



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**GAZ TUNGSTEN ARK KAYNAK
YÖNTEMİYLE FARKLI AKIM
DEĞERLERİNDE BİRLEŞTİRİLMİŞ
FARKLI AISI 318LN DUBLESK VE
AISİ 316L ÖSTENİTİK PASLANMAZ
ÇELİK LEVHALARIN İÇYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammed Mustafa ARSLAN

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

AĞUSTOS 2023

Muhammed Mustafa ARSLAN tarafından hazırlanan “GAZ TUNGSTEN ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE FARKLI AKIM DEĞERLERİNDE BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI AISI 318 LN DUBLEKS VE AISI 316L ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİK LEVHALARIN İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Gürel ÇAM
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Doç. Dr. Ahmet ÇAKAN
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Erdoğan KANCA
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 15/08/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

Muhammed Mustafa ARSLAN

15/08/2023

GAZ TUNGSTEN ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE FARKLI AKIM DEĞERLERİNDE
BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI AISI 318LN DUBLEKS VE AISI 316L ÖSTENİTİK PASLANMAZ
ÇELİK LEVHALARIN İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed Mustafa ARSLAN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2023

ÖZET

Östenitik paslanmaz çelikler kriyojenik sıcaklıklar dahil tüm sıcaklıklarda iyi şekil verilebilme, iyi mekanik özellikler ve korozyon direnci gibi oldukça iyi özelliklere sergiler. Paslanmaz çelikler arasında en fazla tüketilen tür östenitik çeliklerdir. Dupleks paslanmaz çelikler tüm paslanmaz çelik türleri arasında en iyi korozyon direncine sahip olan türdür. Ancak, buna karşın maliyetleri diğer paslanmaz çeliklere nazaran daha yüksektir. Bu yüzden de korozyon riskinin yüksek olduğu alanlarda daha yaygın kullanılmaktadır. Her iki çeliğin de en yaygın kullanıldığı alan petrokimya endüstrisidir. Kaynak, bu uygulamalarda vazgeçilmez bir imalat yöntemidir.

Bu çalışmanın amacı, üç farklı ısı girdisi ile AISI 316L-AISI 316 östenitik ve AISI 318LN-AISI 318LN dupleks çelik levhaların (kalınlık: 3mm) ve aynı kalınlıktaki bu iki farklı çeliğin iki farklı ilave tel kullanılarak gaz tungsten ark kaynağı birleştirilmesidir. Ayrıca benzer kaynaklardaki ısı girdisinin ve farklı levhaların kaynağındaki ilave telin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bağlantıların kaynak bölgesindeki içyapıları detaylı optik mikroskop çalışmaları ile incelenmiş, mekanik özellikleri de mikrosertlik ölçümleri, çekme ve bükme deneyleri ile belirlenmiştir. AISI 316L-AISI 316L ve AISI 316L-AISI 318LN levhaların kaynağında düşük ısı girdisi iyi sonuç verirken, benzer AISI 318LN-AISI 318LN levhaların kaynağında düşük ısı girdisinin hızlı soğumaya neden olması sonucu kaynak içyapısı ve performansına olumsuz etkisi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Paslanmaz çelik, AISI 316L, ark kaynağı, ısı girdisi, kaynak performansı
Sayfa Adedi : 68
Danışman : Prof. Dr. Gürel ÇAM

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AISI 318LN DUPLEX AND AISI 316L AUSTENITIC STAINLESS STEELS JOINED BY GAS TUNGSTEN ARC WELDING METHOD AT DIRRENT CURRENT LEVELS

(M. Sc. Thesis)

Muhammed Mustafa ARSLAN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

AUGUST 2023

ABSTRACT

Austenitic stainless steels have very good properties such as formability even at cryogenic temperatures, good mechanical properties, and corrosion resistance. They are the most consumed austenitic steels among all stainless steels. Duplex stainless steels are the type with the best corrosion resistance among all types of stainless steel. However, their cost is higher than those of other stainless steels. Therefore, it is more widely used in areas where the risk of corrosion is high. The most common use of both steels is in the petrochemical industry. Welding is an indispensable fabrication method in these applications.

The aim of this study is to join AISI 316L-AISI 316 austenitic and AISI 318LN-AISI 318LN duplex steel plates (thickness: 3mm) with three different heat inputs and these two different steels of the same thickness by using two different additional wires by gas tungsten arc welding. In addition, the effect of heat input in similar welds and additional wire in welding of different plates on microstructure and mechanical properties is investigated. The microstructural and mechanical properties of the joints were investigated by detailed optical microscope studies, microhardness measurements, and tensile and bending tests. It has been determined that while low heat input gives good results in the welding of AISI 316L-AISI 316L and AISI 316L-AISI 318LN plates, it causes rapid cooling in the welding of similar AISI 318LN-AISI 318LN plates, thus, in turn, has a negative effect on the weld microstructure and performance.

Keywords : Stainless steel, AISI 316L, arc welding, heat input, weld performance
Number of Pages : 68
Supervisor : Prof. Dr. Gürel ÇAM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Gürel Çam'a teşekkür ederim. Ayrıca, tez kapsamındaki içyapı incelemeleri, mikrosertlik ölçümleri ve çekme deneylerin yapılması ve yorumlanması konularındaki desteklerinden dolayı Dr. Öğretim Üyesi H. Tarık SERİNDAG'a ve NOKSEL Çelik Boru Sanayi A.Ő., İskenderun'dan, Sayın Tuğrul YAZGAN (Kalite ve Mekanik Laboratuvar Sorumlusu) ile Mekanik Laboratuvar çalışanları Sayın Erhan Zeytun ve Ferhat Gürler'e de şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
2.1. Paslanmaz Çeliğin Tarihçesi ve Kullanım Alanları.....	6
2.2. Paslanmaz Çelik Türleri	7
2.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler	7
2.2.2. Östenitik paslanmaz çelikler	8
2.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler	12
2.2.4. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler	12
2.2.5. Dupleks paslanmaz çelikler	13
2.3. Gaz Tungsten Ark Kaynağı	16
3. MATERYAL VE METOT	17
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	28
4.1. İy yapı Özellikleri	28
4.2. Mekanik Özellikler	37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
5.1. Sonuçlar.....	55

	Sayfa
5.2. Öneriler	59
KAYNAKLAR	60
DİZİN	67



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Malzemelerin kalite derecelendirilmesi	2
Çizelge 3.1. Östenitik 316L ve dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi.....	17
Çizelge 3.2. Çalışmada kaynak için kullanılan ilave tellerin kimyasal bileşimi	17
Çizelge 3.3. Benzer AISI 316L-AISI 316L ve SAF 2205-SAF 2205 bağlantılarda kullanılan kaynak parametreleri	20
Çizelge 3.4. Farklı AISI 316L-SAF 2205 kaynak denemelerinde kullanılan kaynak parametreleri.....	21
Çizelge 4.1. AISI 316L BM ve kaynaklı bağlantı numuneleri için çekme deneyi sonuçları.....	41
Çizelge 4.2. AISI 318LN BM ve kaynaklı bağlantı numuneleri için çekme deneyi sonuçları	42
Çizelge 4.3. Farklı 316L-318LN bağlantıların AISI 316L baz levhaya göre süneklik ve mukavemet performans değerleri.....	42
Çizelge 4.4. Farklı 316L-318LN bağlantıların AISI 318LN baz levhaya göre süneklik ve mukavemet performans değerleri.....	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin içyapısını gösteren mikro resimler: (a) optik mikroskop ve (b) SEM görüntüsü.....	9
Şekil 2.2. Cr-Ni çelikleri için Schaeffler diyagramı	11
Şekil 2.3. Dupleks paslanmaz çeliklerin çift fazlı yapısı	13
Şekil 2.4. Gaz tungsten ark kaynağı yönteminin şematik gösterimi	16
Şekil 3.1. Çalışmada kaynak için kullanılan levhaların CNC kesim planı.....	18
Şekil 3.2. Plakaların kaynak denemeleri için hazırlanması (h=1 mm; levhalar arası mesafe: 2 mm).....	19
Şekil 3.3. Levhaların kaç amperde ve hangi ilave tel ile kaynak edileceğini gösteren şema.....	21
Şekil 3.4. Kaynak denemelerinde kullanılan seramik altlık	21
Şekil 3.5. 130 amper akım ile üretilen kaynaklı bağlantılara bir örnek: 2205-2205	22
Şekil 3.6. Kaynaklı levhalardan test numunelerinin kesme planı.	22
Şekil 3.7. Soğuk kalıba alınmış numune	23
Şekil 3.8. Mikrosertlik ölçümlerinin uygulandığı noktaları gösteren makro resim.....	23
Şekil 3.9. AISI 316L baz plakadan çıkarılan çekme testi numuneleri	24
Şekil 3.10. Düşük ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri.....	24
Şekil 3.11. Orta ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri	25
Şekil 3.12. Yüksek ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri.....	25
Şekil 3.13. AISI 318LN baz plakadan çıkarılan çekme testi numuneleri	25
Şekil 3.14. Düşük ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 318L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri.....	26
Şekil 3.15. Orta ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri.....	26

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Yüksek ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri.....	26
Şekil 3.17. ER2209 ilave teli kullanılarak GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L -AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri ...	26
Şekil 3.18. ER309L ilave teli kullanılarak GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L -AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri ...	27
Şekil 4.1. AISI 316L baz levhanın mikroyapısı: (a) 200X büyütme ve (b) 500X büyütme	29
Şekil 4.2. SAF 2205 baz levhanın mikroyapısı: (a) 200X büyütme ve (b) 500X büyütme	29
Şekil 4.3. Kaynak kesitini gösteren makro resimler: (a) AISI 316L-AISI 316L, (b) AISI 318LN-AISI 318LN ve (c) AISI 316L- AISI 318LN bağlantı	30
Şekil 4.4. Düşük ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme	30
Şekil 4.5. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme	30
Şekil 4.6. Düşük ısı girdili AISI 318LN bağlantının kaynak dikişi içyapısı: (a) 10X ve (b) 20X	31
Şekil 4.7. Orta ısı girdili AISI 318LN bağlantının kaynak dikişi içyapısı: (a) 10X ve (b) 20X	32
Şekil 4.8. Yüksek ısı girdili AISI 318LN bağlantının kaynak dikişi içyapısı: (a) 10X ve (b) 20X	32
Şekil 4.9. ER 2209 ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X.....	33
Şekil 4.10. ER 309L ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X	33
Şekil 4.11. Düşük ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme	34
Şekil 4.12. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme	34
Şekil 4.13. Düşük ısı girdisi ile elde edilen AISI 318LN bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Orta ısı girdisi ile elde edilen AISI 318LN bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütmeye	35
Şekil 4.15. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 318LN bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütmeye	36
Şekil 4.16. ER 2209 ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının IEB içyapıları: (a) kaynak dikişinin dubleks baz levha tarafındaki IEB ve (b) östenitik baz levha tarafındaki IEB (10X büyütmeye).....	36
Şekil 4.17. ER 309L ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının IEB içyapıları: (a) kaynak dikişinin dubleks baz levha tarafındaki IEB ve (b) östenitik baz levha tarafındaki IEB (10X büyütmeye).....	36
Şekil 4.18. Benzer 316L-316L bağlantılarında kaynak kesitindeki sertlik değişimini gösteren sertlik profilleri: (a) düşük, (b) orta ve (c) yüksek ısı girdili bağlantı.....	39
Şekil 4.19. Benzer 318LN-316LN bağlantılarda kaynak kesitindeki sertlik değişimini gösteren sertlik profilleri: (a) düşük, (b) orta ve (c) yüksek ısı girdili bağlantı.....	40
Şekil 4.20. Farklı 316L-318LN kaynaklı bağlantılarda kaynak kesitindeki sertlik değişimini gösteren sertlik profilleri: (a) ER2209 ve (b) ER309L ilave tel	40
Şekil 4.21. AISI 316L gerilme-%uzama eğrileri	43
Şekil 4.22. Düşük ısı girdili 316L-316L bağlantının gerilme-%uzama eğrileri	44
Şekil 4.23 Orta ısı girdili 316L-316L bağlantının gerilme-%uzama eğrileri	44
Şekil 4.24. Yüksek ısı girdili 316L-316L bağlantının gerilme-%uzama eğrileri	45
Şekil 4.25. AISI 318LN ana metalin gerilme-%uzama eğrileri.....	45
Şekil 4.26. Düşük ısı girdili 318LN-318LN bağlantının gerilme-%uzama eğrileri	46
Şekil 4.27. Orta ısı girdili 318LN-318LN bağlantının gerilme-%uzama eğrileri.....	46
Şekil 4.28. Yüksek ısı girdili 318LN-318LN bağlantının gerilme-%uzama eğrileri.....	47
Şekil 4.29. ER2209 ilave tel ile üretilen farklı 316L-318LN bağlantının gerilme-%uzama eğrileri	47
Şekil 4.30. ER309L ilave tel ile üretilen farklı 316L-318LN bağlantının gerilme-%uzama eğrileri	48

Şekil	Sayfa
Şekil 4.31. AISI 316L BM çekme numunelerinin test sonrası görünümü	48
Şekil 4.32. Düşük ısı girdili 316L-316L bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	48
Şekil 4.33. Orta ısı girdili 316L-316L bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	49
Şekil 4.34. Yüksek ısı girdili 316L-316L bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	49
Şekil 4.35. AISI 318LN BM çekme numunelerinin test sonrası görünümü	49
Şekil 4.36. Düşük ısı girdili 318LN-318LN bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	50
Şekil 4.37. Orta ısı girdili 318LN-318LN bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	50
Şekil 4.38. Yüksek ısı girdili 318LN-318LN bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri.....	50
Şekil 4.39. ER2209 ilave tel ile birleştirilen farklı 316L-318LN bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	51
Şekil 4.40. ER309L ilave tel ile birleştirilen farklı 316L-318LN bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Ar	Argon
C	Karbon
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
He	Helyum
HCl	Hidroklorik asit
HNO₃	Nitrik asit
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Azot
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
P	Fosfor
S	Kükürt
Si	Silisyum
W	Tungsten

