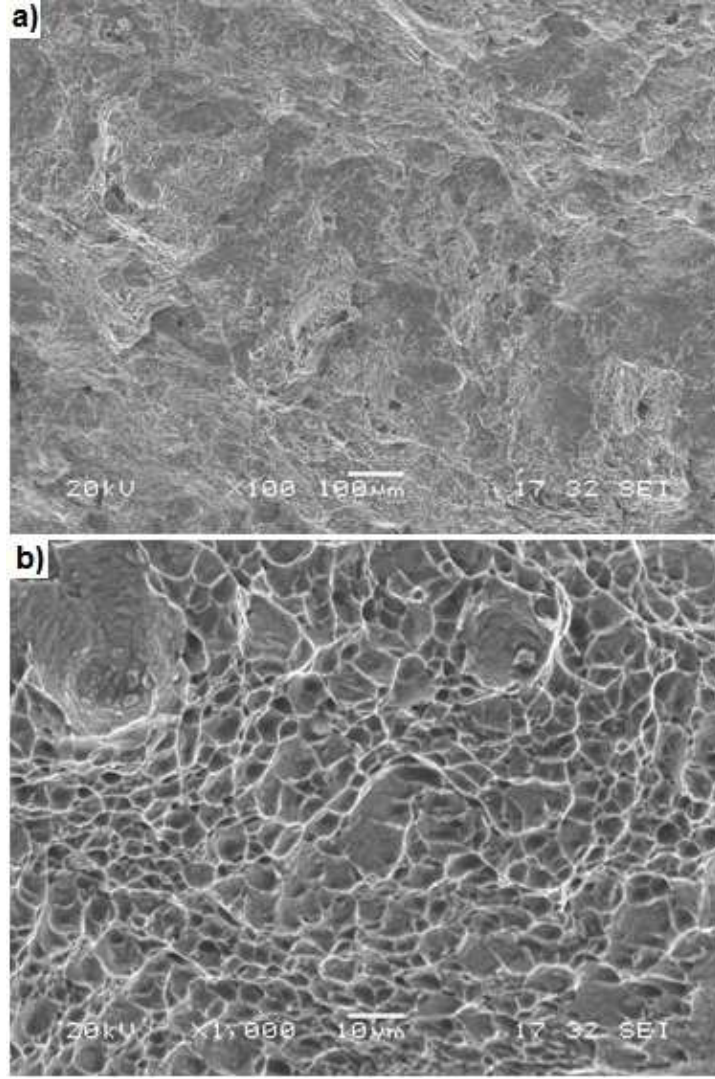
AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğin çentik darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 6.59'da verilmiştir. En yüksek çentik darbe tokluk değeri 87 joule ile 190 amperde 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmelerin sahip olduğu, en düşük çentik darbe tokluk değerlerinin ise 150 amperde 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım kullanılarak yapılan birleştirmelerin ortalama 58 joule ile sahip olduğu görülmektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerde nüfuziyet

değerleri AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğe göre daha yüksek olduğundan kaynak hızının artışına paralel olarak elde edilen optimum nufuziyet değerleri çentik darbe sonuçlarına olumlu etki etmektedir. Darbeli akım kullanıldığında düşük kaynak akımı değerinde kaynak hızının artışına bağlı olarak önceki bölümlerde belirtildiği gibi yetersiz nufuziyet olmakta ve darbe tokluk değerine olumsuz etkilemektedir. 150 amperde darbeli akım ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyinde en yüksek ve en düşük değerler arasındaki fark diğer parametrelere göre elde edilen değerden daha fazla olmuştur.



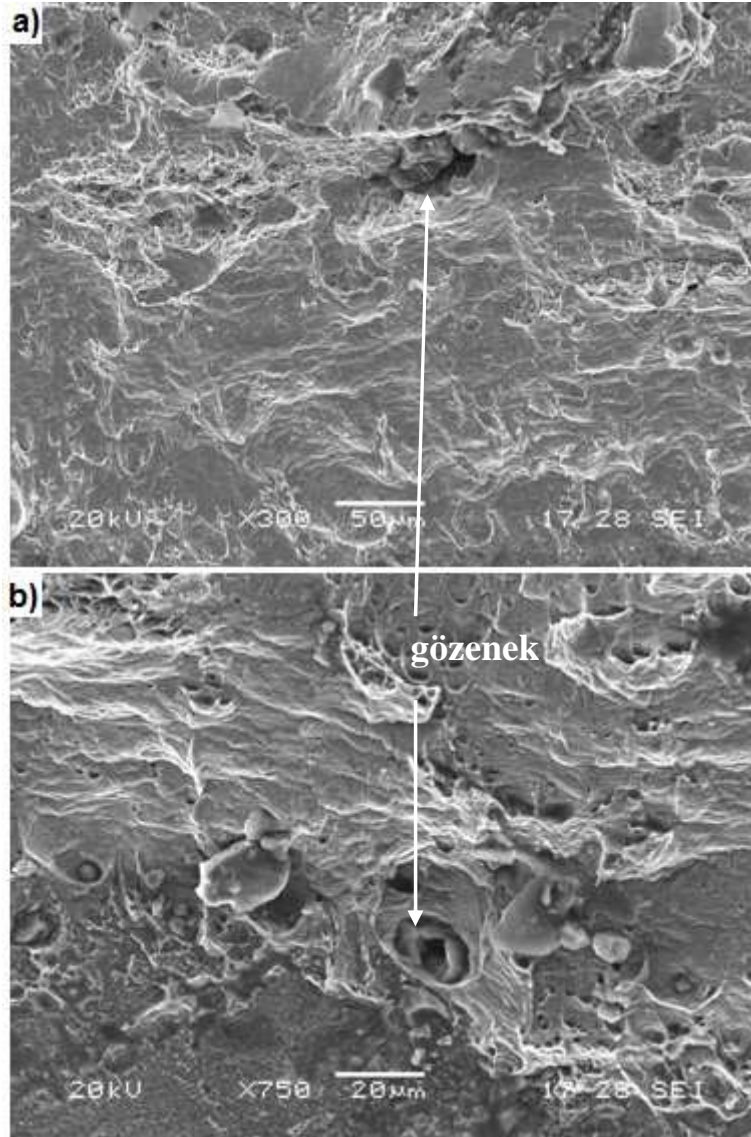
Şekil 6.59. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz birleştirilmesinde kullanılan farklı kaynak parametrelerinin çentik darbe tokluğuna etkisi

190 amperde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonucu elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.60'da verilmiştir. Kırılma yüzeylerine bakıldığında ostenitik paslanmaz çelikler için tipik kırılma morfolojileri görülmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında bunlarda gamze şeklinde delikli bir ağ şeklinde dağılmakta ve bazı gamze şeklindeki deliklerin daha derin ve daha geniş olduğu görülmektedir. Kırılma yüzeyinde bulunan bu geniş ve derin delikler çentik darbe deneyi esnasında harcanan enerji değerlerini yükselttiği düşünülmektedir. Böylece daha yüksek tokluk değerleri elde edilmektedir.



Şekil 6.60. 190 amper kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası a) 100x b) 1000x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

En düşük tokluk değerleri elde edilen 150 amperde, 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ve darbeli akım ile birleştirilen parçaların çentik darbe sonrası elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.61'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde de gamze şeklindeki derin deliklerin daha az olduğu, kırılma yüzeylerinde gözenek ve derin deliklerin bulunduğu gözlenmiştir. Ayrıca malzemenin yüzeyinde kırılma davranış olduğunu göstermeyen düz yüzey alanları mevcuttur. Malzeme içerisinde bulunan nufuziyet yetersizlikleri daha önce belirtildiği gibi ani yükler altında hızlı kırılmaların yol açacağından, düşük darbe tokluk değerlerinin elde edilmesine neden vermektedir.



Şekil 6.61. 150 amperde darbeli kaynak akımı ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe deneyi sonrası a) 100x b) 750x büyültmelerde SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

Bu çalışmada elde edilen darbe tokluk değerleri daha önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlarla farklılıklar göstermektedir. Bunun nedeni farklı parametrelerin kullanılması ve çentik darbe deney şartlarının farklı olmasından kaynaklanabilir. Ama bazı literatür çalışmalarında verilen Charpy çentik darbe deneylerinde elde edilen kırılma enerji değerleri 70-80 joule arasında değişmektedir [2]. Deneyde kullanılan ER 316 ilave metalin darbe tokluk değerleri 100 joule civarındadır [117]. Çalışmada elde edilen sonuçlar kaynak parametrelerinin ostenitik paslanmaz çeliklerin çentik darbe tokluk değerlerine önemli bir şekilde etki ettiği görülmektedir.

Kaynak metalinin içerisindeki δ -ferrit miktarının kaynak esnasındaki ısı girdisine bağılı olarak bir miktar artış göstermektedir [42, 44, 77]. Kaynak metali içerisinde bulunan hacim merkezli kübik yapıya sahip δ -ferrit miktarındaki artış çentik darbe tokluk değerlerini olumsuz etkilemekte ve düşük tokluk değerlerini neden olmaktadır.

Daha önceki malzemelerin çalışmalarda ana malzemenin çentik darbe tokluk değerleri kaynaklı malzemelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür [41, 44]. Ostenitik malzemelerin çentik darbe tokluk değerleri daha yüksek olmakta, kaynak esnasında ilave metalin kullanılmasıyla belirli bir yüzde miktarında oluşan δ -ferrit oranları, sabit hızla gerçekleştirilen çekme denelerinde mukavemet değerlerini olumlu, daha hızlı gerçekleştirilen çentik darbe deneylerinde ise çatlak oluşumunu hızlandıracağından olumsuz etki etmektedir.

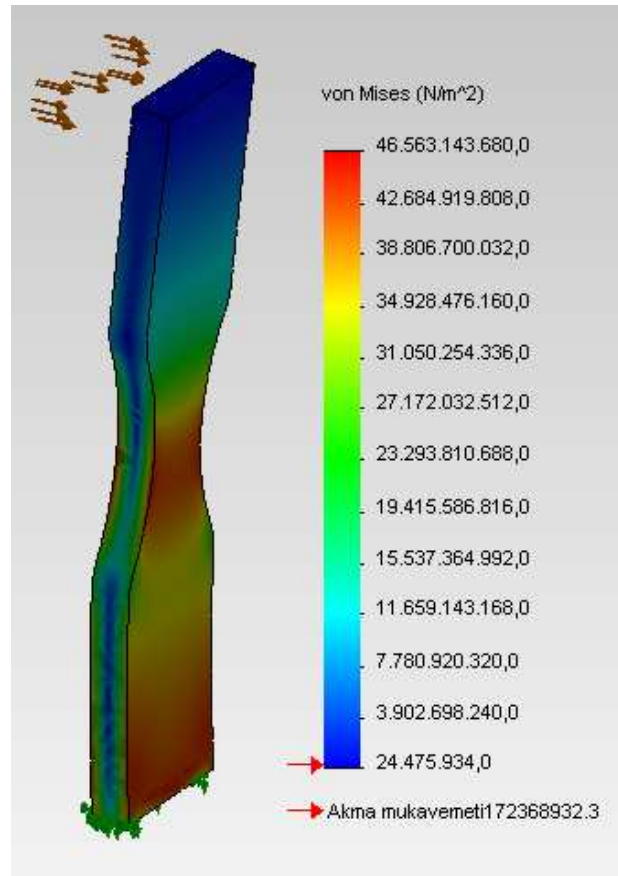
6.7. Yorulma Deneyleri

190 amper değerinde 3.8 mms^{-1} ve 5.2 mms^{-1} hızlarında birleştirilen AISI 316 ve AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Eğmeli yorulma deneyi bu çalışmada geliştirilen ve imalatı yapılan eğmeli gerilme tipi yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Kaynak hızının her bir malzemenin yorulma dayanımının etkisi ve farklı gerilmeler altındaki yorulma ömürleri bulunmuştur. Elde edilen yorulma deneyi sonuçları Tablo 6.7'de verilmiştir. Yorulma deneyleri yapılmadan önce yorulma numunesinin aynısı inventor çizim programında çizilerek, programın sağladığı imkânlar ile numunenin hangi noktasında gerilme yığılmalarının arttığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 6.62'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek gerilmelerin numunelerin en dar kesitinde olduğu gözlenmektedir.