Kısaltmalar**A****AISI****AWS****CNC****EDS****EN****GMAK****GTAK****HV****IEB****ISO****MAG****MIG****MPa****ÖMAK****SAF****SEM****TIG****V****XRD****Açıklamalar**

Amper

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü

Amerikan Kaynak Derneği

Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol

Enerji Dağılım Spektrokopisi

European Norm (Avrupa Standardı)

Gaz Metal Ark Kaynağı

Gaz Tungsten Ark Kaynağı

Hardness Vickers (Vicker Sertlik Değeri)

Isıdan etkilenmiş Bölge

International Organization for Standardization

Metal Aktif Gaz

Metal İnert Gaz

Mega Pascal

Örtülü Metal Ark Kaynağı

Sandvik Östenit Ferrit

Taramalı Elektron Mikroskopi

Tungsten İnert Gaz

Voltage (Gerilim)

X-ray Diffraction (X-ışını Difraksiyonu)

1. GİRİŞ

İlerleyen zamanla birlikte çelik kullanımı insanların gereksinimleri neticesinde değişimler göstermiştir. Bu sebepten dolayı paslanmaz çeliklere olan ihtiyaç oldukça artmıştır. Alaşımli bir çelik olan paslanmaz çelikler bünyesindeki krom, nikel ve diğer alaşım elementleri miktarlarına göre yapısal değişiklikler gösterir. Yapıdaki bu değişiklikler ise paslanmaz çeliklerin nerelerde kullanılacağını tayin eder. Birçok endüstriyel alanda kullanılmakta olan paslanmaz çelikler içerisindeki krom elementi sebebiyle korozyon ve paslanmaya karşı gösterdiği yüksek direnci sayesinde günlük hayatımızdaki uygulamalarımızda sıklıkla kullanılmaya başlanılmıştır. Kısa sürede bazı endüstrilerde vazgeçilmeyen bir malzeme olmuştur. Bu çelik grubu, sıklıkla kimya ve güç üretim mühendisliğinde, gıda endüstrisinde, tıbbi cihazlar ve aletlerin imalinde, petrokimya tesislerinde, tekstil alanlarında, taşımacılıkta, yüksek veya kriyojenik sıcaklık uygulamalarında ve mimarlık gibi alanlarda kullanılmaktadır (Taban ve ark., 2007).

Korozyon dayanımı oldukça iyi olan dubleks paslanmaz çelikler AISI 304 ve AISI 316 kalitesindeki paslanmaz çeliklere kıyasla paslanmaya karşı daha yüksek bir direnç gösterirler. Bu kalitedeki çelikler, ferritik paslanmaz çeliklere nazaran daha yüksek mukavemetlidir ayrıca korozyona karşı gösterdiği direnç daha yüksektir. Östenitik malzemelere nazaran kopmaya karşı gösterdiği direnç daha fazladır. Korozyon dayanımı ve mekanik dayanım açısından iyi olmaları nedeniyle çoğunlukla tercih edilirler. AISI 316L ve AISI 318LN paslanmaz çelik malzemelerin kalite derecelendirilmesi Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir (Birçelik Paslanmaz Çelik, 2022).

Düşük karbonlu bir paslanmaz kalitesi olan AISI 316L (1.4404) kalite paslanmaz çeliklerin kullanımı oldukça yaygındır. 316L kalite paslanmaz çelikler, 304 kalite paslanmaz çeliklere göre daha fazla miktarda Mo ve Ni içerirler aynı zamanda daha düşük C içeriğine sahiptir. Bu çelikler barındırdığı kimyasal içerik nedeniyle korozyon dayanımı sert koşullu ortamlarda dahi çok iyidir. Kaynak ile birleştirme yapılacak kısımlarda kaynak bölgesindeki ısınmanın etkisinden dolayı korozyon riskiyle karşı karşıya kalmamak için 316 kalite paslanmaz yerine daha düşük karbon içerikli olan 316L kalite çelik kullanılmaktadır. Bu çelikler 316 kalite paslanmaz çeliğe göre daha düşük miktarda karbon içerdikleri için 316L paslanmaz çelikler kalın kesitlerde de kaynak işlemini takiben tavlama gerektirmez (Birçelik Paslanmaz Çelik, 2022).

Çizelge 1.1. Malzemelerin kalite derecelendirilmesi (Birçelik Paslanmaz Çelik, 2022).

	Korozyon Dayanımı	Mekanik özellikler	Dövülebilme yatkınlığı	Kaynak yapılabilirlik	İşlenebilirlik
AISI 304	★★★	★★	★★★	★★★★★	★★
AISI 316	★★★★	★★	★★★	★★★★★	★★
AISI 316L	★★★★	★★	★★★	★★★★★	★★
AISI 318LN	★★★★★	★★★★★	★	★	★

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı konusunda yürütülen çalışmalara bir bakılırsa; (Kükürtçü, 2014) iyi korozyon direnci ve üstün biçimlendirilme kabiliyeti bakımından en çok tercih edilen AISI 304L, AISI 316Ti, AISI 310S ve AISI321 kalite östenitik paslanmaz çelikleri aynı parametreler kullanılarak TIG kaynağı diye de adlandırılan gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) yöntemi ile birleştirilmiş ve çeşitli testler yapılmıştır. Burada en yüksek çekme dayanımının AISI 304L malzemesinde olduğu görülmüştür. Yapılan çekme testleri sonucunda bütün malzemeler ısıdan etkilenmiş bölgeden (IEB) kopmuştur. Kaynaklı numunelerin tamamı ana metalden daha yüksek çekme dayanımı sergilemiştir. Tüm malzemelerde % uzama oranları kaynak işlemi sonrasında azalmıştır ve sünekliklerinde düşüşler meydana gelmiştir. En yüksek eğme mukavemeti ise AISI 304L malzemesinde gözlemlenmiştir. Sertlik deneyi sonucunda tüm malzemelerde ana metalden kaynak metaline doğru sertliğin arttığı görülmüştür. En yüksek ana metal ve kaynak bölgesi sertliğe sahip malzemenin AISI 310S olduğu tespit edilmiştir (Kükürtçü, 2014).

Östenitik AISI 316L paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri konusunda yürütülen bir başka çalışmada, 10 mm kalınlığındaki AISI316L levhalar 2,4 mm çapında ER316L ilave tel kullanılarak altı pasoda GTAK yöntemiyle alın kaynağı yapılmış ve kaynak dikişinde oluşan içyapı incelenmiş hem de kaynak performansı belirlenmiştir (Serindağ ve Çam, 2022a). Kaynak dikişinde heterojen bir dendritik yapı oluştuğu ve kaynaklı bağlantının baz levha mukavemetinden daha yüksek mukavemet gösterdiği (mukavemet performansı = % 104) rapor edilmiştir (Serindağ ve Çam, 2022a).

Bir başka çalışmada 1.2 mm çapında ER308LSi ilave tel ve farklı ısı girdileri kullanılarak 5 mm kalınlığındaki AISI 304L östenitik paslanmaz çelik levhalar GMAK yöntemi ile birleştirilmiş ve bunun sonucunda ise ısı girdisinin kaynak bölgesindeki iç yapı oluşumuna ve kaynak performansına etkileri incelenmiştir (Ezer ve Çam, 2022). Yüksek ısı girdisi ısıdan etkilenmiş bölgede (IEB'de) yeniden kristalleşme sonucunda kaba taneli bir yapı oluşumuna neden olurken, düşük ısı girdisinin IEB'de orijinal içyapıda bir değişime yol açmadığı ve bunun neticesinde belirgin bir IEB oluşmadığı gözlenmiştir (Ezer ve Çam, 2022).

Diğer bir çalışmada, 60/90 amper, 65/100 amper, 70/100 amper ısı girdileri ile 2 mm çapında 308L ilave metali ve iki farklı koruma gazı (%100 argon ve karışım 212 koruyucu gazı) kullanılarak GTAK yöntemi ile 3 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik levhaları kaynaklamıştır (Kahraman ve ark., 2021). Bu çalışmada iki farklı koruyucu gaz kullanımının elde edilen birleştirmelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birleştirilmiş bağlantılar için çekme testi uygulanmış, makro yapı ve mikro yapı özellikleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesi ve ana metalden olmak üzere 10 farklı noktadan mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Sonuç olarak koruyucu gazdaki değişimin kaynaklı paslanmaz çelik malzemelerde çekme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özellikler üzerinde önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda en yüksek çekme mukavemeti değeri (58.7 kg/mm^2) ve en yüksek sertlik değeri (222,5 HV) %100 argon gazı kullanıldığında elde edilmiştir. İki koruyucu gaz için de benzer mikro yapı özellikleri görülmüştür (Kahraman ve ark., 2021).

Bir başka çalışmada, 3 mm ve eş kalınlığa sahip olan AISI 304 ve AISI 430 kalite paslanmaz çelik levhalar TIG kaynağı olarak da adlandırılan gaz tunsten ark kaynağı (GTAK), GMAK ve örtülü metal ark kaynak (ÖMAK) yöntemleri ile kaynaklanan malzemelerin çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, mikro sertlik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir (Kaya, 2010). Yapılan çentik darbe testlerinde, GTAK ve GMAK kaynağı ile kaynaklanmış bağlantıların çentik darbe kırılma enerjileri, ÖMAK ile kaynaklanmış bağlantılardan yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çekme testlerinin sonucunda ise bütün numunelerde kopma ferritik paslanmaz çelik ana plaka tarafındaki kaynak metaline komşu IEB'de gerçekleşmiştir. Bağlantılarda en yüksek çekme dayanımı GTAK kaynağı ile birleştirilmiş numunelerden elde edilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde ise AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin IEB bölgesinde bariz bir tane irileşmesinin ortaya

çıkıldığı tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri tüm kaynak yöntemlerinde AISI 430 ferritik ana metal tarafında kaynak metaline komşu IEB’de ölçülmüştür (Kaya, 2010).

Benzer bir başka çalışmada, 3 mm kalınlıktaki AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik levha ile eş kalınlıktaki AISI 304L östenitik paslanmaz çelik levha GTAK kaynak yöntemiyle 3 farklı dolgu teli (ER312, ER316L ve ER2209) kullanılarak saf argon koruyucu gazı altında birleştirilmiştir (Murat ve Başığit, 2021). Numunelerin tamamının radyografik muayene ile kaynak süreksizliği olup olmadığı kontrol edilmiştir. ER2209 ve ER312 TIG teli ile yapılan birleştirmelere nazaran, birleştirilmesi 3165TIG teli ile yapılan numunelerde düşük gevrek karbür varlığına bağlı olarak en düşük oranda süreksizlik gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi ise dolgu metalinin en düşük Cr ve en yüksek Ni içeriğine sahip olma özelliğidir (Murat ve Başığit, 2021).

Östenitik paslanmaz çeliklerin farklı çelikler ile birleştirilmesi konusunda yürütülen güncel bir çalışmada ise, 10 mm kalınlığındaki AISI 316L östenitik çelik aynı kalınlıktaki 9Ni düşük alaşımlı kriyojenik çelik levhalar ile 2,4 mm çapında ERNiCrMo-3 Ni-esaslı bir ilave tel kullanılarak GTAK yöntemiyle altı pasoda alın altına kaynaklanmıştır (Serindağ ve Çam, 2023). Tüm kaynaklı bağlantı çekme numuneleri kaynak dikişinden uzakta daha düşük mukavemetli AISI 316L baz levha içerisinden kırıldığı ve kaynaklı levhanın AISI 316L baz levha mukavemetinden daha yüksek mukavemet gösterdiği rapor edilmiştir.

Bir başka çalışmada ise, endüstride eczacılık, gemicilik, gıda, kimya ve petrokimya alanlarında çoğunlukla kullanılan dubleks ve östenitik çelik çiftinin birleştirilmesinde kaynak yöntemi ve dolgu teli seçiminin birleştirmenin mekanik davranışına ve içyapısına etkileri incelenmiştir (Ertek Emre ve ark., 2017). AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik ve AISI 316L östenitik paslanmaz çelik levhalar “V” kaynak ağzı açılarak GMAK yöntemi kullanılarak TETRA V 316L-G ve TETRA S 22 9 3L-G flaks özlü tel ile kaynaklanmıştır. Aynı malzeme çifti örtülü metal ark kaynak (ÖMAK) yöntemi kullanılarak iki farklı elektrot (E308L-16 ve E2209-17) ile de uygun standartlarda kaynaklanmıştır. Birleştirme işlemi sonrasında numunelere çekme testi uygulanmış daha sonrasında kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Kaynaklı birleştirmenin içyapıları incelenmiş ve IEB genişlikleri ölçülmüştür. Kaynak yöntemi ve dolgu teli türüne göre tespit edilen sonuçlar mukayese edilmiştir. Dubleks çelik elektrot ve özlü kaynak teli ile birleştirilen bağlantıların her iki kaynak yönteminde yüzde uzaması, akma ve çekme dayanımı, sertliği, birleştirilmiş olan

östenitik paslanmaz çelik numunelerine göre daha yüksek bulunmuştur. Akma ve çekme dayanımının östenit fazından kaynaklandığı, şekillendirilebilirliğinin ise ferrit fazından kaynaklandığı duplex paslanmaz çelikler için bilinmektedir. Çekme testi sonucunda numunelerde oluşan kopmalar düşük mukevemetli östenitik paslanmaz çelik tarafındaki IEB'de gerçekleşmiştir. Ayrıca kaynaklı numunelerin akma, çekme ve sertlik değerleri GMAK yönteminde ÖMAK yöntemine göre daha yüksek bulunmuştur (Ertek Emre ve ark., 2017).



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde daha önce yapılmış çalışmalar paslanmaz çeliğin tarihsel gelişimi ve uygulama alanları ile paslanmaz çeliklerin türleri konusunda olmak üzere iki ayrı bölüm şeklinde tartışılacaktır.