Tablo 6.7. Farklı kaynak hızları kullanılarak birleştirilen AISI 316 serisi ostenitik paslanmaz çeliklerin yorulma deneyi sonuçları

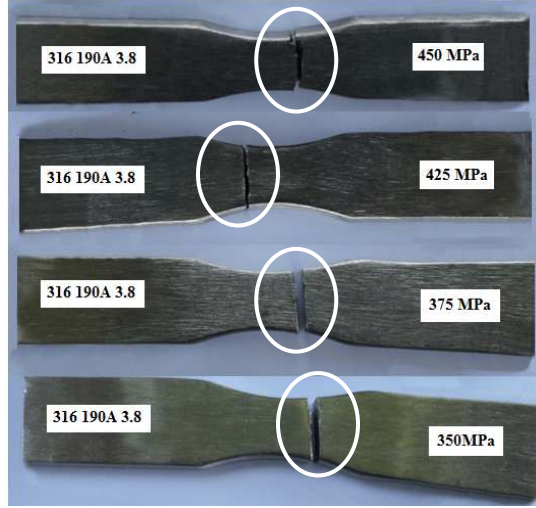
Gerilme (MPa)	AISI 316		AISI 316Ti	
	Çevrim sayısı			
	Kaynak hızı (mms^{-1})		Kaynak hızı (mms^{-1})	
	3.8	5.2	3.8	5.2
475	-	11 384	-	10 924
450	9 146	19 366	7 583	13 058
425	29 154	40 825	23 748	26 194
410	43 068	900 146	37 548	866 918
400	508 437	1 281 149	369 415	912 378
385	746 709	1 369 782	491 628	1 149 827
375	909 813	1 538 951	682 381	1 350 674
350	1 291 316	1 837 364	754 680	1 749 211
330	1 786 341	2 448 927	1 465 218	2 315 492
315	2 054 597	-	2 207 891	-



Şekil 6.62. Yorulma deney numunesine 450 MPa yük uygulanması halinde bu yükün numune yüzeyinde şematik dağılımı

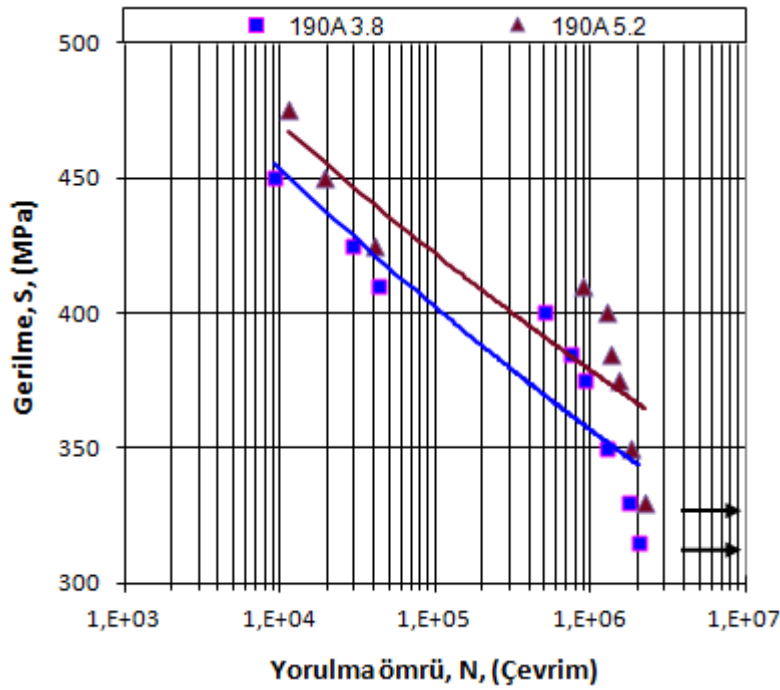
6.7.1. AISI 316 paslanmaz çelikler

Şekil 6.63’de gerçekleştirilen yorulma deneyi sırasında kullanılan numunelerin bazılarının fotoğrafları verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi numuneler genelde kaynak metalinin hemen yakınından kırılmıştır.



Şekil 6.63. Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin yorulma deneyi sonrası görüntüleri

Yorulma deneyi sonucu elde edilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin S-N eğrileri Şekil 6.64’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde 5.2 mms^{-1} kaynak hızında yapılan numunelerin yorulma dayanımının düşük kaynak hızında gerçekleştirilen malzemeleer göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

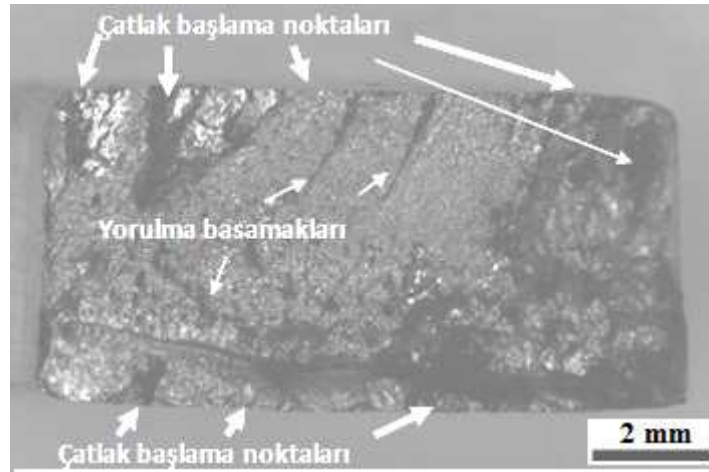


Şekil 6.64. Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait S/N diyagramları

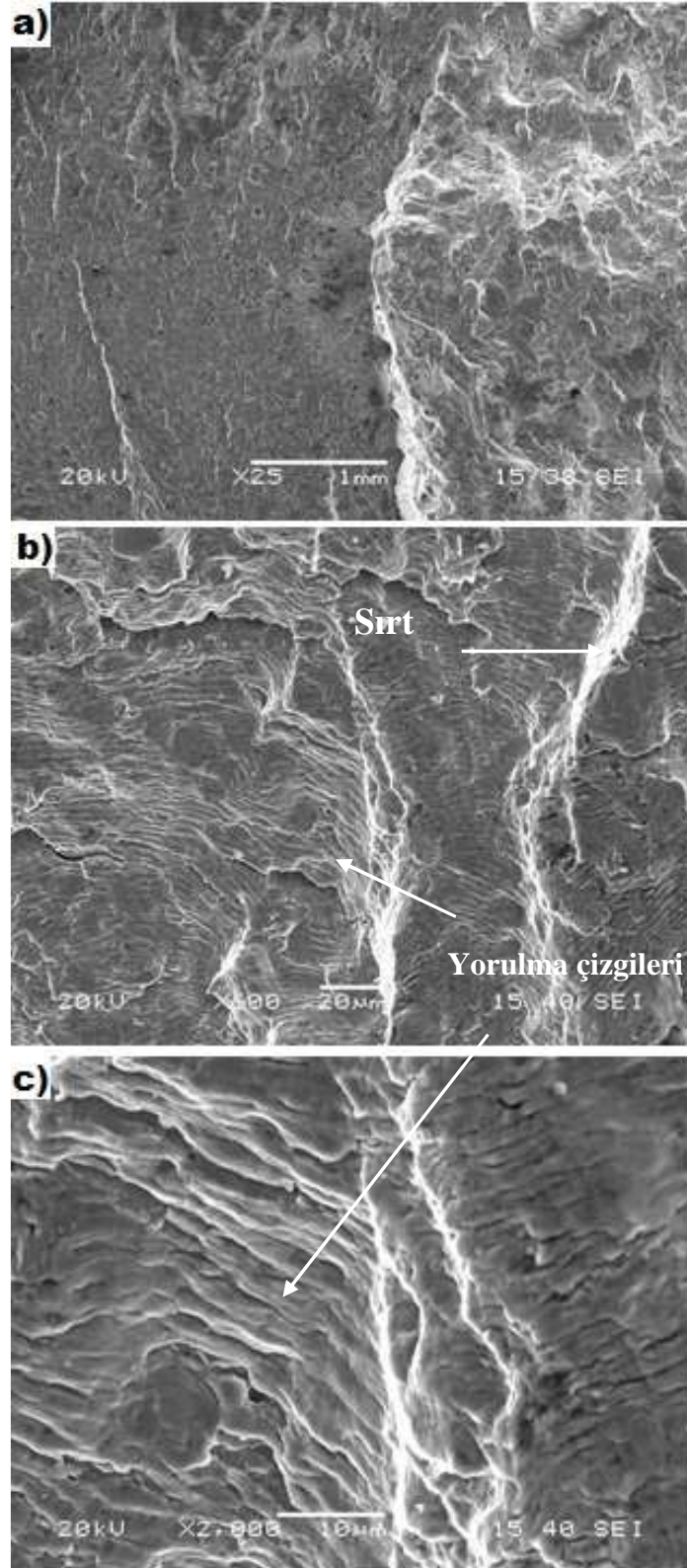
Aydoğdu'nun [48] yaptığı literatür taramasında kaynaklı birleştirmelerde gerilme genlikleri, artık gerilmeler, gerilme yığılmaları, kaynak hataları ve büyüklüğü birleştirmenin yorulma davranışına etki ettiği belirtilmiştir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde 3.8 mms^{-1} hızda kaynak edilen numunelerde daha önce belirtildiği gibi kaynak nüfuziyetinin birbirine girdiği, ters yandan yapılan kaynak bir önceki kaynak için bir bakıma ısıl işlem uygulamakta ve sertlik değerleri düşmektedir. Bu durumda malzemenin yorulma dayanımı olumsuz etkilediği ve düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. 5.2 mms^{-1} kaynak hızında birleştirilen numunelerde kaynak geometrisi birbirinin içine girmediğinden arka taraftaki pasoya ısıl etki daha az olmakta ve sertlik değerleri de daha yüksek olduğu önceki bölümde de belirtilmiştir. Bu durum yorulma dayanımına olumlu etki ettiği ve artırdığı düşünülmektedir.

Daha önce Gözütok [44] tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla elde edilen sonuçlar uyumlu olduğu gözlenmiştir. O çalışmada da bu çalışmada olduğu gibi farklı kaynak parametrelerinin yorulma dayanımına etki etmiştir. 190 amper değerinde, 3.8 mms^{-1} kaynak ilerleme hızı ile birleştirilen ve 425 MPa yük uygulanması sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin stereo mikroskop görüntüleri Şekil 6.65'de verilmiştir. Şekil

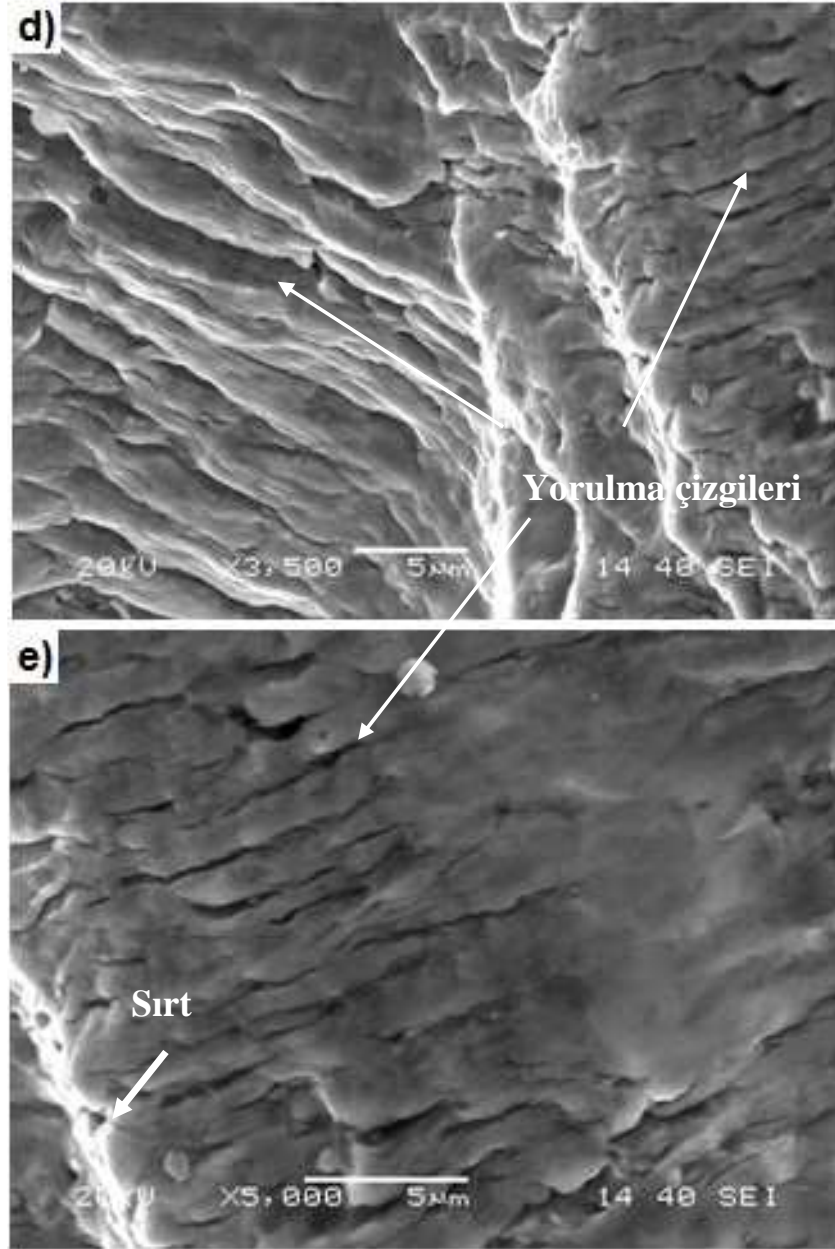
incelendiğinde yorulma esnasında oluşan çatlakların başlangıç noktaları ve yorulma basamakları net bir şekilde görülmektedir. Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin yorulma deneyi sırasında kırılan yüzeylerine SEM mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Şekli 6.66'da 190 amper değerinde kaynak akımında ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğinin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında farklı büyütmelerde kırılma yüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde çatlak başlangıcının hemen sonrasında darbe deneyinde sünek malzemelerin kırılma yüzeylerine benzer görüntülerin oluşturulduğu gözlenmiştir. Daha sonra çatlağın ilerlemesi ile yorulma çizgileri büyük büyütmelerde net olarak görülmektedir. Yorulma çizgileri daha çok sünek malzemelerde gerçekleştiği önceki çalışmada da belirtilmektedir [53]. Daha önceki bazı çalışmalarda da yorulma çizgileri gözlenmiştir [52, 53 111]. Yorulma çizgileri daha çok sırt denilen bölümlerin arasında oluştuğu gözlenmiştir. Kırılma yüzeyinden alınan EDS nokta analizleri Şekil 6.67'de gösterilmektedir. Yorulma çizgilerinin oluştuğu bölümler arasında element miktarında çok az farklılıklar bulunmaktadır.



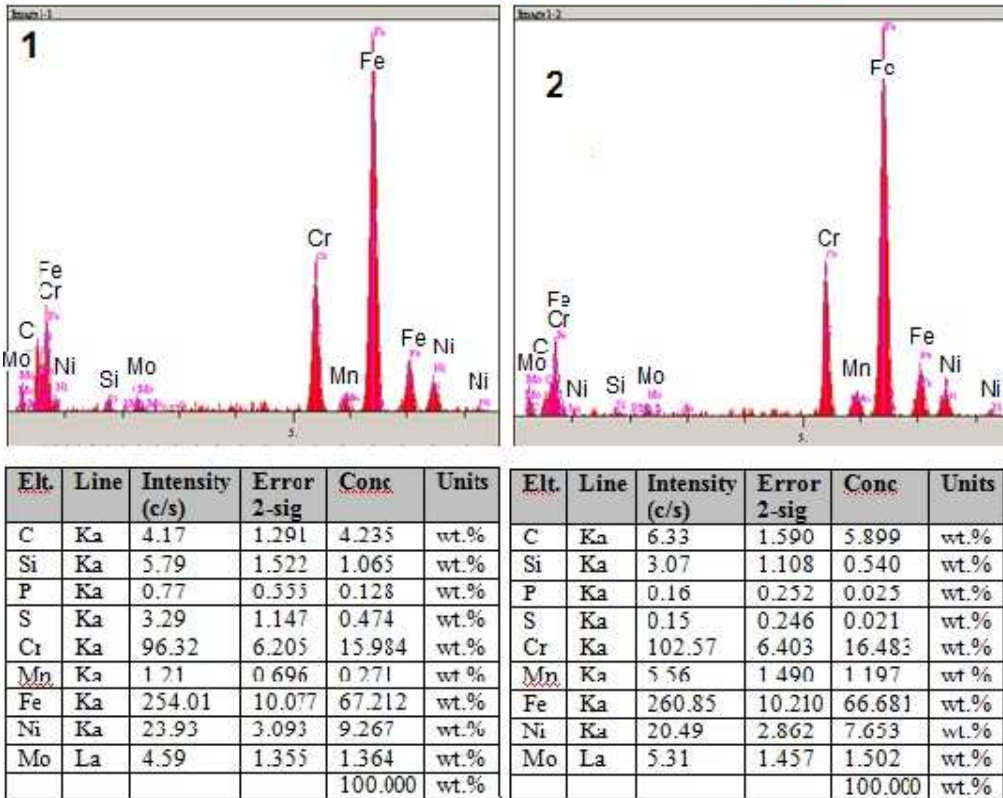
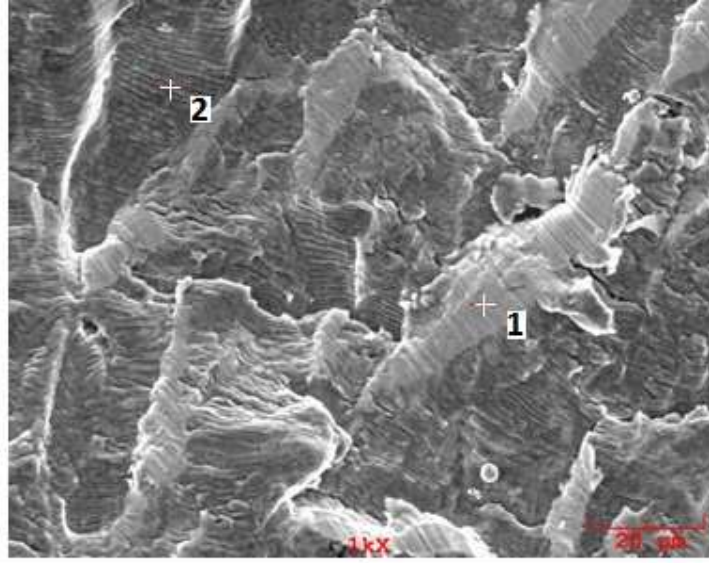
Şekil 6.65. 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü



Şekil 6.66. 190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 25 b) 600 c) 2000 d) 3500 e) 5000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri

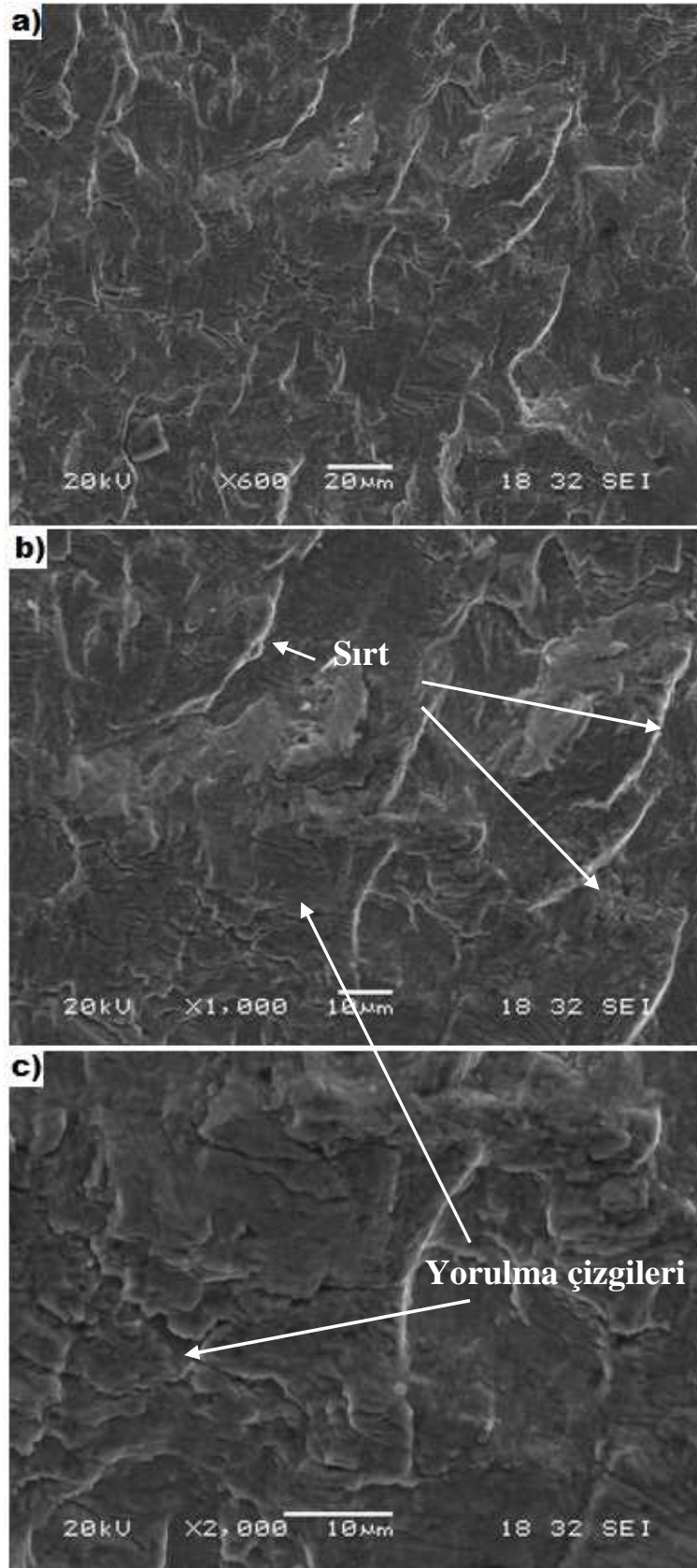


Şekil 6.66. Devam 190 amper değerinde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 25 b) 600 c) 2000 d) 3500 e) 5000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri



Şekil 6.67. 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin farklı noktalarından alınan EDS analizleri

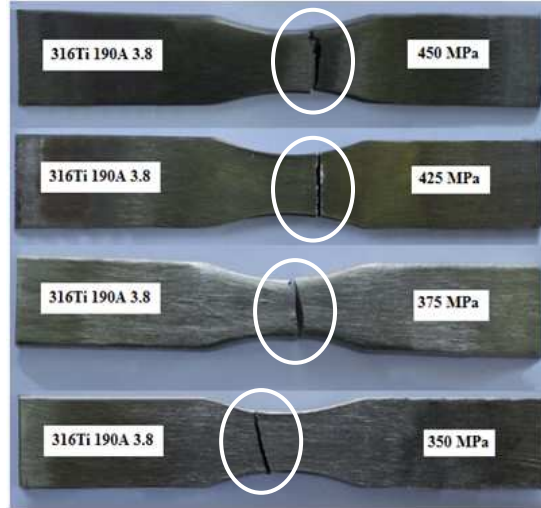
Şekil 6.68’de aynı hızda birleştirilen numuneye 375 MPa da gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında farklı büyütme ölçeklerinde kırılma yüzey görüntüleri verilmiştir. Gerilme değerleri düştüğünde yorulma çizgileri daha önce belirtilen 425 MPa gerilme altında yorulma malzemelere kıyaslandığında daha net değildir.



Şekil 6.68. 190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin 375 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 600 b) 1000 c) 2000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri

6.7.2. AISI 316Ti paslanmaz çelikler

Şekil 6.69'da gerçekleştirilen yorulma deneyi sırasında kullanılan numunelerin bazılarının fotoğrafları verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi numuneler genelde kaynak metalinin hemen yakınından kırılmıştır.

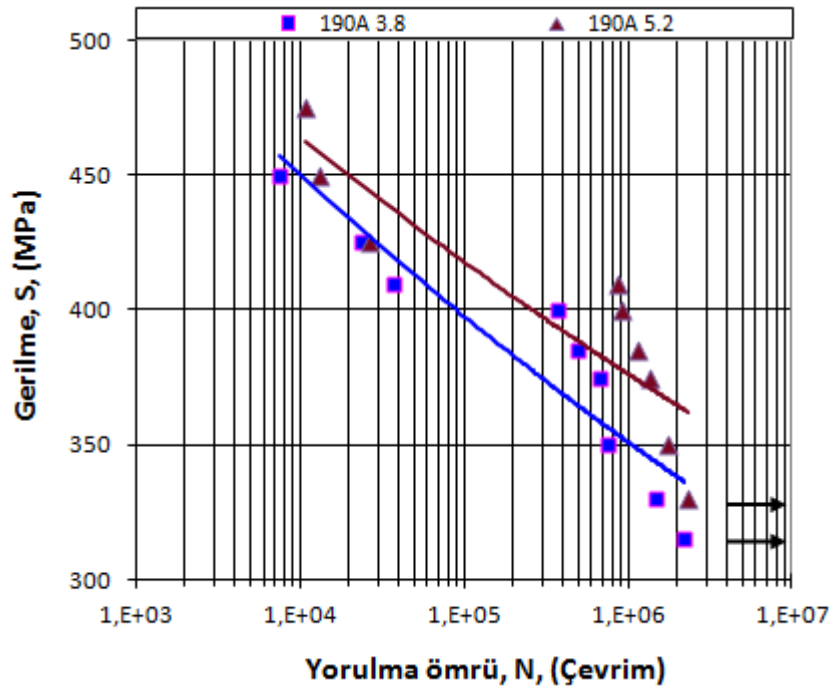


Şekil 6.69. Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerin yorulma deneyi sonrası görüntüleri

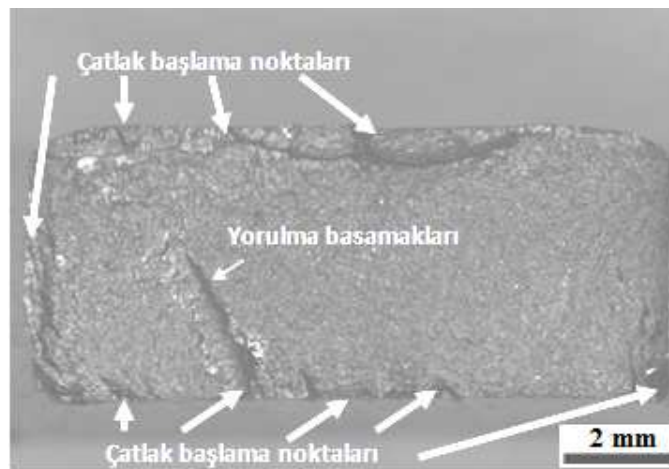
Yorulma deneyi sonucu elde edilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin S-N eğrileri AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin S-N eğrilerine benzer davranış göstermektedir (Şekil 6.70). Şekil 6.70 incelendiğinde 5.2 mms^{-1} kaynak hızında yapılan numunelerin yorulma dayanımının düşük kaynak hızında gerçekleştirilen malzemelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu dayanıma ait olan gerilme ve ömür değerleri Tablo 6.7'de verilmiştir.

190 amperde, 3.8 mms^{-1} kaynak ilerleme hızı ile birleştirilen ve 425 MPa yük uygulanması sonucu elde edilen kırılma yüzeyinin stereo mikroskop görüntüleri Şekil 6.71'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde aynı parametrelerde elde edilen AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliğin kırılma yüzeyine benzer görüntüler elde edildiği anlaşılmaktadır. Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin yorulma deneyi sırasında kırılan yüzeylerine SEM mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Şekli 6.72'de 190 amper değerinde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliğinin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında farklı büyütme ölçeklerinde kırılma yüzey

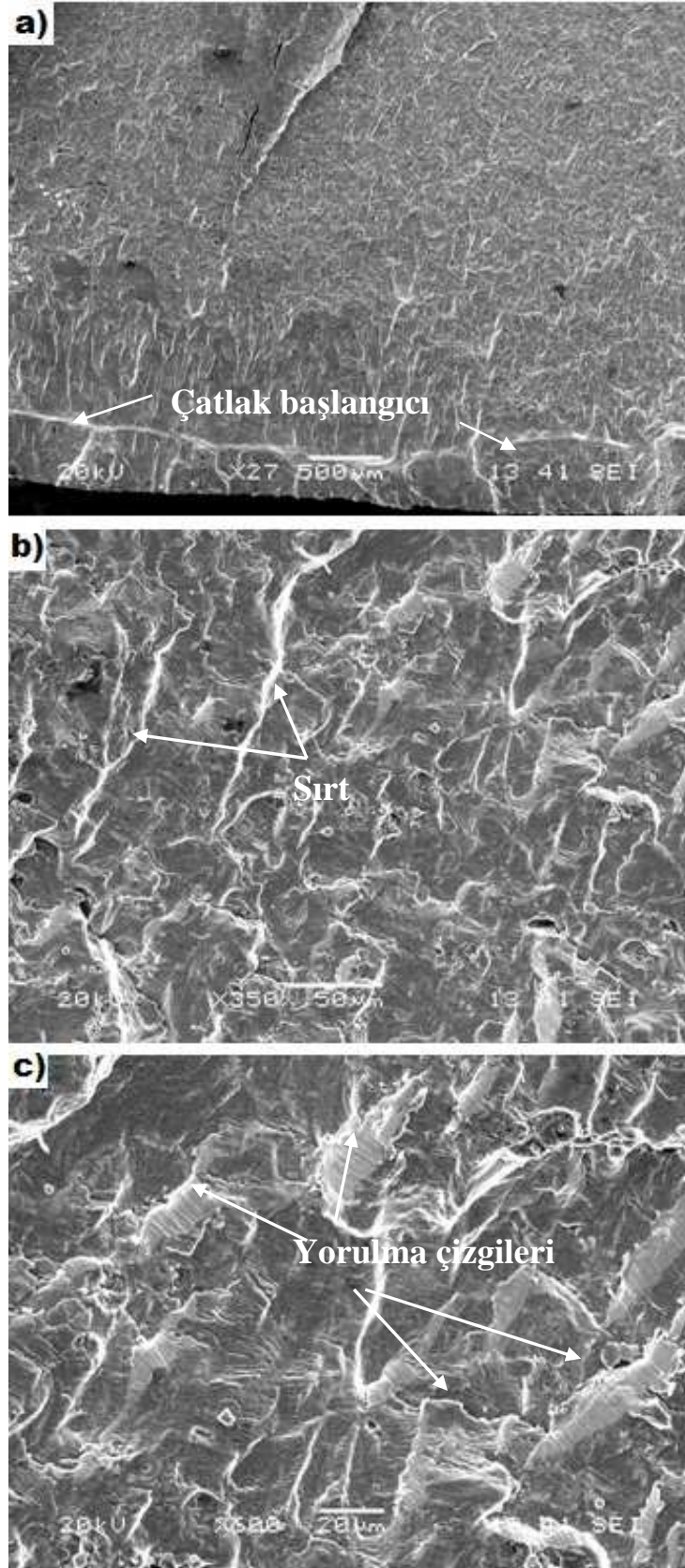
görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde çatlak başlangıcının hemen sonrasında AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklere benzer kırılma yüzeyleri elde edildiği görülmektedir. Bu yüzeyler incelendiğinde AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde olduğu gibi sünek malzemelerin kırılma yüzeylerine benzer görüntülerin oluşturulduğu gözlenmiştir. Daha sonra çatlağın ilerlemesi ile yorulma çizgileri büyük büyütmelemlerde net olarak görülmektedir. Yorulma çizgileri daha çok sünek malzemelerde gerçekleştiği önceki çalışmada da belirtilmektedir [53].