2.1. Paslanmaz Çeliğin Tarihçesi ve Kullanım Alanları

Yüksek alaşımlı çelikler yapısında Fe-Cr, Fe-Cr-C, Fe-Cr-Ni bulundurması durumunda paslanmaz çelikler olarak adlandırılırlar. Çeliği paslanmaz olarak nitelendirebilmek için yapısında minimum %10,5 Cr elementi içermesi gerekir. İçerisinde barındırdığı Cr ve O elementinin ilişkisi nedeniyle çeliğin tüm yüzeyinde krom oksit tabakası oluşur ve bu sayede atmosferdeki zararlı elementlerin iç kısımlara ulaşması engellenmiş olur. Böylelikle de malzeme paslanmazlık (korozyon direnci) özelliği sağlanır. Ayrıca bu çelikler yüksek sıcaklıklara olan dayanımının yanında iyi bir oksidasyon direncine de sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle birçok çeşitli sektörde kullanılmaktadır (Lippold ve Kotecki, 2005; Çam, 2020).

Krom elementinin keşfiyle paslanmaz çeliğin ortaya çıkması hız kazanmıştır. 1797 yılında Fransız kimyager Louis Nicholas Vauquelin Sibiryaya yakınlarında krom oksit cevherini keşfetmiştir. 1 yıl sonra ise dünyanın ilk Cr metal parçasını Fransız Akademisi'nde sergilemiş ve takiben Cr elementi paslanmaz çeliklerin temel elementi olmuştur. 1821 yılında ise Fransız Pierre Berthier yüksek miktarda Cr ve Fe'den elde ettiği alaşım sayesinde ferrokrom malzeme keşfedilmiştir. Böylelikle şu an kullanılmakta olan paslanmaz çeliklerin temelleri atılmıştır. Metalurji profesörü olan Leon Guillet ise 1904'lü yılların başında martenzitik ve ferritik paslanmaz çelikleri keşfetmiştir (Cobb, 2010).

İlerleyen zamanlarda sertleştirilebilir martenzitik çelikler AISI 410, 420 ve 440C gösterimleriyle, sertleştirilemeyen ferritik çelikler ise AISI 442 ve 446 kodları ile tanımlanmışlardır. 1908 yılında Philip Monnartz'ın C miktarının yüksek Cr'lu çeliklerde korozyon direncine etkisini inceleyen çalışmasında paslanmaz çeliklerdeki korozyon direnci keşfedilmiştir (Cobb, 2010).

1900-1915 yılları arasında korozyona dirençli alaşımlar yönündeki çalışmalarda artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca İngiltere'nin Sheffield kentindeki Thomas Firth and Sons firmasında metalurjist olarak çalışan Harry Brearly tarafından ticari paslanmaz çelik alaşımları ilk defa rapor edilmiştir. Goldschmidt, 1897 yılında Almanya'da düşük C'lu Cr alaşımlarının üretilmesine yönelik bir teknik geliştirmiş ve bu ilgi daha da artmıştır.

Sonrasında 1904 ve 1909 yıllarında %13 Cr'lu martenzitik ile %17 Cr'lu ferritik çelikler hakkında Guillet, Portevin ve Giesen yapmış oldukları araştırmaları içeren makaleler yayımlamışlardır. Guillet ise 1909 yılında östenitik paslanmaz çelikleri işaret eden Cr-Ni çelikleri hakkında bir makale yayımlamıştır. 1899 yılında Heroult sayesinde Elektrik ertirme fırınlarının geliştirilmesi de paslanmaz çeliklerin yaygın biçimde üretimine olanak sağlamıştır (Taban ve ark., 2007; Lippold ve Kotecki, 2005).

Paslanmazlık, yüksek mukavemet, şekillendirilebilme, oksidasyona karşı direnç, kriyojenik ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanım ve kararlı yapıları gibi özellikleriyle paslanmaz çelikler çoğu endüstride tercih edilen malzeme haline gelmiştir (Erkkila, 2004).

2.2. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çelikler beş ana sınıfa ayrılmaktadır (AWS, 1994). Bu sınıflar:

- Ferritik Paslanmaz Çelikler
- Östenitik Paslanmaz Çelikler
- Martenzitik Paslanmaz Çelikler
- Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler
- Dupleks Paslanmaz Çeliklerdir.

2.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, içeriğinde %11,5-30,5 arasında Cr, %0.20'ye kadar karbon (C) ve düşük miktarda Al, Nb, Ti ve Mo gibi ferrit stabilize edici elementleri barındırırlar ve yapıları tüm sıcaklıklarda ferritiktir. Östenit fazı oluşturmaz ve ısıl işleme sertleştirilemezler bunun nedeni ise bünyesinde bulunan karbon miktarının az olmasıdır.

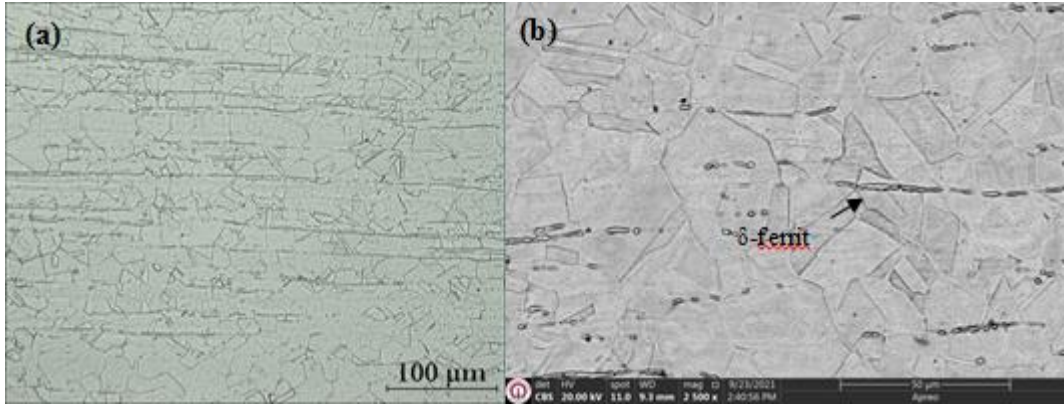
En çok bilinen ferritik paslanmaz çeliklerin başında ise AISI 405, 409, 430, 442 ve 446 gelmektedir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin ergitme kaynak yöntemlerinde ısıdan etkilenmiş bölgede (IEB) oluşan tane büyümesinin kaynak dikişinde tokluk düşüşüne neden olması en karakteristik özelliğidir. Örneğin, Şenol ve Çam (2023) yürüttükleri bir çalışmada GMAK kaynak yöntemi ve 1,2 mm çapındaki ER307 ilave tel kullanarak 5 mm kalınlığındaki AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelikleri birleştirmişler ve ısı girdisinin IEB' deki içyapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada açıkça artan ısı girdisi ile IEB genişliği artmış ayrıca IEB' de daha kaba taneli bir yapı oluşmuştur. Bunun yanı sıra tane sınırı ve taneler içi martenzit oluşumuna da yol açtığı bildirilmiştir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin bileşimine tane büyümesini önleme amacıyla azot ilavesi yapılır. Kaynak metalinin katılaşması sonucunda elektroda eklenmiş olan azot ince taneli olmasına sebebiyet verir. Paslanmaz çeliklerin birleştirmelerinde bu şekilde uygulanacak kaynak yönteminde IEB'de 1150 °C üzerindeki tüm sıcaklıklarda oldukça az kalmalıdır bu yüzden kaynak işlemi çok kısa pasolarda yapılmalı ve hemen soğutulmalıdır (AWS, 1994). Bu çeliklerin birleştirme işlemlerinde kullanılacak olan dolgu metali ve kaynak edilecek malzemenin Cr miktarlarının aynı veya yakın olması bizim için yararlı olacaktır. Farklı metallerin birleştirilmesinde özellikle AISI 309 ve 312 östenitik türü dolgu teli kullanılır. Yüksek alaşımlı ferritik paslanmaz çelikler genelde ilave tel kullanılmadan (otojen) TIG kaynak yöntemi ile birleştirilerek sadece levha ve boru şeklinde üretilir (Gerken ve Kotecki, 1990).

2.2.2. Östenitik paslanmaz çelikler

Bünyelerinde %12-25 Cr ve %8-25 Ni , %20'ye kadar mangan gibi temel östenit oluşturucuları barındıran çelikler östenitik paslanmaz çelik olarak adlandırılır. İçyapılarına tamamen östenitiktir ya da içerisinde çok az miktarda delta ferrit barındıran östenit olacak şekilde tasarlanırlar. Şekil 2.1'de, bu çalışmada kullanılmakta olan AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin içyapısı verilmektedir (Serindağ ve Çam, 2022a; Serindağ ve Çam, 2022b).



Şekil 2.1. AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin içyapısını gösteren mikro resimler:

(a) optik mikroskop ve (b) SEM görüntüsü (Serindağ ve Çam, 2022a).

Östenitik çelikler uygulama alanı ve alaşım kalitesinin fazlalığı bakımından en zengin gruptur. Oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar tüm sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik (ymk) kafese sahip olup, östenitik içyapılarını korumaları sayesinde ısıl işleme sertleştirilemezler. Düşük sıcaklıklarda bile süneklik, tokluk ve şekillendirilebilme özellikleri çok iyi olmasının yanı sıra manyetik özelliği göstermezler ve mukavemetleri sadece soğuk şekillendirme ile artar (Erdoğan, 2000). Bu çelikler karbon çeliklerinden daha yüksek termal genleşme katsayısı ve elektrik direnci sergilerken daha düşük ergime noktasına ve ısıl iletkenlik katsayısına sahiptirler (Woollin, 1994; Wang ve ark., 2005). Ayrıca bu paslanmaz çelikler oksitleyici ya da redükleyici ortamlarda iyi bir korozyon direnci özelliği gösterirler. Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon direncini arttırmak için; kromun ferrit yapma etkisini gidermek amaçlı östenit fazını stabilize eden alaşım elementleri takviyesi yapılır (Castner, 1992).

Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları

Bu çelikler martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklere kıyasla yüksek korozyon direncine sahiptir. Ferritik çeliklerde karşılaştığımız süneklikten gevrekliğe geçiş sıcaklığı altındaki gevrekleşme sorunu, içyapının östenit olmasından dolayı östenitik paslanmaz çeliklerde görülmez. Yüksek veya sıfır altı (-270°C'ye kadar) sıcaklıklarda korozyon dirençleri, mekanik özelliklerindeki üstünlük sayesinde çoğu alanda tercih edilen bir yapı çeliği olmuştur (Kaluç ve Tülbentçi, 1998).

AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik iyi şekillendirilebilirlik, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımı özellikleri sayesinde en yaygın kullanılan paslanmaz çeliktir. Kontrollü ortamlarda noktasal korozyona dayanım sağlamak amacıyla 304 kalite çeliklere Mo ilavesiyle 316-317 kaliteleri üretilir. Ayrıca 304 kalite paslanmaz çeliğinin kaynak esnasında IEB’de taneler arası korozyona neden olan karbür çökmesinin önüne geçmek için de çok düşük C içerikli 304L kalite paslanmaz çelik geliştirilmiştir. Yüksek alaşımlarda ve oksitleyici ortamlarda ise 309 ve 310 kaliteleri gibi yüksek krom içeren alaşımlar kullanılır (Aran ve Temel, 2003).

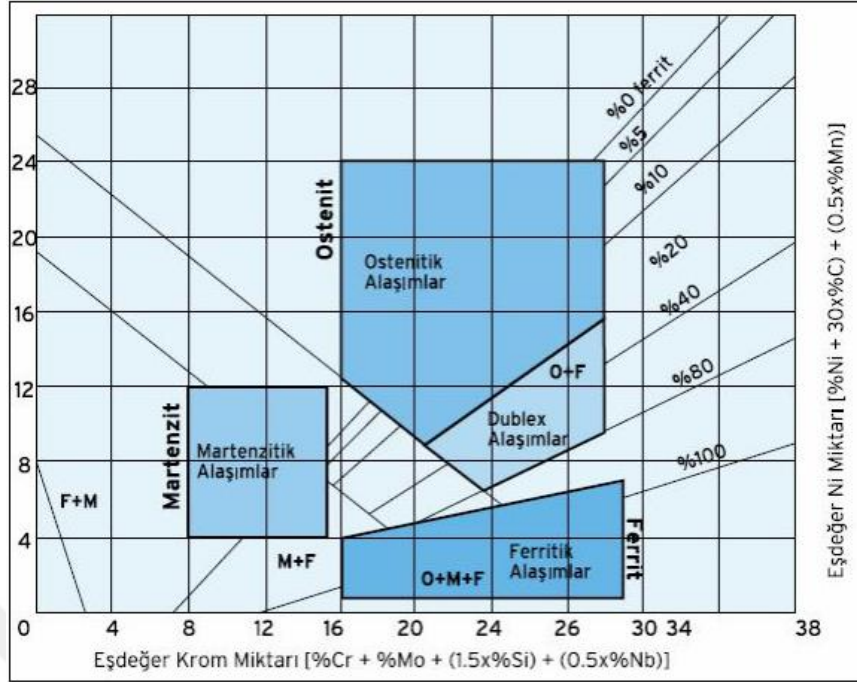
Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti

Östenitik paslanmaz çelikler, ilave edilen alaşım elementlerine göre iki gruba ayrılır. İlk grup Östenit fazı oluşumunu teşvik eden alaşım elementleri diğer grup ise ferrit fazının oluşumunu destekleyen alaşım elementleridir. Ni, C, Mn ve N alaşım elementleri ana östenit fazını stabilize ederken Cr, Si, Nb ve Mo elementleri ferrit fazını kararlı hale getirir. İyapıda tamamıyla östenitik veya çok az delta ferrit içeren bir yapıyı oluşturmak için bu elementlerin alaşımın kimyasal kompozisyonundaki oranları ayarlanabilir. 1949 yılında Anton Schaeffler bahsedilen elementlere bağlı olarak paslanmaz çeliklerin iyapısında fazların oranlarını gösteren bir diyagram geliştirmiştir. Bu diyagram Schaeffler diyagramı olarak bilinmektedir. Şekil 2.2’de Schaeffler diyagramı verilmiştir. Schaeffler diyagramından yararlanılarak östenitik paslanmaz çeliklerin ergime bölgesindeki iyapısı belirlenebilir. Bu diyagram kullanılarak paslanmaz çeliğin ve kullanılmış ise ilave telin kimyasal kompozisyonundan aşağıda sunulan eşitlikler kullanılarak Nikel eş değeri ($Ni_{eş}$) ve Krom eş değeri ($Cr_{eş}$) hesaplanabilir:

$$(Cr)_{eş} = \% Cr + \% Mo + 1.5 (\% Si) + 0.5 (\% Nb) \quad (2.1)$$

$$(Ni)_{eş} = \% Ni + 30 (\% C) + 0.5 (\% Mn) \quad (2.2)$$

Hesaplama belirlenen değerler kullanılır ve Schaeffler diyagramı üzerinde ($Ni_{eş}$) değerinden yatayda ve ($Cr_{eş}$) değerinden dikey doğrultuda iki çizgi çizilir. Çizgilerin kesişim noktası ile kaynak bölgesinde oluşacak mikro yapı belirlenir (Ezer, 2021).



Şekil 2.2. Cr-Ni çelikleri için Schaeffler diyagramı (Yorulmazel, 2007)

Kaynak edilebilme özelliğinin iyi olması sayesinde tüm kaynaklı paslanmaz çelik imalatlarının neredeyse tamamında östenitik paslanmaz çelikler kullanılır. Östenitik paslanmaz çeliklerde kaynaklar, çoğunluk olarak ana metalle uygun kimyasal bileşimlere ve mekanik özelliklere sahip dolgu telleri kullanılarak farklı kaynak yöntemleri ile kolay bir şekilde kaynaklanabilirler. Kaynak kabiliyeti bakımından bu çeliklerin en önemli özellikleri şunlardır:

- Oda sıcaklığındaki ısı iletim katsayıları az alaşımlı ve karbonlu çeliklere oranla yaklaşık üçte biri kadardır,
- Isıl genleşme katsayıları yine karbon çelikleri ve az alaşımlı çeliklere oranla 1,5 kat fazladır.
- Elektrik dirençleri de, alaşımsız çeliklerin dört ila yedi katıdır.

Yukarıda verilen özellikler sebebiyle östenitik paslanmaz çelik birleştirmelerinde kendini çekme durumu sade karbonlu çelik birleştirmelerine kıyasla daha fazladır. Bu yüzden kaynak dikişindeki soğuma sırasında büzülme meydana gelir. Kaynak bölgesinde oluşan şiddetli gerilmeler çatlama tehlikesine, ince levhalarda ise distorsiyona neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı paslanmaz çeliklerin çift taraftan iç köşe dikişlerinde sıcak çatlama eğilimleri fazladır (Tülbentçi, 1985; Tülbentçi, 1998; Lothongkum ve ark., 2001).

Düşük ısı ve elektrik iletkenliği özellikleri östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı açısından genellikle yararlıdır ve birleştirmelerinde düşük ısı girdisi ile çalışılması önerilmektedir. Bunun nedeni ise düşük karbonlu çeliklerdeki gibi kaynak esnasında oluşan ısı kaynak bölgesinden hızlı bir şekilde uzaklaşmamakta ve ayrıca malzemenin direnci de yüksek olduğu için düşük akım değerleri ile direnç kaynaklarında birleştirme yapılabilmektedir (Aran ve Temel, 2003; Lothongkum ve ark., 2001).

Östenitik paslanmaz çeliklerde kaynaklı birleştirme işlemi yapmadan önce söylenen fiziksel özelliklere dikkat etmek gereklidir. Bu özelliklerin yanında δ -ferrit oluşumu, taneler arası korozyon duyarlılığı, gerilmeli korozyon duyarlılığı ve sigma fazı oluşması gibi metalürjik etkenlerde bu tip paslanmanın kaynağında önemli etmenlerdir (Castner, 1992; Anık, 1993).

2.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler

Bileşim olarak ferritik gruba benzerlik gösterirler ama ferritik gruba göre daha çok karbon daha az krom içermekte olup bunun nedeni ise ısıl işlemle sertleşme yapılabilmesi içindir. Standart 400 serisi, %11 - % 18 arası Cr , % 1.2 ye kadar C ve bir miktar da Ni ve Mn içermektedir (Hosoi, 1987).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu korozyon direnci özelliği ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklere göre daha düşüktür. Korozyon direnci ve yüksek sertliğe ihtiyaç duyulduğunda martenzitik AISI 420, 431, 440A, 440B, 440C tipi çelikler kullanılmaktadır. En çok kullanılan martenzitik paslanmaz çelik çeşidi ise 410 paslanmaz çeliktir (Günay, 1999).

2.2.4. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler

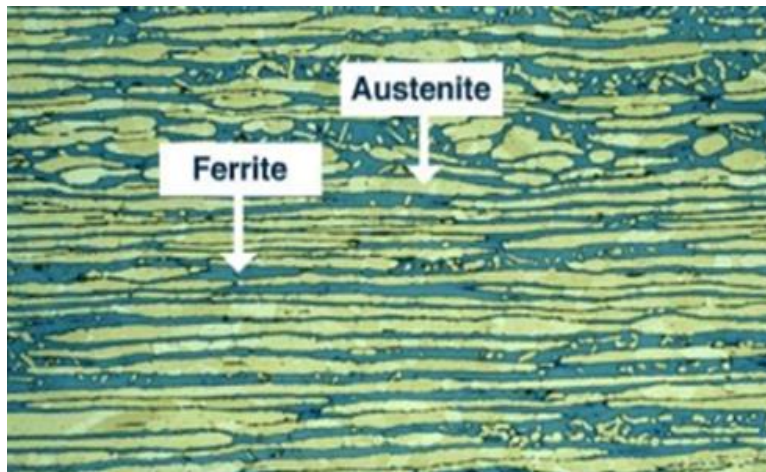
Az miktarda Cu, Al, Nb ve Ta gibi elementlerin Cr-Ni çelik kompozisyonlarına eklenmesi ile mukavemet artırıcı çökelti oluşturularak martenzitik paslanmaz çeliklerden daha yüksek mukavemet elde edilmektedir. Bu çökeltilerin oluşturduğu çelik türüne çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler denir. Bu çelikler benzer mukavemet martenzitik paslanmaz

çeliklere kıyasla daha iyi süneklik, kaynak edilebilme kabiliyeti ve korozyon direncine sahip olup genellikle uzay ve havacılık alanlarında kullanılmaktadır (Khatib, 2009).

2.2.5. Dupleks paslanmaz çelikler

Bu çelik türü ile ilgili yapılan araştırmalar diğer paslanmaz çelik türlerine göre daha detaylıdır. Dupleks paslanmaz çelikler içyapılarında eşit oranda ferritik ve östenitik fazları mevcuttur (Şekil 2.3) Bu yüzden adını Latince 'de iki parçadan oluşan anlamına gelen dupleks kelimesinden almıştır. Ferrit ve östenit dengesine bakıldığında %50 oranında ferrit %50 oranında östenit şeklinde bir oran olup çift fazlı bir içyapıya sahiptir. Mikro yapılarında östenit taneleri içinde ferrit fazı veya ferrit taneleri içinde östenit fazı içeren dupleks paslanmaz çeliklerin akma dayanımları östenitik paslanmaz çeliklere göre iki kat daha büyüktür bu da östenitik paslanmaz çeliklere göre en önemli üstünlüğüdür. (Yıldızlı, 2014).

Mikro yapılarındaki bu denge paslanmaz çeliğin yüksek mekanik özellikler ve üstün korozyon göstermesini sağlar. Özellikle gerilmeli korozyon çatlama ve oyuklanma korozyonuna karşı yüksek direnç ve üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde denizcilik, kimyasal tesisler, nükleer tesisler, petrol ve doğalgaz boru hatları gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar (Tekin, 2011).



Şekil 2.3. Dupleks paslanmaz çeliklerin çift fazlı yapısı (Metal Uzmanı , 2023).

Dubleks paslanmaz çelik saclar östenitik paslanmaz saclara göre ısı değiştiricileri, kriyojenik kapların imalatı, gemi inşa, kağıt sanayi, deniz suyu ve tuzlu su ortamlar da kullanım için daha uygun olmalarına karşın sac kalınlığı düştükçe, sac şekillendirme işlemlerinde kırılma ve yırtılma gibi sorunlarla karşılaşılır. İmalatçı firmalar ise bu maliyetli sacları şekillendirme ve bükme işlemlerindeki çizilme, kırılma, yırtılma ve katlanma gibi sorunları gidermeye yönelik çalışmalar yapmaktadır (Dolutaş H, 2011).

Dubleks paslanmaz çelikler bileşimlerine göre 3 gruba ayrılmaktadır. Birinci grup %22 Cr, %5 Ni, %3 Mo ve takribi %0.16 N element yüzdelerini içerisinde barındırır. İkinci grup dubleks paslanmaz çelikler ise bileşimlerinde yaklaşık olarak %23 Cr, %4 Ni, %0.1 N içeren zayıf bir alaşımdır. Gerilmeli korozyon, çatlama korozyon olan ve dayanımın gerekli olduğu ortamlarda tavsiye edilmektedir. Diğer türlere göre daha yüksek korozyon direnci ve dayanım özellikleri gösteren dubleks paslanmaz çeliklerin son türü ise süper dubleks paslanmaz çeliklerdir. % 25 Cr, % 7 Ni, % 4' e kadar Mo, Cu ve W ile birlikte %0.28 N içerirler (Kahraman F, 2013).

Dubleks paslanmaz çeliklerin kullanım alanları

Genellikle petrokimya, kâğıt endüstrisi ve gaz iletim endüstrilerinde kullanılan dubleks paslanmaz çelikler yüksek korozyon direnci ve dayanımı özellikleri sayesinde deniz suyu, tuzlu su ve seyreltik asitlerde kullanım için valf endüstrisinde de kullanılmaktadır (Atkinson ve ark., 1982).

Dubleks paslanmaz çeliklerin korozyon direnci ve mekanik özellikleri nedeniyle kullanıldığı diğer bir yer yağ ve gaz endüstrisidir. Farklı bir endüstri dalı olan gaz ve yağ endüstrilerindeki uygulamalarda ve deniz suyu içerisindeki boru hatlarında kullanılmaktadır (Noble, 1992).

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti

Bu çeliklerin kaynak kabiliyeti özelliği genellikle ferritik paslanmaz çeliklere göre daha iyi olup östenitik paslanmaz çeliklere göre daha kötüdür. Alaşımlardaki kaynak dikişleri çoğu uygulamada ısıl işlem yapılmasa dahi istenilen mekanik mukavemeti ve korozyon direncini bize sağlarlar. Kaynak dikişinin kaynak sıcaklığında başlangıçta tamamen ferritik

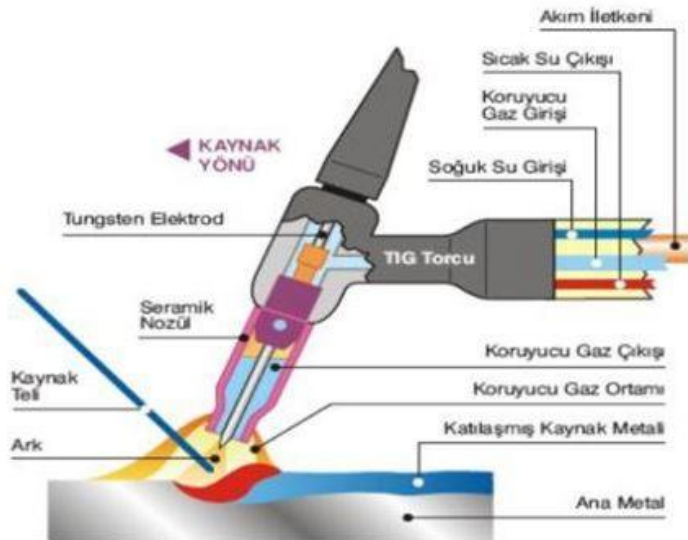
olup, soğuma esnasında ise ferritin bir kısmı östenite dönüşür ve bunun sonucu kaynak dikişi yapısı dubleks olur. Isı tesiri altında kalan bölgede östenit oluşumu istendiği takdirde soğuma çok hızlı yapılmamalıdır. Yapılacak kaynaklı birleştirmede soğuma hızını önemli ölçüde etkileyen özellikler ise ısı girdisi, kaynak parametreleri, ön tav sıcaklığı ile pasolar arası sıcaklıktır. Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında en çok tercih edilen kaynak yöntemleri arasında örtülü metal (elektrot) ark kaynağı, GTAK, GMAK, tozaltı kaynağı ve plazma ark kaynağı sayılabilir.