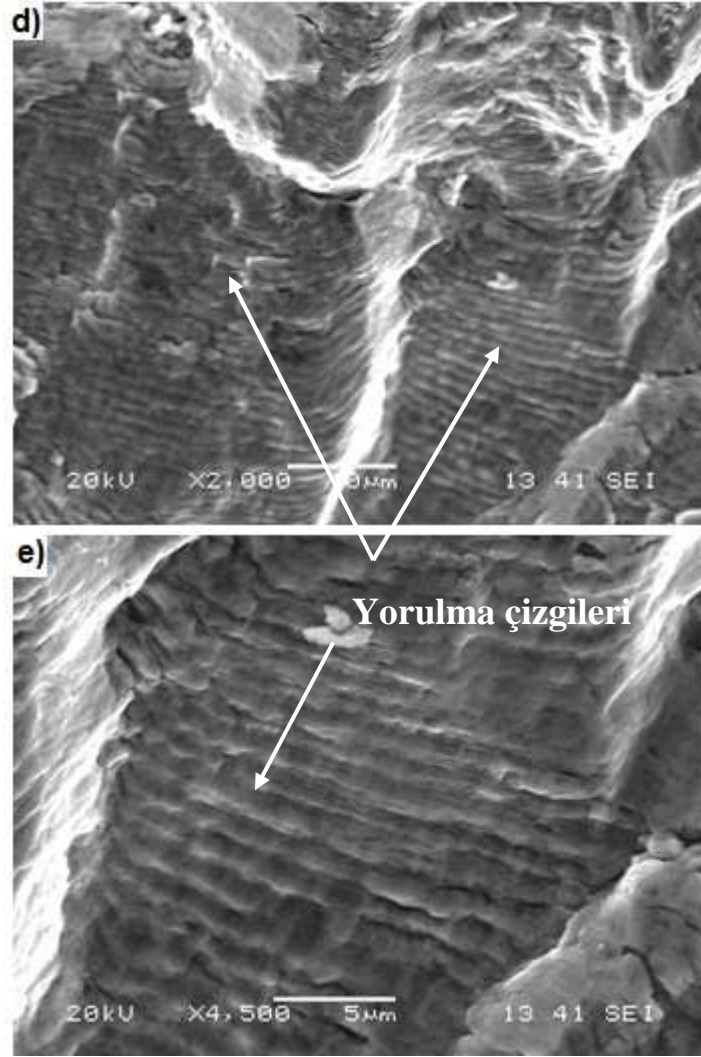
Şekil 6.70. Farklı kaynak hızlarında birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere ait S/N diyagramları



Şekil 6.71. 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin stereo mikroskop görüntüsü



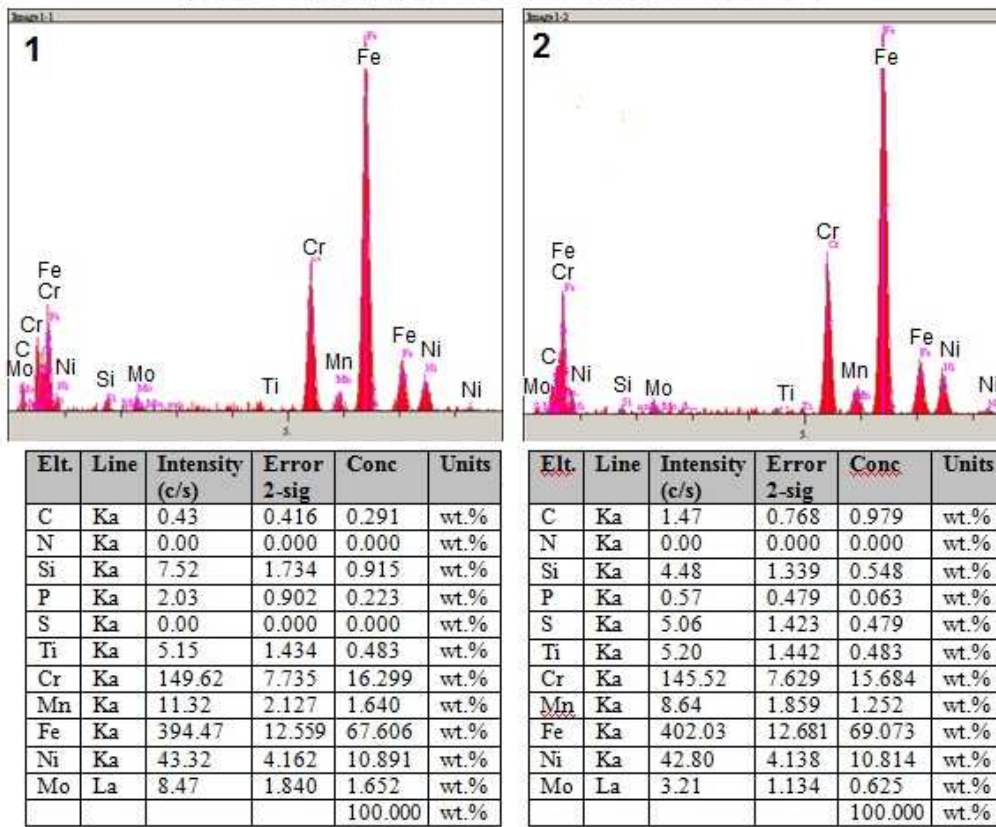
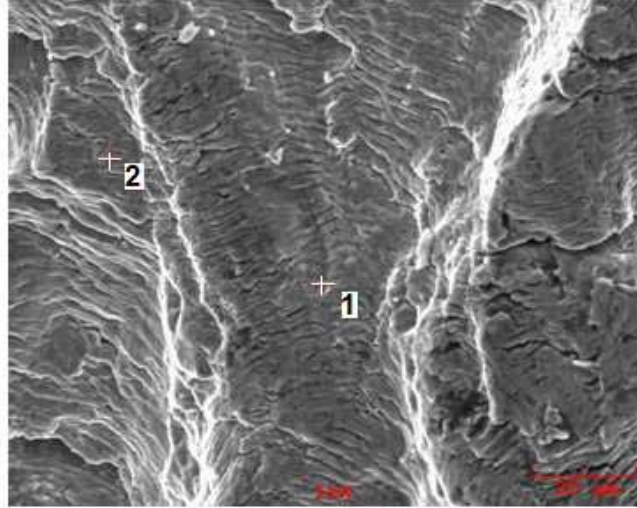
Şekil 6.72. 190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 27 b) 350 c) 1500 d) 2000 e) 4500 büyültmelerdeki SEM görüntüleri



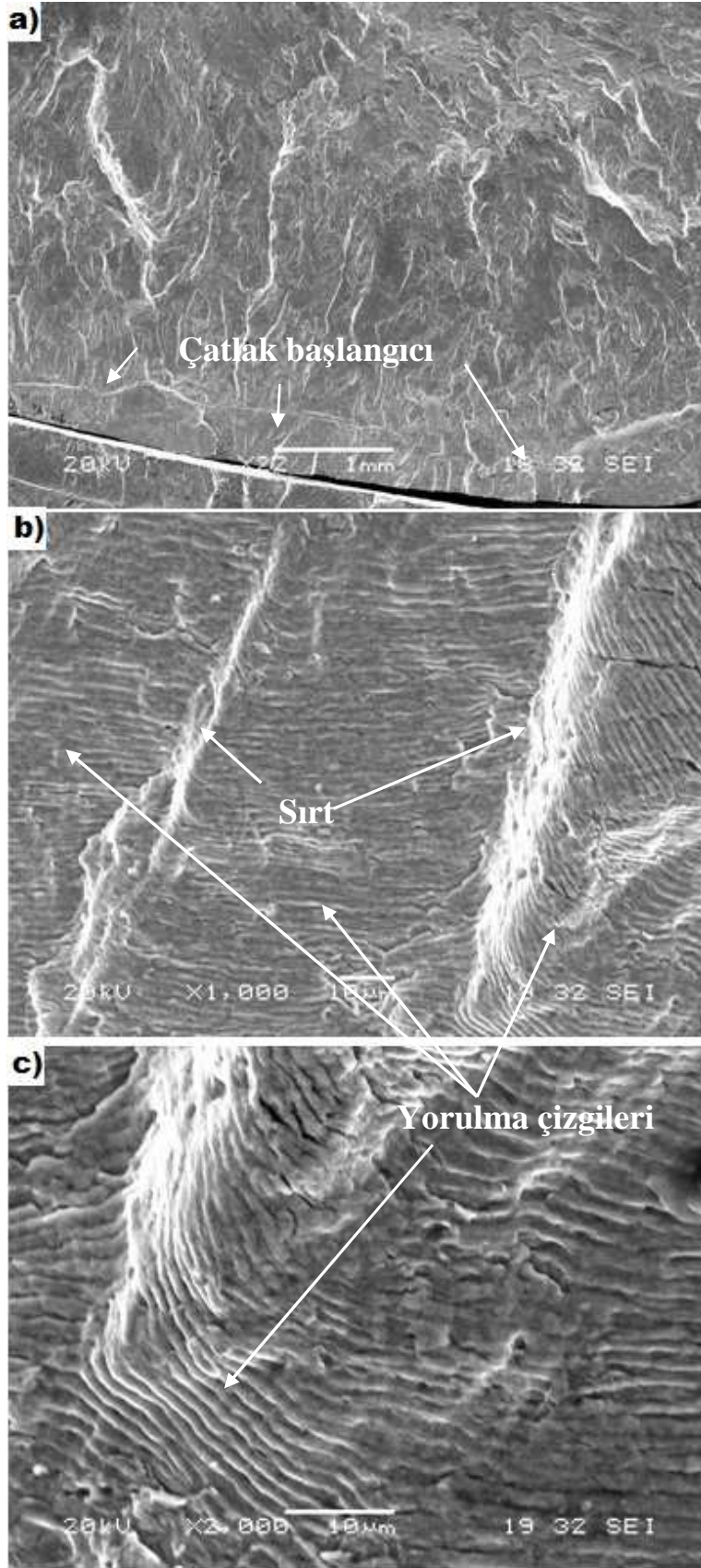
Şekil 6.72. Devam kaynak akımı değerinde ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 27 b) 350 c) 1500 d)2000 e) 4500 büyültmelerdeki SEM görüntüleri

Kırılma yüzeyinden alınan EDS nokta analizleri Şekil 6.73’de gösterilmektedir. Yorulma çizgilerinin oluştuğu bölümler arasında element miktarında çok az farklılıklar bulunmaktadır.

Şekil 6.74’de aynı hızda birleştirilen numuneye 375 MPa da gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında farklı büyültmelerde kırılma yüzey görüntüleri verilmiştir. Elde edilen görüntüler AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerde olduğu gibi gerilme değerleri düştüğünde yorulma çizgileri 425 MPA gerilme altında yorulma malzemelere kıyaslandığında daha net değildir.