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan dolgu tellerin eriyiklerinin akıcılığının, 300 serisi paslanmaz çelik ilave tellerine göre daha az olması sebebiyle kaynak ağzı hazırlamada aralıklar daha geniş ve ağız açıları daha büyük tutulmalıdır. Koruyucu gaz olarak Ar (argon) gazı en çok kullanılan koruyucu gaz olmasının yanı sıra Ar kaynak bölgesinde N (azot) kaybına sebebiyet verir. Bundan dolayı, Ar gazına N ilave edilmelidir. Saf N gazı tersten ve kök korumalarda kullanılmasının yanı sıra çok fazla östenit oluşumuna sebebiyet verdiği için bu paslanmaz çelik türünde önerilmez. İçerisindeki He sayesinde eriyik kaynak metalinin akıcılığını iyileştirmesi sebebiyle Ar+He (argon+helyum) karışımları da koruyucu gaz olarak kullanılabilir. Tek yönlü kaynak tarsımlarında en iyi sonuç kök pasonun TIG kaynağı kullanılıp sıcaklık 260°C'nin altına düşene kadar arkadan gaz koruması yapılmasıyla elde edilir. Ayrıca bakır altlık hızlı soğumaya neden olduğu için kullanılmamalıdır. Ark başlangıçları ise kaynak ağzının dışında yapılmamakla birlikte temizliğini yaparken de döner fırça kullanılmamalıdır. Çok az salınlı veya hareketsiz düz kaynak uygulamaları tercih edilmelidir. Bunun sebebi ise fazla salınlının, ısı girdisinin bölgesel olarak artışı ve aşırı çarpılmasıdır. Kaynak işlemi yapıldıktan sonra ısıl işlem yapılmayacaksa; kullanmakta olduğumuz dolgu teli, ana metale nazaran daha fazla Ni içermelidir. Kaynak işlemi sonrasında çözündürme tavı ısıl işlemi yapılmak isteniyorsa ana metal ile aynı kompozisyona sahip olan dolgu teli kullanılabilir. Dubleks paslanmaz çeliklerin östenitik paslanmaz çelik veya karbonlu veya düşük alaşımlı çelikler ile disimilar birleştirmelerinde dubleks paslanmaz çelik ilave metali kullanılması tercih edilmektedir. Kullanılacak olan bu ilave metaller N içermelidir bunun nedeni ısıdan etkilenen bölgelerde ferrit/östenit oranını dengeleyebilmektir. 309L, 309LMO gibi östenitik paslanmaz çelik ilave metaller bazı uygulamalarda tavsiye edilebilir ama bu ilave metaller yüksek sıcaklıktaki IEB'de N azalmasına ve içyapıda ferrit fazının artmasına neden olur (Dolutaş H., Cavcar M, 2001).

2.3. Gaz Tungsten Ark Kaynağı

İki veya daha fazla metal parçanın temas halindeki yüzeylerinin uygun ısı veya basınç altında birleştirilmesine kaynak adı verilir. Birleştirilen parçalar kalıcı bir şekilde yekpare haline getirilir. Bu işlem parça birleştirme yöntemleri arasındaki en ekonomik yöntemdir ve uygulamaları fabrika ortamında ve sahada da yapılabilir.

Bu çalışma bir gazaltı ark kaynak yöntemi olan ve piyasada yaygın olarak tungsten inert gaz (TIG) yöntemi olarak da adlandırılan gaz tungsten ark kaynağı (GTAK) yöntemi 1940'lı yılların başında geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemde makaraya sarılı olan çıplak tel otomatik ve sürekli bir şekilde beslenir ve kaynak dikişini atmosferdeki olumsuz etkilerden koruması amacıyla kaynak torçunun tel elektrot çevresindeki delikler sayesinde bir koruyucu gaz ile beslenir. Kullanılmakta olan çıplak tel elektrodun dolgu malzemesi fonksiyonu olup, yöntemde kullanılan tel elektrotların çapları 0.8 ile 6.5 mm arasında değişiklik gösterir. Malzemenin kalınlığına ve istenilen kaynak hızına bakılarak kullanılacak tel çapı belirlenir. Birleştirme sırasında koruyucu gaz olarak argon ve helyum gibi inert gazlar veya bazı durumlarda argon-helyum karışımı kullanılır. Gaz tungsten ark kaynağının şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir (Çam, 2020).



Şekil 2.4: Gaz tungsten ark kaynağı yönteminin şematik gösterimi (Çam, 2020).

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, 3 mm kalınlığa sahip soğuk haddelenmiş AISI 316L tipi östenitik paslanmaz çelik ve SAF 2205 (AISI 318LN) tipi dubleks paslanmaz çelik malzemeler kullanılmış olup ilk olarak 805x1000x3 mm ebatlarında olacak şekilde ayrı ayrı levha şeklinde satın alınmıştır. Çalışmada kullanılan östenitik 316L ve dubleks paslanmaz çeliğin ağırlık yüzdesi cinsinden kimyasal kompozisyon (temin edilen firmalardan alınan sertifika değerlerine göre) Çizelge 3.1.'de, birleştirmede kullanılan ilave tellerin kimyasal kompozisyonları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Alınan dubleks ve 316L kalite büyük levhalar kaynak kısmı hadde yönüne dik olacak şekilde 195x300 mm boyutlarında dikdörtgen parçalara Şekil 3.1'de görüldüğü gibi CNC'de kesilmiştir. Kaynak işlemi öncesi tüm levhalarda kaynak ağızları Şekil 3.2'de şematik olarak gösterildiği gibi açılmıştır. Bu işlemin amacı, kaynak mukavemeti arttırmak için ergimiş bölgenin enini genişletmektir. Bu amaca yönelik levhalara EN ISO 9692-1 standardına göre kaynak ağızı açılmıştır (Şekil 3.1). Kaynak yapılacak yüzeyler kaynak işlemi öncesi paslanmaz çelik metal fırça kullanılarak mekanik olarak temizlenmiştir.

Çizelge 3.1. Östenitik 316L ve dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi*

Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)												
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Co	N
AISI 316L	0.024	0.48	1.13	0.003	0.001	16.6	10.1	2.03	-	-	-	0.04
AISI 318LN	0.016	0.37	1.49	0.026	0.001	22.2	5.74	3.13	0.017	0.25	0.18	0.18

(*Geri Kalan: Fe)

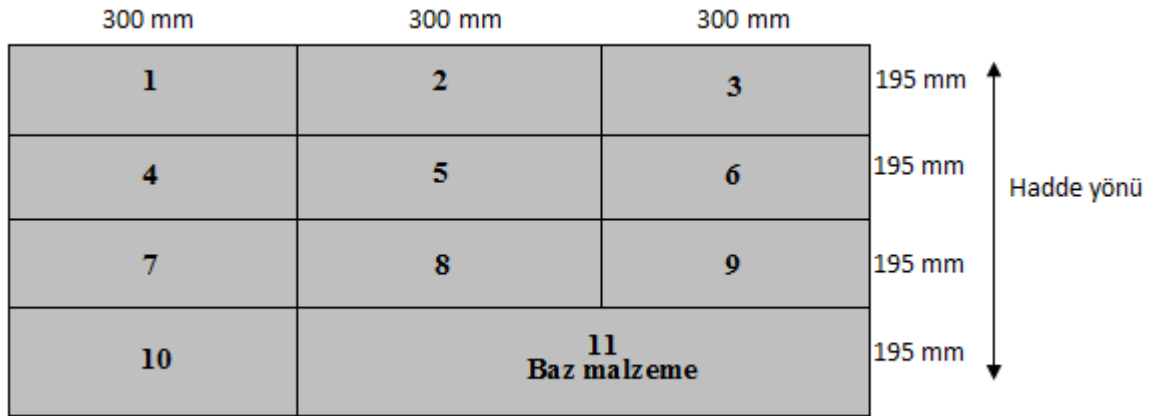
Çizelge 3.2. Çalışmada kaynak için kullanılan ilave tellerin kimyasal bileşimi*

Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)							
Malzeme	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
ER316L	0.02	0.35	1.75	18.50	11.50	2.75	-
ER2209	0.01	0.45	1.45	23.00	8.50	-	0.15
ER309L	0.02	0.35	1.75	23.50	13.50	-	-

(*Geri Kalan: Fe)

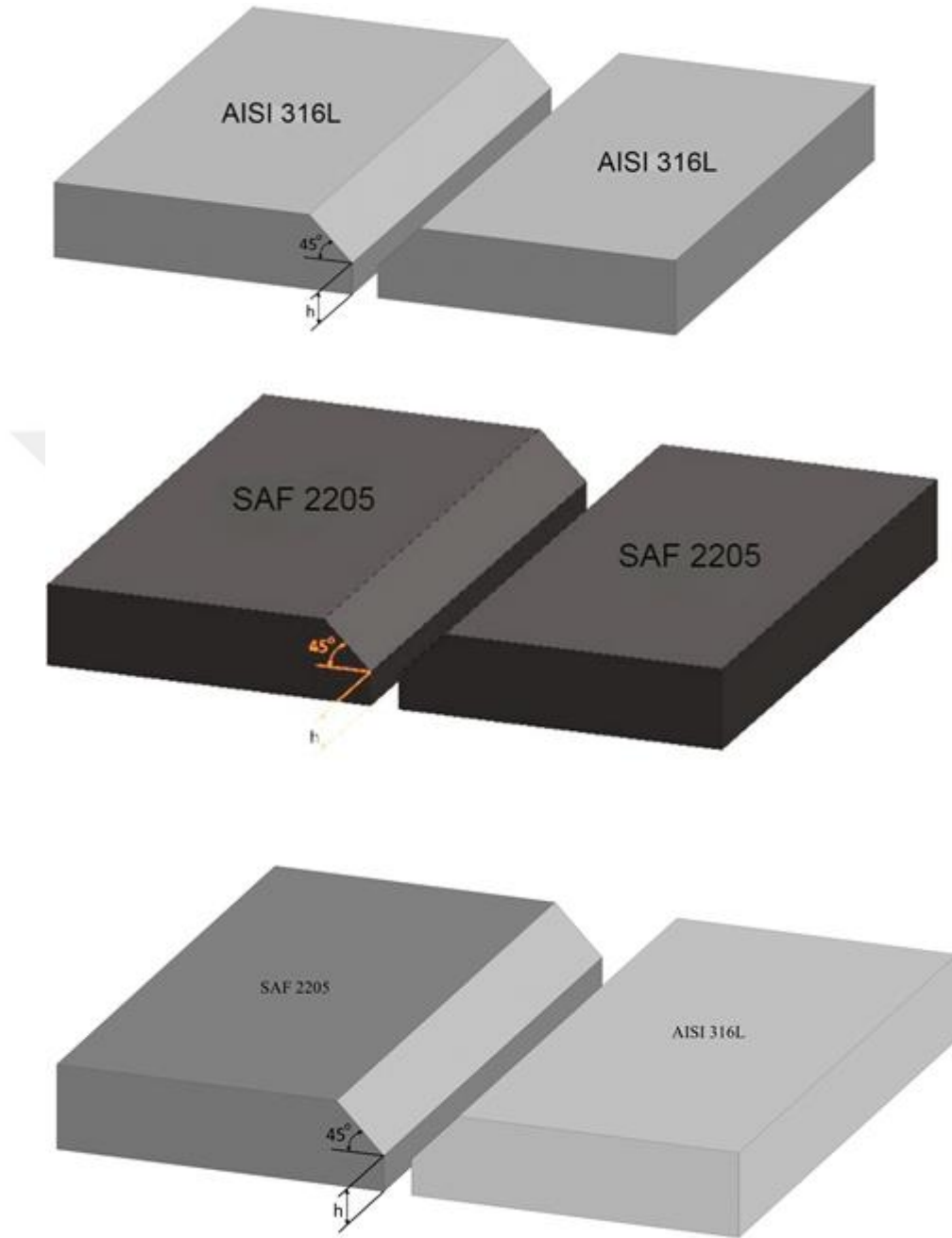
Kaynak ağzı açma işleminden sonra kaynak işlemi yapılacak olan sacların kaç amperde ve hangi ilave tel ile kaynak edileceği Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Östenitik 316L ve dubleks paslanmaz çelik sacların GTAK yöntemi ile birleştirilmesi işleminde yapılan deneysel çalışmada, tel besleme hızı 1.5 mm/s olacak şekilde ve 2.0 mm çapında ER316L ve ER2209 tiplerinde dolgu telleri kullanılarak kök kaynağı atılarak GTAK yöntemi ile birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Tüm kaynak işlemlerinde koruyucu gaz olarak %99,95 saflıkta argon gazı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, benzer levhaların kaynak işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 3.2'de ve farklı levhaların kaynak işleminde kullanılan kaynak parametreleri ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kaynak için kullanılan levhaların CNC kesim planı.

Çizelge 3.3'ten görüldüğü üzere kaynak işlemleri, ısı girdisinin kaynak performansına etkisini tespit etmek amacıyla üç farklı ısı girdisi ile yapılmıştır. Kullanılan üç farklı ısı girdisinden minimum olan ısı girdisini belirlemek için yürütülen ön çalışmalarda 120 A'in altında kaynak profilinde oluşan bazı kaynak kusurları olduğu için minimum akım olarak 120 A kullanılmıştır. Kaynak işlemlerinde kullanılan ısı girdileri şu formülle hesaplanmıştır: $q = \eta I U 60/1000$ v (q = ısı girdisi (kJ/mm), η = ark verimliliği (GTAK için 0,7), U = ark gerilimi (V), I = akım (A), ve v = kaynak hızı (mm/min)). Kaynak işlemlerinde kaynak tabanından sıvı metal akması sonucu yetersiz doldurma hatası oluşmasını engellemek için tüm kaynak denemelerinde Şekil 3.4'de gösterilen seramik altlık kullanılmıştır.

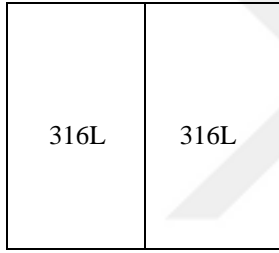


Şekil 3.2. Kaynak denemeleri için plakaların hazırlanması ($h=1$ mm; levhalar arası mesafe: 2 mm).