Şekil 6.73. 425 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi uygulanan AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklere ait kırılma yüzeyinin farklı noktalarından alınan EDS analizleri



Şekil 6.74. 190 amper kaynak akımı ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızı ile birleştirilen AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çeliklerin 375 MPa gerilme altında eğmeli yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin a) 22 b) 1000 c) 2000 büyültmelerdeki SEM görüntüleri

Yüksek gerilme sonucunda malzeme kesitinin dış yüzeyinde kenarda yorulma çatlakları oluşmuş bir miktar çatlak ilerlemesi ile yüzeydeki kırılma gevrek kırılma oluşmuş ve daha sonra kalan kesit yüzeyi taşıyamayacak kesite ulaştığında çatlak ilerlemesi hızlanarak yükün homojen yayılmaması nedeniyle sırtlar ve bu sırtların içerisinde yorulma basamakları yorulma çizgilerini oluşturmuştur. Yorulma çizgilerinin oluşması malzeme kesitinin iç kısımlarında plastik şekil değiştirmesi sonucu sünek kırılmaların oluştuğu düşünülmektedir.

Çekme deneylerindeki sonuçlar hatırlanırsa, dayanımları çekme dayanımının bağlı olarak artışına daha önceki çalışmalarda da çekme dayanımı yüksek olan malzemelerin yorulma dayanımları da yüksek olmaktadır [44, 118]. Özellikle darbeli akımda birleştirilen 7075 alüminyum alaşımlarında yüksek akma dayanımı ve sünek davranış göstermektedir. Bu alaşımların çatlak oluşumuna ve ilerlemesine karşı dirençleri artığından dolayısıyla yorulma ömürleri artmaktadır. Esasında bu çalışmada düşük dayanımdeğerleri elde edilen 150 amper değerinde ve darbeli akım kullanılarak birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklere ait numunelerin yorulma deneyleri yapılmış olsaydı bu durum daha net olarak görüleceği düşünülmektedir. Aslında numune içerisindeki yetersiz birleştirme ve gözenek gibi kaynak hataları nedeniyle ostenitik paslanmaz çeliklerin çekme dayanım değerleri düşmektedir. Ünal'ın [52] çalışmasında, malzemenin sahip olduğu çekme dayanımı değerlerindeki artış yorulma dayanımı değerlerine olumlu etkilemiştir. Yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinde yorulma çizgilerinin oluşması sünek malzemelerin belirgin özelliğinin olduğu belirtilmiştir [52, 53]. Kırılmalar kaynak metalinde değil de geçiş bölgesinde gerçekleşmiştir. Daha önce yapılan çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum alaşımlarında yorulma deneylerinde ITAB bölgesinde kırılmaların meydana geldiği belirtilmiştir [53].

Bölüm 4.4'de metallerde yorulma kısmında da belirtildiği gibi, yorulma kırılmaları plastik şekil değiştirme, çekme gerilmesi ve çevrimli gerilmelerin aynı anda etki etmesiyle meydana gelmektedir. Dolayısıyla yorulma çatlaklarının oluşması ve ilerlemesi bu üç faktörün oluşması ile gerçekleşmektedir. Malzemelerin özelliğine bağlı olarak, belki bir çevrimden sonra, malzemedeki şekil değiştirme çatlakları meydana gelmekte ve belirli aralıklarla uygulanan çekme gerilmeleri de oluşan

çatlakların ilerlemesinde etkili olmaktadır. Yorulma deneyi esnasında yüksek gerilmeler altında plastik deformasyon derecesi artacağından, parçanın yorulma ömürlerinin düşmesine neden olmaktadır. Benzer yorum daha önceki bir çalışmada da yapılmıştır [52, 53]. Deformasyon şiddetinin artışına bağlı olarak yorulma çizgileri çok belirgin olmamaktadır. Bu malzemelerin sünek olarak, gamze şeklinde delikli kırılma oluşturulduğu belirtilmiştir [53]. Kaynak bağlantılarında yorulma dayanımlarının düşük olması ilk olarak dış ve iç yüksek çentik etkileri ile açıklanmaktadır. İç çentikler olarak nufuziyet hatası, curuf ve gözenekler, dış çentikler ise çoğunlukla kaynak dikiş yüzeyi (tırtık, kaynak dikiş yüksekliği, nufuziyet oyuğu) olarak belirtilmiştir [48]. Gözütok'un [44] çalışmasında belirtildiğine göre de yorulma çatlaklarının genellikle kaynak uçlarından başlamakta ve ilerlemektedir [49]. Bu bakımdan kaynaklı birleştirmelerin yorulma ömürlerinin artması için özenli bir biçimde birleştirilmesine dikkat edilmelidir. Kaynaklı birleştirme yapılmadan önce kaynak bölgesinde plastik deformasyon oluşturulması ve bölgenin basma gerilimi altında kalması, yorulma dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır [49]. Bu çalışmada yorulma numunelerinin yüzeyleri itina ile taşlanıp daha sonra zımpara ile temizlendiği için dış çentik etkileri bulunmamaktadır. Kaynak akım değeri aynı tutulup, hız değiştirildiğinden farklı nufuziyet ve kaynak geometrisi olduğundan iç çentik etkileri her parametre ile yapılan birleştirmelerde farklı olacağından kaynaklı birleştirmeler yorulma davranışları göstermektedir.

Düşük kaynak hızı ile birleştirilen malzemelerde hem kaynak metali genişleyecek hem de ITAB'da tane büyümesi gibi yapıda fazla bir değişim olsa da düşük kaynak hızlarında ana metal ve kaynak metali arasındaki geçiş bölgesi genişlemektedir. Ayrıca, Çalık [51] ve Gözütok [44] tezlerinde birleştirildiği gibi kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımına, ana metalin cinsi, kaynak dikişinin şekli, kalitesi, kaynak yöntemi ve konstrüksiyonun şekli etkilemektedir. Düşük kaynak hızlarında daha fazla enerji girişi olacağından, birleştirmede daha geniş alanda ısıdan etkilemektedir.

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada AISI 316 ve AISI 316Ti tipi ostenitik paslanmaz çelikler TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak kaynakları gerçekleştirilen ostenitik paslanmaz çelik malzemelerde kaynak parametrelerinin nufuziyet, sertlik dağılımı, çekme dayanımı, darbe tokluğu, yorulma davranışları ve mikroyapıya etkileri araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- İlave metal kullanılmadan yapılan kaynakta, kaynak akımı değerine paralel olarak kaynak nufuziyeti artmaktadır. Kaynak edilen malzemenin kompozisyonu nufuziyet değerine etki etmektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelik malzemelerde daha yüksek nufuziyet değerleri elde edilmiştir.
- Darbeli akım ile kaynatılan malzemelerle normal akım ile kaynatılan numunelere göre daha az nufuziyet değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla darbeli akım nufuziyeti olumsuz etkilemektedir.
- Elde edilen nufuziyet parametreleri kullanılarak P/W oranları ilave metal kullanılmadan yapılan kaynaklarda farklı değerlere sahiptir. Özellikle darbeli akım kullanılarak yapılan kaynaklarda P/W oranları kaynak akımı değerlerindeki artışa bağlı olarak artış göstermektedir. İlave metal kullanılmadan yapılan kaynaklarda, kaynak metalinin yüzeyinden, derinliğe doğru sertlik değerlerinde özellikle darbeli akımla yapılan kaynaklarda sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Sertlik değerleri malzemenin kompozisyonuma bağlı olarak değişmektedir.

- İlave metal kullanılarak yapılan birleştirmelerde de kaynak akımı değerindeki artışa bağlı olarak nufuziyet değerleri arttığı ve darbeli akımda daha düşük nufuziyet değerleri elde edildiği görülmüştür.
- P/W oranları için kaynak kaynak akımı değerinin artışına bağlı olarak bir artış göstermektedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler için ise yüksek kaynak akımı değerlerinde P/W oranı artmaktadır. Darbeli akımda ise kaynak akımı değerinin artmasına paralel olarak P/W oranları her iki tür ostenitik paslanmaz çeliklerde artmaktadır.
- İlave metal kullanılarak yapılan kaynaklarda kaynak metalinin yüzeyine yakın noktalarda düşük kaynak değerlerinde yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir. Yüksek kaynak akımı değerinde gerçekleştirilen kaynaklı numunelerde ise daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Darbeli akımda gerçekleştirilen numunelerin sertlik değerlerinde aynı şartlarda gerçekleştirilen kaynaklı numunelere göre daha sert olduğu gözlenmiştir.
- İlave metal kullanılarak normal ve darbeli akımlarda kaynak edilen parçalarda nufuziyet değerleri kaynak hızının artışına bağlı olarak sürekli düşüş olduğu gözlenmiştir. Kaynak hızının artmasına bağlı olarak P/W oranları da genel olarak düşmektedir.
- İlave metal kullanılarak farklı hızlarda yapılan kaynaklarda sertlik değerleri AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için hız artışına bağlı olarak düşmektedir. Diğer taraftan darbeli akımda ise hız artışına bağlı olarak artmaktadır.
- Nufuziyet çalışmalarında mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiş, kaynak metalinin mikroyapısı araştırılmıştır. Kaynak akımı değerine ve kaynak hızına bağlı olarak kaynak metalinin mikroyapılarında az da olsa farklılıklar gözlenmiştir.
- Mekanik deneyler için birleştirilen malzemelerde kaynak akımı değerleri ve kaynak hızları, kaynak metalinin mikroyapısına ve özellikle geçiş bölgesine etki etmiştir. Yüksek kaynak akımı değerinde ve düşük ilerleme hızlarında ana metal ve kaynak metali arasındaki geçiş bölgelerinin yapısının değiştiği ve bu bölgelerin büyüdüğü

gözlemlenmiştir. Darbeli akımda ise diğerlerinde olduğu gibi bir geçiş bölgesi neredeyse görülmemektedir.