Çizelge 3.3. Benzer AISI 316L-AISI 316L ve SAF 2205-SAF 2205 bağlantılarda kullanılmış olan kaynak parametreleri

Kaynak İşlemi	Akım (A)	Gerilim (V)	Kaynak Hızı (mm/min)	Tel Besleme Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (kJ/mm)
Düşük ısı girdisi	120	28	36	1,5	3,92
Orta ısı girdisi	130	28	36	1,5	4,25
Yüksek ısı girdisi	140	28	36	1,5	4,57

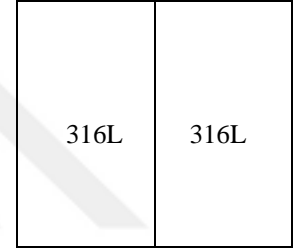
ER316L Kaynak teli



Kaynak ağzı açılmış
120 Amper

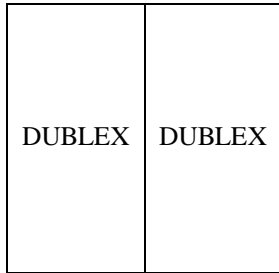


Kaynak ağzı açılmış
130 Amper

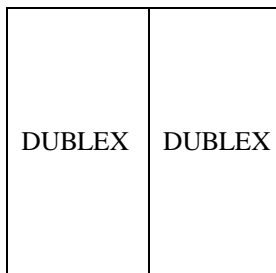


Kaynak ağzı açılmış
140 Amper

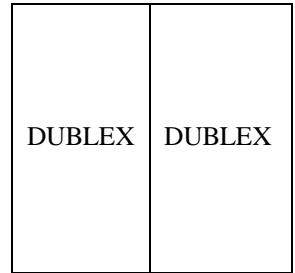
ER2209 Kaynak teli



Kaynak ağzı açılmış
120 Amper



Kaynak ağzı açılmış
130 Amper



Kaynak ağzı açılmış
140 Amper

ER2209 Kaynak teli

316 L	DUBLEX
-------	--------

Kaynak ağzı açılmış

120 Amper

ER309L Kaynak teli

316 L	DUBLEX
-------	--------

Kaynak ağzı açılmış

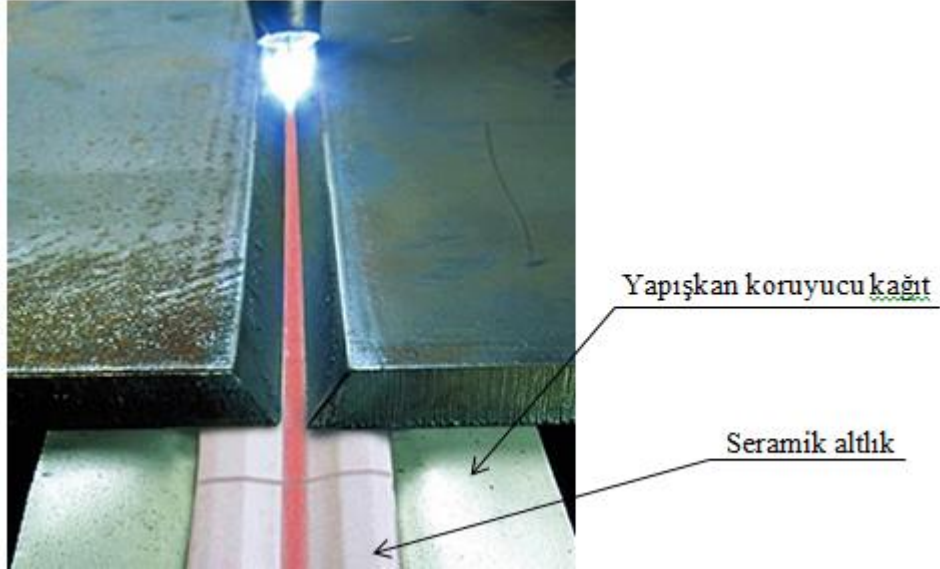
120 Amper

21

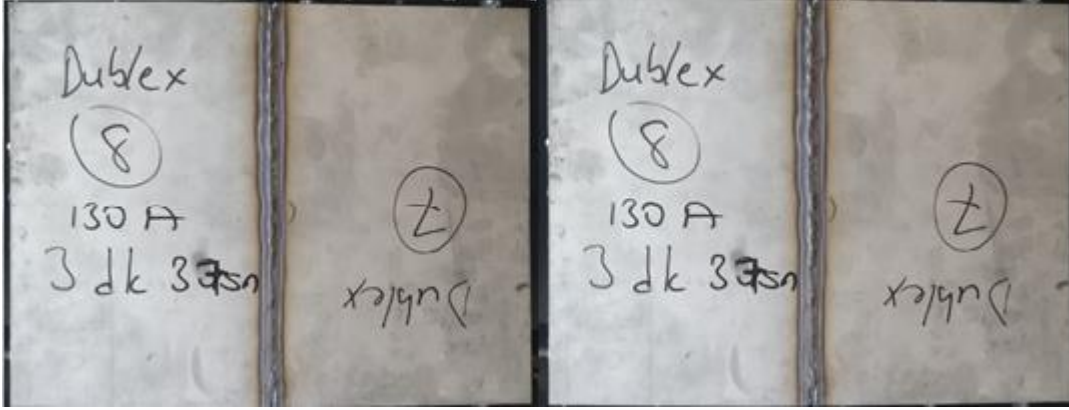
Şekil 3.3. Levhaların kaç amperde ve hangi ilave tel ile kaynak edileceğini gösteren şema.

Çizelge 3.4. Farklı AISI 316L-SAF 2205 kaynak denemelerinde kullanılmış olan kaynak parametreleri

Kullanılan İlave Tel	Akım (A)	Gerilim (V)	Kaynak Hızı (mm/min)	Tel Besleme Hızı (mm/s)	Isı Girdisi (kJ/mm)
ER 2209	120	28	36	1,5	3,92
ER 309L	120	28	36	1,5	3,92

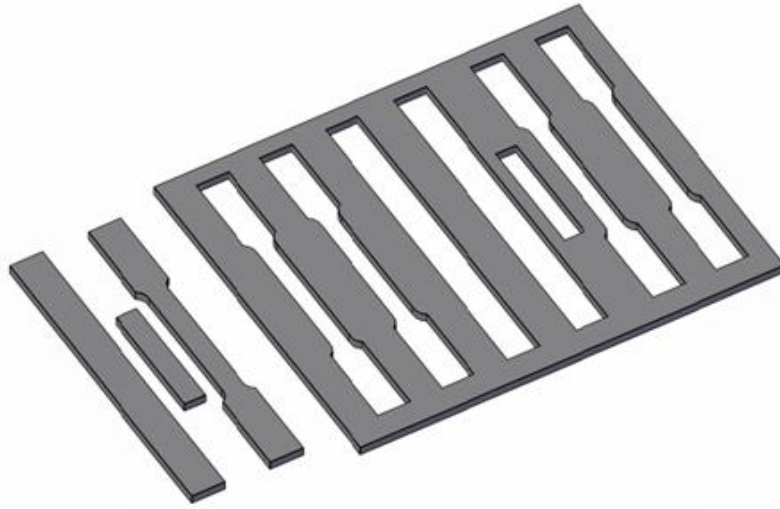


Şekil 3.4. Birleştirme denemelerinde kullanılan seramik altlık



Şekil 3.5. 130 amper akım ile üretilen kaynaklı bağlantılara bir örnek: 22505-2205.

Birleştirme işlemleri sonrasında, levhaların kaynak bölgelerindeki içyapısal değişimleri incelemek ve kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini tespit etmek için CNC’de tüm kaynaklı levhalardan bir metalografi numunesi ile iki eğme (bükme) deneyi numunesi ve ASTM E8/E8M standardında dört çekme testi numunesi çıkarılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kaynaklı levhalardan test numunelerinin kesme planı.

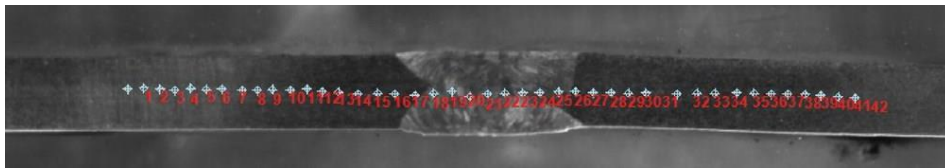
Ayrıca birleştirilmiş olan bağlantılar ile ana metalin (baz plaka) mekanik özelliklerini mukayese yapabilme amaçlı baz malzemeden de dört adet çekme numunesi çıkartılmış ve çıkarılan metalografi numunelerine uygulanacak dağlama işlemi öncesinde numuneler polyester ve sertleştirici malzemeleri kullanılarak soğuk kalıplama işlemi elle tutulur hale getirilmiştir. Daha sonra zımparalama işlemi beş farklı aşamada (240, 400, 600, 1200 ve 2400 grid zımpara kağıtları kullanılmış ve bir önceki zımpara yönünün izlerini gidermek amacıyla tüm zımpara işlemleri bir önceki zımparalamanın ters yönünde olacak şekilde)

uygulanmıştır (Şekil 3.7). Ardından numune yüzeylerinde kalan aşındırıcı izleri kaybetme amacıyla elmas solüsyonlu parlatma işlemi uygulanmış ve numune dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.7. Soğuk kalıba alınmış numune

Dağlama işlemi uygulaması için kral suyu diye bilinen 50 ml HCl ve 150 ml HNO₃ içeren bir solüsyon hazırlanmış ve numuneler yaklaşık 20 sn civarı bu solüsyona daldırılmak suretiyle dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama işlemi uygulanan bu metalografi numuneleri üzerinde çok sayıda mikrosertlik ölçümleri yapılmasıyla da kaynak işleminden sonra kaynak dikişi üzerinde kaynak kesidi boyunca meydana gelen sertlik dağılımını gösteren sertlik profilleri elde edilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri, kaynak bölgesi merkezindeki bir çizgi boyunca, 500 g'lık bir yük altında 10 sn bekleme süresi boyunca yapılmış ve Şekil 3.8'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Mikrosertlik ölçümleri uygulanan noktaları gösteren makro resim

Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de sırasıyla AISI 316L östenitik baz plaka ve düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantılardan çıkarılan çekme numunelerinin deney öncesi hallerini gösteren makro resimler verilmiştir. Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da ise, sırasıyla AISI 318LN dubleks baz plaka ve düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile üretilen AISI 318LN dubleks bağlantılardan kesilen çekme numuneleri gösterilmektedir. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sırasıyla, ER2209 ve ER309L ilave telleri ile yapılan farklı AISI 316L-AISI 318LN bağlantılardan çıkarılan çekme

numunelerini gösteren makro resimler verilmiştir. Baz malzeme numuneleri ve kaynaklı numuneler Zwick/Roell marka çekme cihazında ISO 6892-1 standardına göre 0,0025 1/s'lik bir deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Testlerin sonucunda çekme-% uzama eğrileri elde edilmiş ve hem ana metalin hem de kaynaklı bağlantıların akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ana metal ile kaynaklı levhalardan elde edilen yüzde uzama ve çekme dayanımları değerleri kullanılarak, 3.1 ve 3.2 nolu formüller ile kaynaklı levhaların süneklik ve mukavemet cinsinden kaynak performans değerleri tespit edilmiştir.

$$\text{Süneklik Performansı (\%)} = \frac{\text{Kaynaklı levhanın ortalama yüzde uzaması}}{\text{Baz levhanın ortalama yüzde uzaması}} \times 100 \quad (3.1)$$

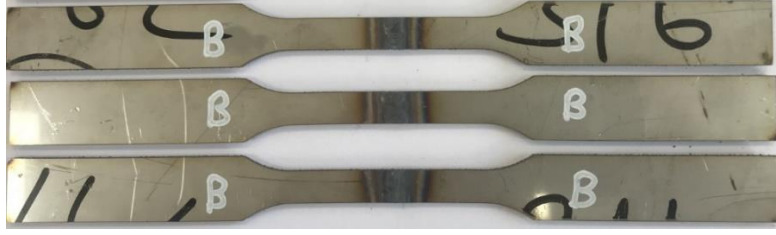
$$\text{Mukavemet Performansı (\%)} = \frac{\text{Kaynaklı levhanın ort. çekme mukavemeti}}{\text{Baz levhanın ortalama çekme mukavemeti}} \times 100 \quad (3.2)$$



Şekil 3.9. AISI 316L baz plakasından çıkarılan çekme testi numuneleri



Şekil 3.10. Düşük ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



Şekil 3.11. Orta ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



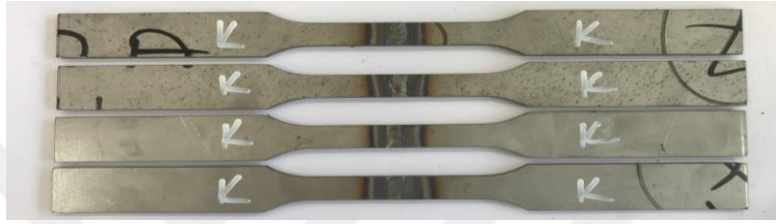
Şekil 3.12. Yüksek ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



Şekil 3.13. AISI 318LN baz plakasından çıkarılan çekme testi numuneleri



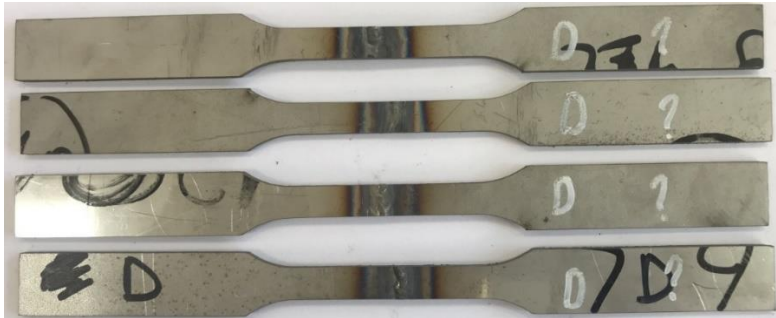
Şekil 3.14. Düşük ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 318L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



Şekil 3.15. Orta ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



Şekil 3.16. Yüksek ısı girdisi ile GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme numuneleri



Şekil 3.17. ER2209 ilave teli kullanılarak GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L - AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



Şekil 3.18. ER309L ilave teli kullanılarak GTAK yöntemiyle birleştirilen AISI 316L -AISI 318LN kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme testi numuneleri



4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen deneysel bulgular, içyapı ve mekanik özellikler olarak iki alt başlık altında sunulmaktadır.