- EDS nokta ve EDS çizgi analizleri yapılmıştır. Her iki malzemede de kaynak metalini ana metal arasındaki element dağılımları arasında azda olsa farklılıklar gözlenmiştir.
- Birleştirilen malzemelerin sertlik ölçümlerinde kaynak metalinin sertliği ana metale oranla daha yüksek olduğu ve sertlik değerlerinin kaynak parametrelerine bağlı olarak farklı sertlik değerleri elde edilmektedir. Bu fark AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için daha yüksektir.
- Kullanılan kaynak parametrelerinin çekme deneyi sonucunu etkilemiş, AISI 316 malzemeler için en yüksek çekme değeri 190 amper normal akımda ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında yapılan birleştirmelerden elde edilmiştir. En düşük değerler 150 amperde darbeli akım ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında yapılan birleştirmelerin sahip olduğu gözlenmiştir. % uzama değerleri de çekme değerleriyle aynı eğilimdedir. AISI 316Ti ostenitik paslanmaz çelikler için en yüksek çekme değerleri 150 amper ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızlarında birleştirilen numuneler sahip olurken en düşük çekme değerleri 150 amper darbeli akım ve 5.2 mms^{-1} kaynak hızında birleştirilen numunelerin sahip olduğu görülmüştür. Benzer eğilim % uzama değerleri içinde geçerlidir. Çekme deneylerinde nufusiyet ve birleştirme bölgelerinde oluşan hatalar çekme deney sonuçları önemli ölçüde etkilemiştir. Bu durum kırılma yüzey görüntülerindeki farklılıklarla net olarak görülmektedir.
- Çentik darbe deneylerinde kaynak parametreleri çentik darbe tokluğunda önemli ölçüde etkilemiş, AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikler için en yüksek tokluk değeri 190 amper ve 3.8 mms^{-1} kaynak hızıyla yapılan birleştirmelerin sahip olduğu gözlenmiştir. Yapılan kırılma yüzey incelemelerinde yüksek tokluk elde edilen numunelerin kırılma yüzeylerinde daha fazla gamze şeklinde delikli görüntü olduğu ve bu delikli görüntü network şeklinde yayıldığı gözlemlenmiştir. Düşük tokluk gösteren numunelerin kırılma yüzeylerinde de düz kırılma yüzeyler elde edildiği görülmüştür. AISI 316Ti malzemelerde ise en yüksek tokluk değeri 190 amper, 5.2 mms^{-1} kaynak

hızı ile birleştirilen numunelerden, elde edilen en düşük değer ise 150 amper darbeli akım kullanılarak 3.8 mms^{-1} kaynak hızında birleştirilen numunelerden elde edilmiştir.

- Farklı kaynak hızları kullanılarak birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerde yorulma deneylerinde kaynak hızının yorulma dayanımı sonuçlarını etkilediği ve her iki türdeki ostenitik paslanmaz çeliklerde en yüksek yorulma dayanımı 5.2 mms^{-1} kaynak hızı kullanılarak birleştirilen numunelerin sahip olduğu görülmüştür.
- Yorulma deneylerinde elde edilen kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinde yorulma çizgileri görülmüştür. Yorulma çizgileri daha yüksek gerilme altında gerçekleştirilen numunelerde daha net gözlemlenmiştir.

7.2. Öneriler

Benzer konularda çalışma yapacak araştırmacılara aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Farklı kompozisyonlara koruyucu gaz kullanılarak, bu çalışmada kullanılan parametrelerin nufuziyete etkisi araştırılabilir ve kullanılan parametrelerin etkisi ile karşılaştırılabilir.
- Ostenitik paslanmaz çeliklerin yüzeyine sürülecek nufuziyeti arttıracak düşünülen farklı kimyasallar kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Böylece, farklı kaynak akımı değerinde, voltaj, kaynak hızı, akım türü ve darbe frekansı gibi parametrelerin nufuziyete etkisi araştırılabilir.
- Birleştirme işleminde daha çok sayıda farklı kaynak akımı değeri, kaynak hızları ve farklı koruyucu gaz kompozisyonu seçilerek, bunların birleştirmelerin mikroyapısına, sertlik dağılımına, çekme dayanımına, çentik darbe tokluğuna, yorulma ve korozyon davranışlarına etkisi daha detaylı bir şekilde araştırılabilir.
- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ODABAŞ, C., “Paslanmaz Çelikler”, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri”, Askaynak-İstanbul, 2004.
- [2] SMITH, W. F., “Paslanmaz Çelikler, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri - Cilt 1”, Çeviri, ERDOĞAN, M., Ankara, 169-214, 2000.
- [3] TÜLBENTÇİ, K., KALUÇ, E., “Geçmişten Günümüze Paslanmaz Çelikler”, META, Sayı 20, 47-52, 1994.
- [4] URAL, M., KALUÇ, E., “Paslanmaz Çeliklerin TIG Yöntemi ile Kaynağı”, Makine & Metal Dergisi, 12-20, Mart, 1996.
- [5] KALUÇ, E., “Ferritik Kromlu Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Gedik Holding, Kaynak Dünyası, 11-14, Ocak 1989.
- [6] KARSLI, G., SEŞEN, M.K., “Paslanmaz Çelikler ve Üretimi”, Meta 44, sayı 2, 20-22, 1991.
- [7] LOTHONGKUM, G., VIYANIT, E., BHANDHUBANYONG, P., “Study on The Effects Pulsed TIG Welding Parameters on Delta-Ferrite Content, Shape Factor and Bead Quality in Orbital Welding of AISI 316L Stainless Steel Plate”, Journal of Materials Processing Technology, 110, 233-238, 2001.
- [8] GÜRÇAN, M., “TIG Kaynağı”, SEGEM (Sanayi Eğitim ve Geliştirme Merkezi Müdürlüğü, Ankara, 1987.
- [9] TÜLBENTÇİ, K., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, MIG-MAG Eriyen Elektrot İle Gazaltı Kaynağı”, Gedik Holding, İstanbul, 1990.
- [10] EŞME, U., “Effect of Pool Geometry on the Quality of TIG Welded Joints”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [11] KIM, I. S., SON, J. S., KIM, I. G., KIM, J. Y., KIM, O. S., “A Study on Relationship Between Process Variables and Bead Penetration for Robotic CO₂ Arc Welding”, Journal of Materials Processing Technology, 136, 139–145, 2003.
- [12] MURUGAN, N., GUNARAJ, V., “Prediction and Control of Weld Bead Geometry and Shape Relationships in Submerged Arc Welding of Pipes”, Journal of Materials Processing Technology 168, 478–487, 2005.

- [13] KIM, I. S., JEONG, Y. J., SON, I. J., KIM, I. J., KIM, J. Y., KIM, I. K., YARAGADA, P. K. D. V., "Sensitivity Analysis for Process Parameters Influencing Weld Quality in Robotic GMA Welding Process", *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 676–681, 2003.
- [14] WAHAB, M. A., PAINTER, M. J., DAVIES, M. H., "The Prediction of the Temperature Distribution and Weld Pool Geometry in the Gas Metal Arc Welding Process", *Journal of Materials Processing Technology*, 77, 233–239, 1998.
- [15] EL-BATAHGY, A. M., "Effect of Lazer Welding Parameters on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels", *Materials Letters*, 32, 155-163, 1997.
- [16] KARADENİZ, E., ÖZSARAÇ, U., YILDIZ, C., "The Effect of Process Parameters on Penetration in Gas Metal Arc Welding Processes", *Materials and Design*, 28, 649–656, 2007.
- [17] YILMAZ, R., TEHÇİ, T., "Kaynak Parametrelerinin ve Paslanmaz Çelik Kompozisyonunun Kaynak Nüfuziyetine Etkisi", 1. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı, Ankara, 972-982 , 2009.
- [18] MODENESI, P. J., APOLINAÁRIO, E. R., PEREIRA, I. M., "TIG Welding with Single-Component Fluxes", *Journal of Materials Processing Technology*, 99, 260-265, 2000.
- [19] TUSEK, J., SUBAN, M., "Experimental Research of The Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas in Arc Welding of High-Alloy Stainless Steel", *International Journal of Hydrogen Energy*, 25, 4, 369–376, 2000.
- [20] LOWKE, J. J., RICHARD, M., JAWARD, H., ANTHONY, M. B., "Prediction of Gas Tungsten Arc Welding Properties in Mixtures of Argon and Hydrogen", *IEEE Trans Plasma Sci.*, 25, 5, 925- 930, 1997.
- [21] DURGUTLU, A., "Experimental Investigation of The Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas on TIG Welding of Austenitic Stainless Steel", *Materials and Design*, 25, 19–23, 2004.
- [22] YILMAZ, R., BARLAS Z., "Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Koruyucu Gaz Kompozisyonunun Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, C:11, S:3, 391–400, 2005.
- [23] GÖKMEN, M., YILMAZ, R., "AISI 316Ti Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmesinde Koruyucu Gazın Mekanik Özelliklere Etkisi", 11. Uluslararası Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, 5–11, 2006.

- [24] YILMAZ, R., GÖKMEN, M., “Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynak Yöntemleri İle Birleşmesinde Kullanılan Koruyucu Gazın Tokluğa Etkisi”, 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 980–986, 2006.
- [25] YILMAZ, R., UZUN, H., “Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels Welded by GMAW And GTAW”, Marmara University, Journal of Marmara for Pure and Applied Sciences, 18, 97-112, 2002.
- [26] YONG, J., BONG, S. L., SANG, C. K., JUN H. H., “Ductile Fracture Mechanisms in Shielded Metal-Arc and Gas Tungsten-Arc Welds of Type 347 Stainless Steels”, Journal of Materials Science 34, 4751– 4759, 1999.
- [27] YILMAZ, R., ABUÇ, S., “Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağı İle Birleştirilmesinde Koruyucu Gazın Mekanik Özelliklere Etkisi”, Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi ve Sergisi, 141–148, Ankara, 9-10 Kasım 2007.
- [28] YILMAZ, R., ABUÇ, S., KUTLU, M. F., “Farklı Koruyucu Gaz Kullanılarak Birleştirilen Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri”, Metal Makine, Sayı 163, 482–487, Ocak-Şubat, 2007.
- [29] YILMAZ, R., TÜRKYILMAZOĞLU, A., “TIG Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen Dupleks Paslanmaz Çelik Parçaların Çentik Darbe Özelliklerinin Belirlenmesi”, Metal Dünyası, Sayı 160, 137–140, Eylül 2006.
- [30] TÜRKYILMAZOĞLU, A., YILMAZ, R., “Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Metal Dünyası, Sayı 159, 84–88, Ağustos 2006.
- [31] YILMAZ, R., TÜRKYILMAZOĞLU, A., “Tensile Properties of Martensitic Stainless Steel Weldments”, Advanced Materials Research, Materials and Technologies, 22-23, 319-322, 2007.
- [32] YILMAZ, R., TÜRKYILMAZOĞLU, A., “Farklı İlave Metalleri Kullanılarak Birleştirilen AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikleri”, 987-993, 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 9–11 Kasım 2006.
- [33] YILMAZ, R., GÖKMEN, M., TÜRKYILMAZOĞLU, A., “Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında İlave Metallerin Mekanik Özelliklere Etkisi”, 339–344, 11. Uluslararası Denizli Malzeme Sempozyumu 19–21 Nisan 2006.
- [34] KURT, U., “Paslanmaz Çelik Kaynak Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1988.
- [35] KANBOLLU, S., “Östenitik Krom Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Özellikleri ”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.

- [36] KÖLÜK, F., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kaynak Yönteminin Isı Tesiri Altında Kalan Bölgeye Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [37] BAYLAN, O., “Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik – Martenzitik Farklı Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklı Bağlantılarında, Mikroyapı ile Özellikler Arasındaki İlişkinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [38] ERTEMİZ, E., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [39] CANİGENİŞ, N., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Kullanılan Değişik Gaz Bileşimlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
- [40] DEVELİ, K., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Argon Hidrojen Karışımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [41] TÜRKİYILMAZOĞLU, A., “Dubleks, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [42] ABUÇ, S., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Kaynağında Koruyucu Gazın Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [43] GÖKMEN, M., “Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemleri ile Kaynağında Koruyucu Gaz ve İlave Metallerin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [44] GÖZÜTOK, E., “Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Birleştirmelerin Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [45] GÜLENC, B., “MIG-MAG Kaynağında Koruyucu Gaz Karışımının Kaynak Metalinin Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995.
- [46] ATEŞ, H., “MIG-MAG Kaynağında Kullanılan Argon Gazına O₂ ve CO₂ İlavesinin Kaynak Metali Tokluğu ve Mikroyapısına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.

- [47] YILDIZ, C., “MAG Kaynağında Nüfuziyeti Etkileyen Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [48] AYDOĞDU, K., “Kaynak Bağlantısının Yorulma Dayanımının Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [49] ŞIK, A., “Otomobil Saclarının MIG/MAG Kaynağında Gaz Karışımlarının Bağlantının Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [50] AKKAŞ, A., “Galvanizli ve Ostenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynaklı Bağlantılarının Yorulma Dayanımlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [51] ÇALIK, A., “Dolgu Kaynağı Yapılmış Millerin Yorulma Ömrünün Deneysel Olarak Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
- [52] ÜNAL, E., “Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 4340 Çeliği ile Paslanmaz Çeliklerin Dayanımının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [53] TANRIÖVER, L., “AA5052/2024 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [54] AYDEMİR, B., “Ön Kaplı Çelik Sacların Kaynak Bağlantılarının Yorulma Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.
- [55] ALSARAN, A., “Kaynaklı Parçaların Yorulması”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
- [56] Teknik Metal Endüstri Malzemeleri Tic. ve San. A.Ş., “Paslanmaz Çelikler”, Adana, 2002.
- [57] KAYIR, Y. Z., “Türkiye Paslanmaz Çelik Üretebilir mi?”, II.Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Ankara, 11-23, 2003.
- [58] ABINGTON PUBLISHING, “Welding Metallurgy of Stainless Steels”, Abington Welding Training Module, Cambridge, 1-45, 1994.
- [59] KALUÇ, E., TÜLBENTÇİ K., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi, Eğitim ve Uygulama Merkezi, 1998.

- [60] ARAN, A., TEMEL, M. A., Paslanmaz Çelik Yası Mamuller, Sarıtas Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., 165 , İstanbul, 2003.
- [61] ARAN, A., TEMEL, M. A., “Paslanmaz Çelik”, Acar Matbaacılık A.Ş., İstanbul, 2004.
- [62] KALUÇ, E., TÜLBENTÇİ, K., “Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği” Seminer Notları, Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Araştırma, Eğitim ve Uygulama Merkezi, Kocaeli, 7-178, 1995.
- [63] KILIÇ, M., “AISI 304 Paslanmaz Çeliği ve 1040 Çelik Çifti’nin Plazma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [64] POLLARD, B., “Selection of Wrought Precipitation-Hardening Stainless Steels”, ASM Metals Handbook, V.6, 482-493, 1993.
- [65] TÜLBENTÇİ, K., “MIG/MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi”, Arctech Yayını, İstanbul, 1998.
- [66] TÜLBENTÇİ, K., “ Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Böhler Kaynak Dünyası, 5-10, 1985.
- [67] CASTNER, H. R., “Material and Procedure Considerations for Welded Austenitic Stainless Steels”, 8th Annual North American Welding Research Conference, Edison Welding Institute, Columbus, ohio, 1–6, 1992.
- [68] ANIK, S., VURAL, M., “ 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi”, Cilt-2, Birsen Yayınları, İstanbul, 355-357, 1993.
- [69] KALUÇ, E., “ Östenitik Krom – Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Gedik Kaynak Dünyası, Sayı 2, 18–21, 1996.
- [70] ALPTEKİN, A., “Sürtünme Kasıştırma Kaynak Yönteminin Paslanmaz Çeliklere Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [71] ALTHOUSE, A. D., TURNQUIST C. H., BOWDITCH, W. A., BOWDITCH, K. E., “Gas Tungsten Arc Welding”, Modern Welding, Goodheart-Willcox Pub., 327-328, 1992.
- [72] LUCAS, W., “Shielding Gases For Arc Welding”, Part 1. Welding & Metal Fabrication, June, 47-50, 1992.
- [73] GRANT, K. H., “Gas-Tungsten Arc Welding”, ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering, London, 6: 590-602, 1998.

- [74] KONG, H., “Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Robot Kaynağı ve Mekanik Özelliklerini İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [75] LANCASTER, J. F., “Metallurgy Of Welding, Chapman & Hall”, London 1993.
- [76] SUBAN, M., TUSEK, J., “Dependence of Melting Rate in MIG-MAG Welding on The Type of Shielding Gas Used,” J Mater Process Technol, 119: 185–192, 2001.
- [77] LIAO, M. T, CHEN, P.Y., “The Effect of Shielding-Gas Compositions on The Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Weldments”, Materials Chemistry and Physics, 55, 145-151, 1997.
- [78] İPEK, İ., “Nikel ve Monel Malzemelerin Kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [79] ANIK, S., TÜLBENTÇİ, K., KALUÇ, E., “Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı”, Gedik Holding Yayını, İstanbul, 1991.
- [80] ŞİRİN, K., “Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Spiral Boru Üretiminde Kaynak Dikiş Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [81] LINNERT, G.E. “Welding Metallurgy-Carbon and Alloy Steels”, Fourth Edition, vol. 1, Chapter 7, U.S.A., 1994.
- [82] ASM Metals Handbook, 9th Edition Welding Brazing and Soldering American Society for Metal, 1998.
- [83] İSTAŞ, O., “AT Koruyucu Gaz Standartları”, Mühendis ve Makine Dergisi, Kaynak Özel Sayısı, 23-25.
- [84] ÖZDEN, N., “Kaynağın Isıl İşlemi”, Nurettin Uycan Cilt ve Basım Sanayi A.Ş., İstanbul, 1985.
- [85] <http://www.saritas.com.tr/ktlg/pdf/Paslanmaz%20Celik%20Saritas%2004.pdf> (Erişim Tarihi: Eylül 2010).
- [86] TOPTAŞ, M., “Farklı Isıl İşlemlerin Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [87] HASÇALIK, A., “Yaprak Yay Yapımında Kullanılan 35Cr4 Çeliğinin Fretting Yorulma Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.

- [88] CZYRYCA, E. J., ASM Handbook, Mechanical Testing 8, 4. Baskı. U.S.A., 1992.
- [89] KAYALI, E. S., ENSARİ, C., DİKEÇ, E., ” Metalik malzemelerin mekanik deneyleri”, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, 143-169, 1983.
- [90] SAVAŞKAN, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Derya Kitabevi, Trabzon, 237- 270, 1999.
- [91] SAYACA, T., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 2000 Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [92] FROST, N. E., MARSH, K. J., POOK, L. P., “Metal Fatigue”, 54-65, Oxford, 1974.
- [93] MOORE, H. F., KOMMERS, J. B., “The Fatigue of Metals”, 5–12, N.York, 1972.
- [94] FUCHS, H. O., STEPHENS, K. I., “Metal Fatigue İn Engineering”, 135, N.York, 1980.
- [95] KARCI, A., “2024-T3 Al Alaşımının Tek Aşırı Yük Altında Yorulma Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [96] YILDIRIM, M., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kırleştirilen 3000 Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [97] ER, M., “Yüksek Frekanslı, Genlik Ayarlı Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve 1100-h14 Alüminyum Levhasının Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [98] DURAN, F., “Kendinden Yağlamalı Yatakların Yorulma ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [99] DIETER, E. D., “Mechanical Metallurgy”, 3. Baskı.U.S.A., 1986.
- [100] SAMUELS, L. E., “Metals Engineering, A Technical Guide”, ASM International. Metals Park 3. Baskı Ohio, 1993.
- [101] SUBASI, M., “ AISI 4140 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı ve Kalıcı Gerilme İlişkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

- [102] SARITAŞ, S., “Engineering Metallurgy and Materials”, Gazi Üniversitesi, Yayın no 22, 1995.
- [103] GÜLEÇ, Ş., ARAN, A., “Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı”, TÜBİTAK MBEAE Matbaası, Gebze, 81-88, 1983.
- [104] BAYDOĞAN, M., “GGG-60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Ostemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma ve Aşınma Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 1996.
- [105] CİNGİ, M., “Oksit Kalplı Titanyum ve Alaşımlarının Yorulma Davranışının İncelenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [106] ULUDAĞ, A., “Uçak Jet Motoru Bakımında Yorulma Hasarlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [107] SÖNMEZ, E., “SAE 8620 Çeliğinde Gaz Senamasyon Yüzey Sertlik Derinliğinin Eğmeli Yorulma Mukavemetine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.
- [108] WULPI, D. J., “Understanding How Components Fail”, American Society for Metals, Ohio, U.S.A., 1985.
- [109] KIRKHOPE, K. J., BELL, R., CARON, L., BASU, R. I., MA, K. T., “Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques”, Part 1, Marine Structures, Elsevier, 1998.
- [110] REMSYNDER, H., “Fatigue of Mechanically Fastened Joints”, Bethlehem Steel Corporation, 1981.
- [111] KUMRU, N., “ETİAL-141 ve 160 Tipi Döküm Alüminyum İle Plaka Tipi Alüminyum Malzemeler İçin Yorulma Makinası Tasarımı ve Eğmeli Yorulma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [112] SWANSON, S. R., “Handbook of Fatigue Testing”, ASTM committee E-9, 285.
- [113] Rodacciai Ürün Belgesi, 2005.
- [114] <http://www.matweb.com/> (Erişim Tarihi: Eylül 2010).
- [115] LU, S., FUJIII, H., NOGI, K., “Marangoni Convection and Weld Shape Variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ Shielded GTA Welding”, Materials Science and Engineering A, 380, 290–297, 2004.

- [116] LIN, Y.C., CHEN, P.Y., “Effect of Nitrogen Content and Retained Ferrite on Residual Stress in Austenitic Stainless Steel Weldments”, *Materials Science and Engineering A*, 165-171, 2001.
- [117] “Ürün Katoloğu” Kabotek, Askaynak, Eczacıbaşı, 1998.
- [118] BALASUBRAMANIAN, V. , RAVISANKAR, V., MADHUSUDHAN REDDY, G., “Effect of Pulsed Current Welding on Fatigue Behaviour of High Strength Aluminium Alloy Joints”, *Materials and Design* 29, 492–500, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Turgay TEHÇİ, 25.07.1983'de Osmaniye'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun'da, liseyi ise Adana Çukurova Elektrik Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi bilgisayar bölümünde tamamladı. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği bölümünde lisans eğitime başladı öğrenciliği sürecinde (2005-2007) yarı zamanlı olarak AKSAN MAKİNA SANAYİ ve TİCARET LTD. ŞTİ. de kalite kontrol bölümünde görev aldı. 2008 yılında lisans eğitimini bitirerek aynı sene Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi bölümünde yüksek lisans eğitime başladı. 2007-2009 yılları arasında GÜNPAŞ ASANSÖR SANAYİ ve TİCARET LTD. ŞTİ. şirketinde imalat müdür yardımcısı olarak çalıştı. 2009 yılında MERMER KESME ve SİLME (MKS) MAK. SAN. TİC. LTD. ŞTİ.'de tasarım ve AR-GE biriminde başladığı işinde halen çalışmaktadır.