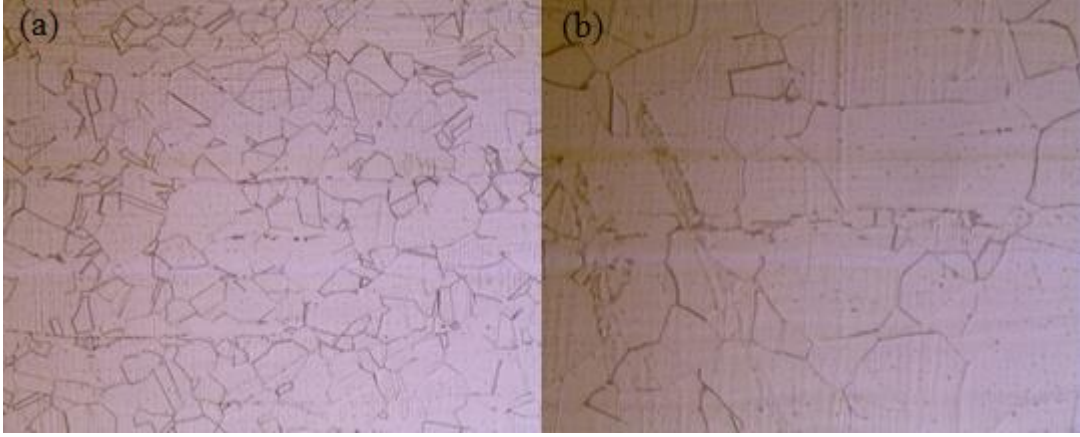
4.1. İçyapı Özellikleri

Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan baz malzemelerin içyapısı ile GTAK yöntemiyle üç farklı ısı girdisinde üretilen AISI 316L-AISI 316L ve SAF 2205-SAF 2205 bağlantılar ve iki farklı ilave tel ile 120 amper akım ile üretilen AISI 316L-SAF 2205 kaynaklı bağlantılarından elde edilen metalografi numuneleriyle tüm bağlantıların kaynak bölgelerinde oluşan içyapı değişimleri incelenecektir.

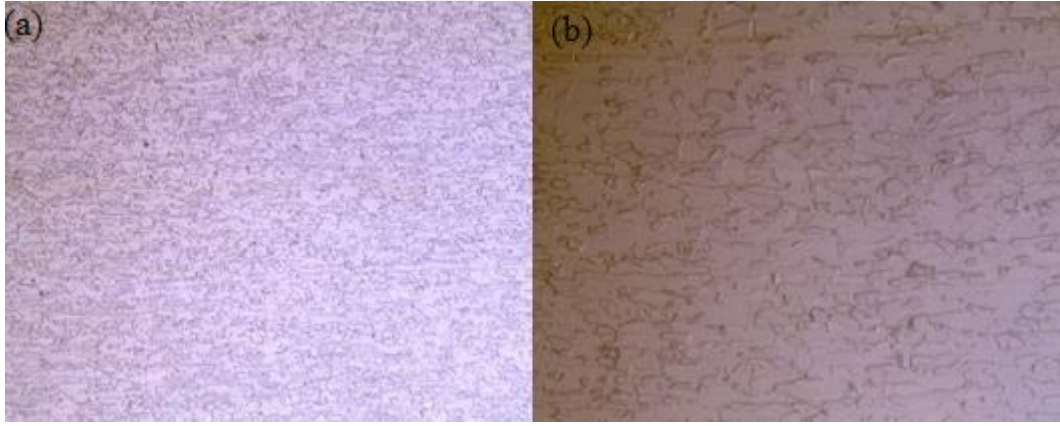
Bu çalışmada kullanılan AISI 316L östenitik ve SAF 2205 (AISI 318LN) dubleks paslanmaz çelik levhalarının içyapısını gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sırasıyla verilmektedir. Şekillerde AISI 316L baz plaka içyapısı östenit tanelerinden oluşan tek fazlı bir yapı olduğu SAF2205 dubleks baz plakanın ise östenit ve ferrit tanelerinden oluşan çift fazlı bir mikro yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.3'de elde edilen bağlantılara örnek olarak, benzer AISI 316L paslanmaz çelik bağlantısı, benzer AISI 318LN paslanmaz çelik bağlantısı ve farklı AISI 316L-AISI 318LN paslanmaz çelik bağlantıların kesit görüntüleri verilmektedir. Porozite ve çatlak gibi herhangi bir kaynak hatasının kaynaklı bağlantıların hiçbirinde tespit edilmemiş olduğu şekilde görülmektedir.

Düşük ve yüksek ısı girdisi kullanılarak üretilen AISI 316L-AISI 316L kaynaklı bağlantıların kaynak dikişinde oluşan içyapıyı gösteren mikro resimler sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Orta ısı girdisi ile üretilen bağlantının kaynak dikişinde de benzer bir içyapı gözlenmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin kaynak dikişinde, döküm yapısına benzer ince bir dendritik yapı mevcuttur bu durum östenitik paslanmaz çelikler için çok yaygındır. Mikroyapı, birincil ve ikincil dendrit kolları arasında bir miktar interdendritik delta-ferrit içeren östenit dendritlerinden oluşmaktadır. GTAK yöntemi ile üretilen AISI 316L bağlantıları ergime bölgesinde benzer bir dendritik yapının oluşumu birçok araştırmacının tarafından da gözlemlenmiştir (Silverstein ve ark., 2018; Kulkarni ve ark.,

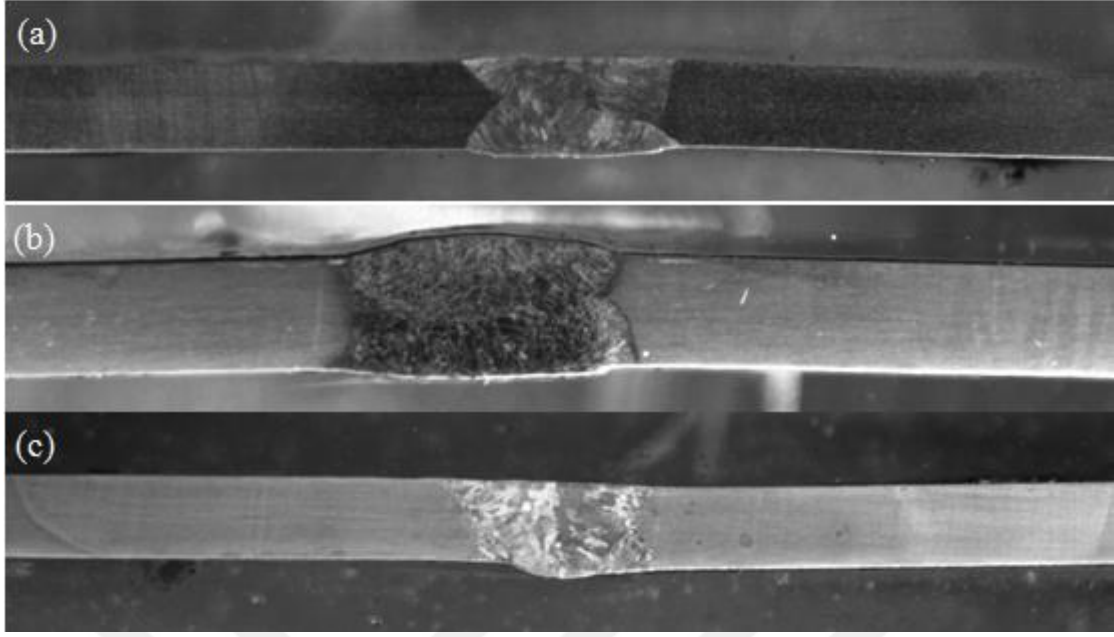
2020; Serindağ ve Çam, 2022a; Serindağ ve Çam, 2022b; Chandrasekar ve ark., 2017; Soltani ve Tayebi, 2018).



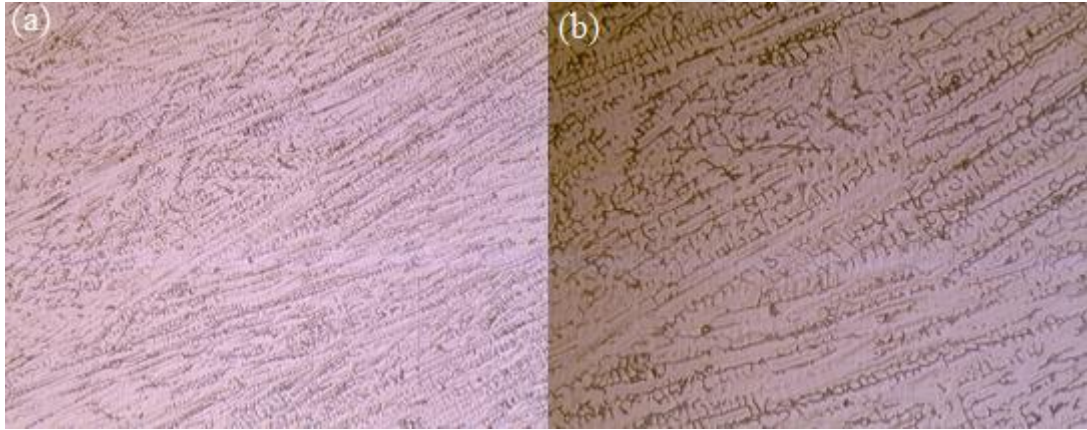
Şekil 4.1. AISI 316L baz levhanın mikroyapısı: (a) 200X büyütme ve (b) 500X büyütme



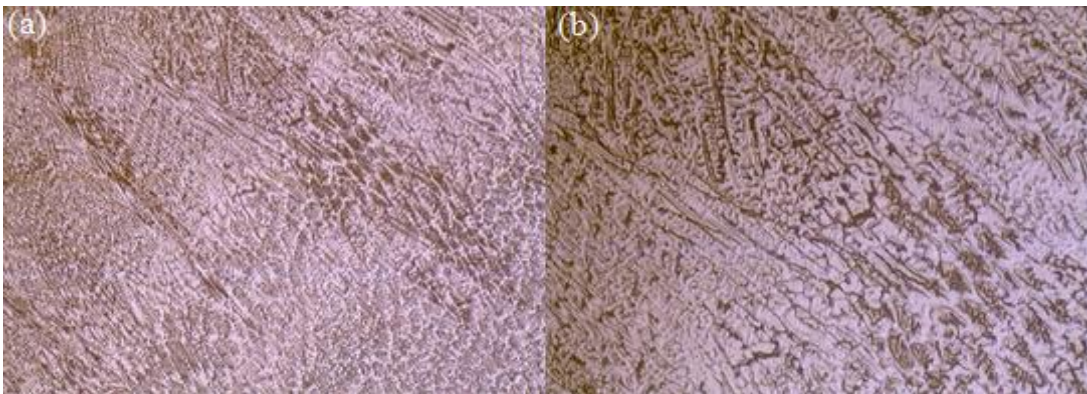
Şekil 4.2. SAF 2205 baz levhanın mikroyapısı: (a) 200X büyütme ve (b) 500X büyütme



Şekil 4.3. Kaynak kesitini gösteren makro resimler: (a) AISI 316L-AISI 316L, (b) AISI 318LN-AISI 318LN ve (c) AISI 316L- AISI 318LN bağlantı

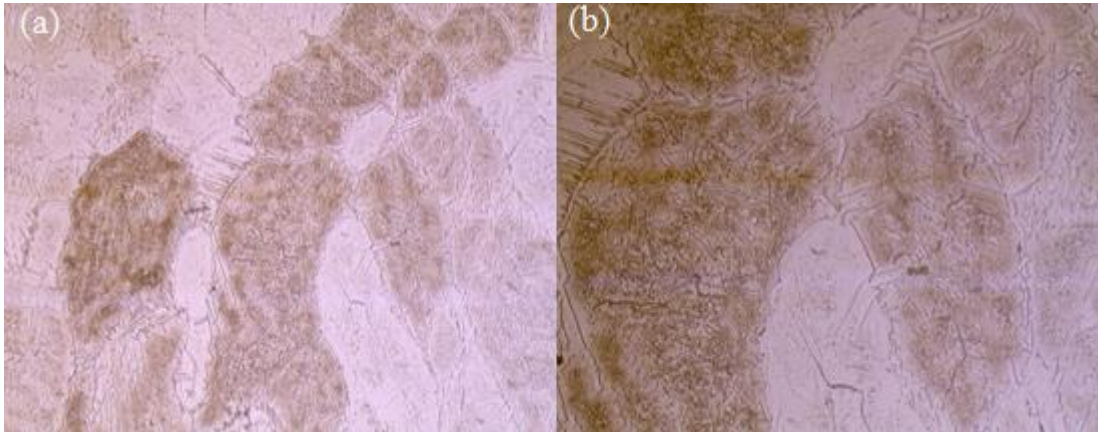


Şekil 4.4. Düşük ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantısının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme



Şekil 4.5. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantısının kaynak dikişindeki içyapı:(a) 10X büyütme ve (b) 20X büyütme

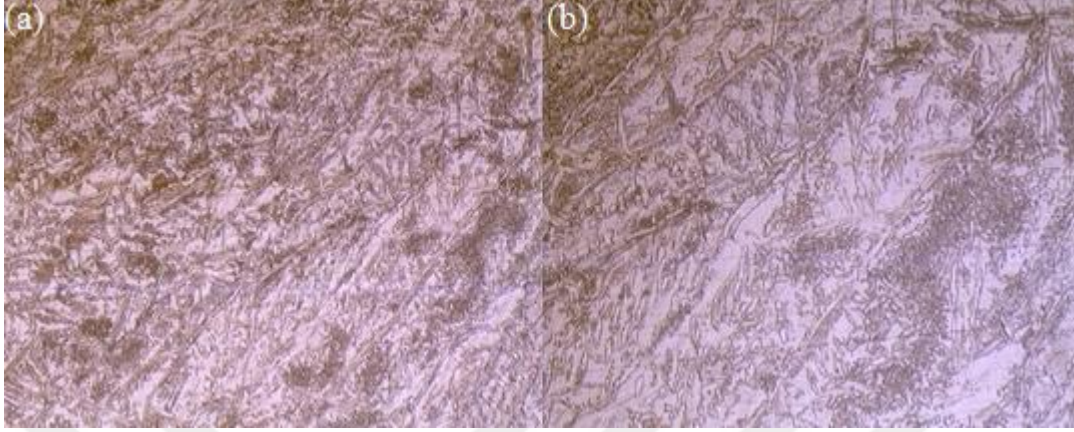
Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de de sırasıyla düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile üretilen AISI 318LN bağlantıların kaynak dikişinde gözlenen mikro yapıları gösteren mikro resimler verilmektedir. Şekil 4.6’ dan görüleceği üzere düşük ısı girdisi (3,92 KJ/mm) ile üretilen bağlantının kaynak dikişindeki (ergime bölgesindeki) içyapının ferrit fazı ile tane sınırı östeniti, az miktarda Widmanstatten östeniti ve tane içi östeniti ihtiva ettiği görülmektedir. Ayrıca, dikkat çeken bir başka husus bu bağlantının kaynak dikişinde ferrit miktarı östenit miktarından daha fazladır. Orta ve yüksek ısı girdileri (4,25 ve 4,57 KJ/mm) ile yapılan bağlantıların kaynak dikişlerindeki içyapılar da (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıya benzemektedir. Ancak, Widmanstatten östeniti ve tane içi östeniti miktarı daha fazladır. Ayrıca, düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıların ergime bölgesinde daha ince taneli eş eksenli bir yapı oluşurken, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen bağlantıların kaynak dikişinde iri taneli uzun sütunsal bir tane yapısı olduğu gözlenmiştir. Bu uzun sütunsal tane yapısı yüksek ısı girdisi (4,57 kJ/mm) ile gerçekleştirilen bağlantıda daha belirgindir (Şekil 4.8). Ayrıca, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen bağlantıların kaynak dikişinde, özellikle de yüksek ısı girdili bağlantının kaynak dikişinde, östenit miktarı düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıya nazaran çok daha fazla olup, ferrit-östenit dengesi daha iyidir.



Şekil 4.6. Düşük ısı girdili AISI 318LN bağlantının kaynak dikişi içyapısı: (a) 10X ve (b) 20X

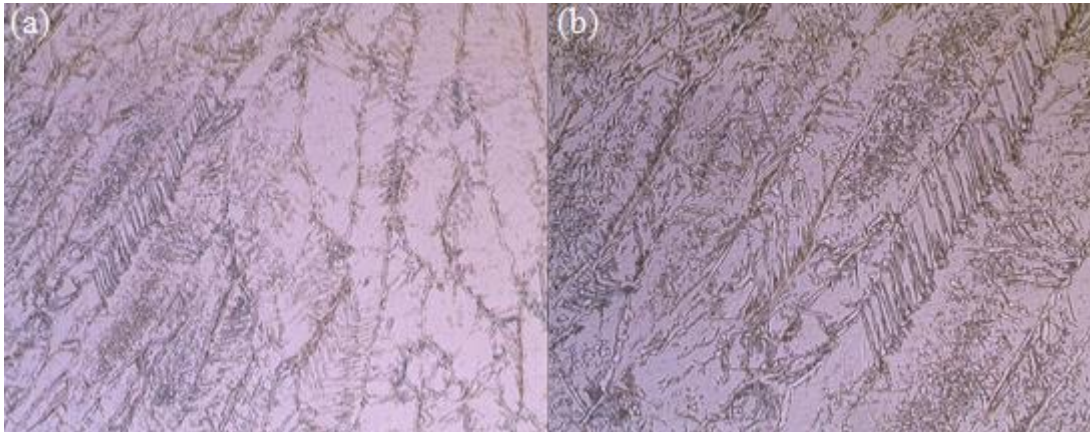
ER2209 dubleks ve ER309L östenitik ilave telleri kullanarak ve 120 amper akım (düşük ısı girdisi, 3,923 kJ/mm) ile elde edilen farklı AISI 316L-AISI 318LN bağlantıların kaynak dikişindeki mikro yapıları gösteren mikro resimler sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmektedir. Şekil 4.9’ dan görüleceği üzere, dubleks ilave tel ile elde edilen bağlantının kaynak dikişindeki içyapı homojen olup, AISI 318LN-AISI 318LN bağlantılarda olduğu

gibi, ferrit fazı ile tane sınırı östeniti, az miktarda Widmanstatten östeniti ve tane içi östeniti içermektedir (Şekil 4.9).

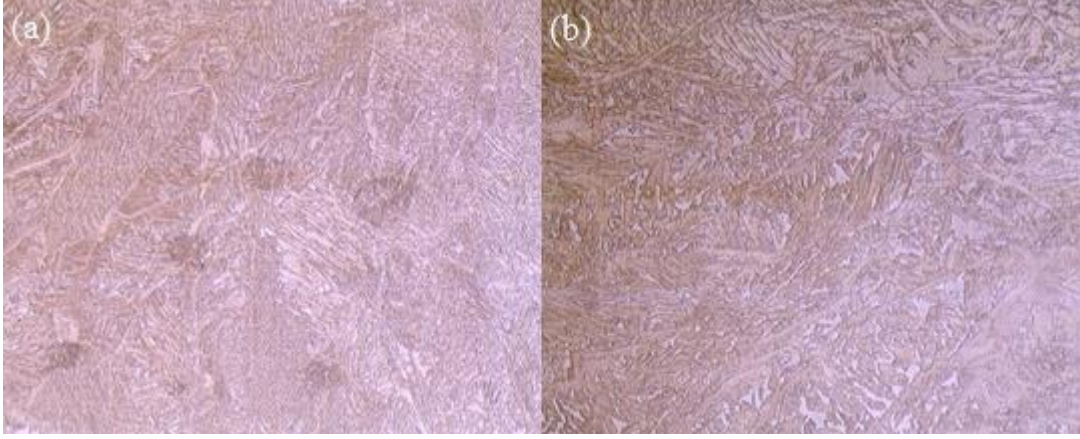


Şekil 4.7. Orta ısı girdili AISI 318LN bağlantının kaynak dikişi içyapısı: (a) 10X ve (b) 20X

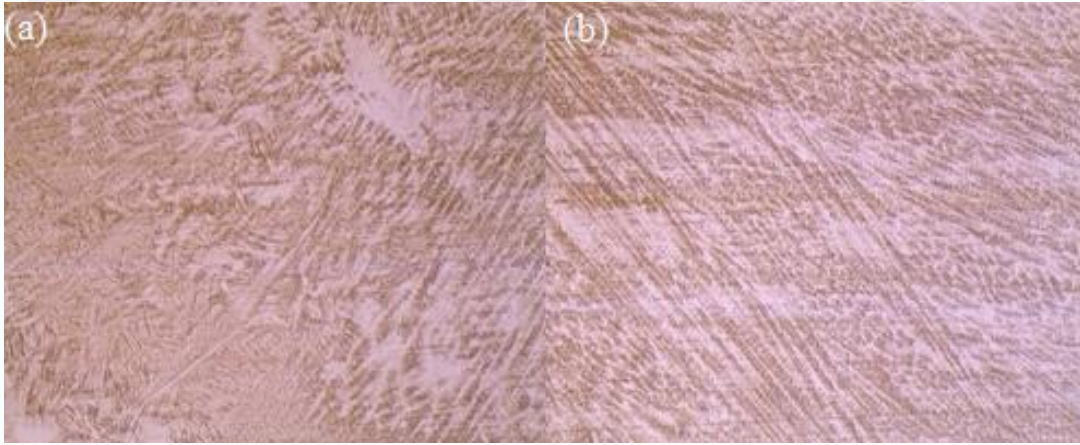
Diğer taraftan, östenitik ilave tel ile elde edilen bağlantının kaynak dikişindeki (ergime bölgesinde – EB) içyapı oldukça heterojen olup, kaynak dikişinin AISI 318LN baz levhaya yakın kısmında ferrit fazı ile tane sınırı östeniti, az miktarda Widmanstatten östeniti ve tane içi östenitinden oluşan dubleks bir mikro yapı gözlenirken (Şekil 4.10a), AISI 316L östenitik baz plakaya yakın kısmında östenitik paslanmaz çeliklerin EB'ne benzer şekilde östenit dendritleri ve dendritler arası delta ferrit fazından ibaret dendritik bir yapının varlığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.10b).



Şekil 4.8. Yüksek ısı girdili AISI 318LN bağlantının kaynak dikişi içyapısı: (a) 10X ve (b) 20X

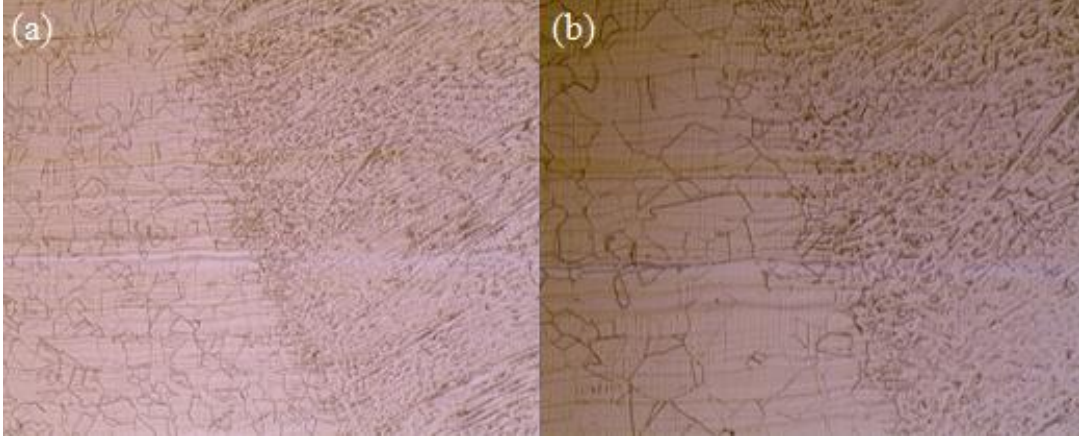


Şekil 4.9. ER 2209 ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X

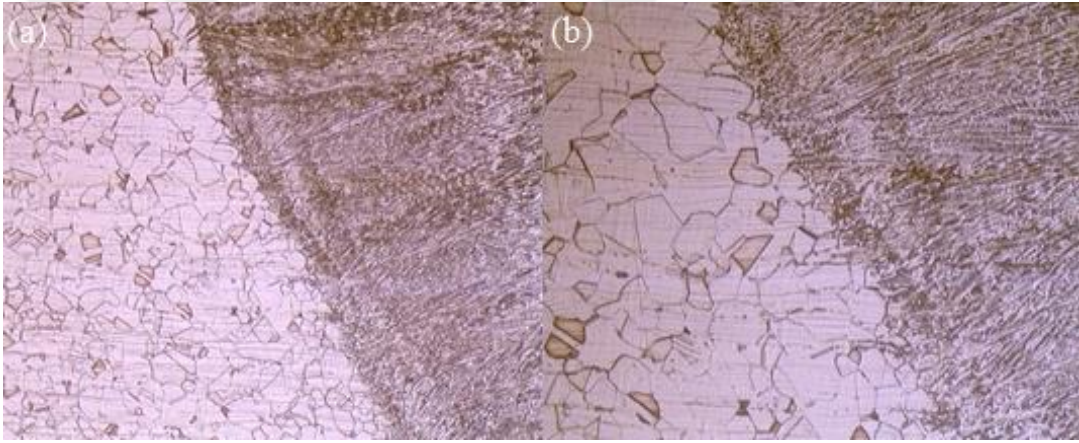


Şekil 4.10. ER 309L ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının kaynak dikişindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X

Düşük ve yüksek ısı girdisi ile üretilen AISI 316L bağlantıların ısıdan etkilenmiş bölge (IEB)'lerindeki mikroyapıları gösteren optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.11 ve 4.12'de verilmektedir. Düşük ve orta ısı girdisi (3,92 ve 4,25 kJ/mm) ile üretilen kaynaklı bağlantıların her ikisinde de belirgin bir IEB gözlenmemiş olup, bu bağlantıların IEB'lerinde baz levha içyapısında önemli bir değişiklik olmamış ve soğuk haddelenmiş östenitik yapı korunmuştur (Şekil 4.11b). Bunun aksine, yüksek ısı girdili bağlantının IEB'de tamamen yeniden kristalleşme sonucu görece daha iri taneli eş eksenli östenit taneler oluşmuştur (Şekil 4.12b).

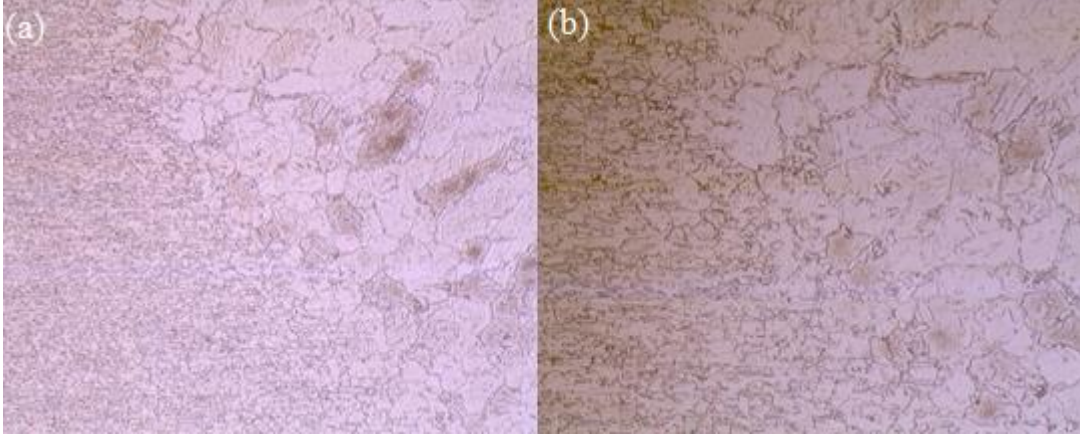


Şekil 4.11. Düşük ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme

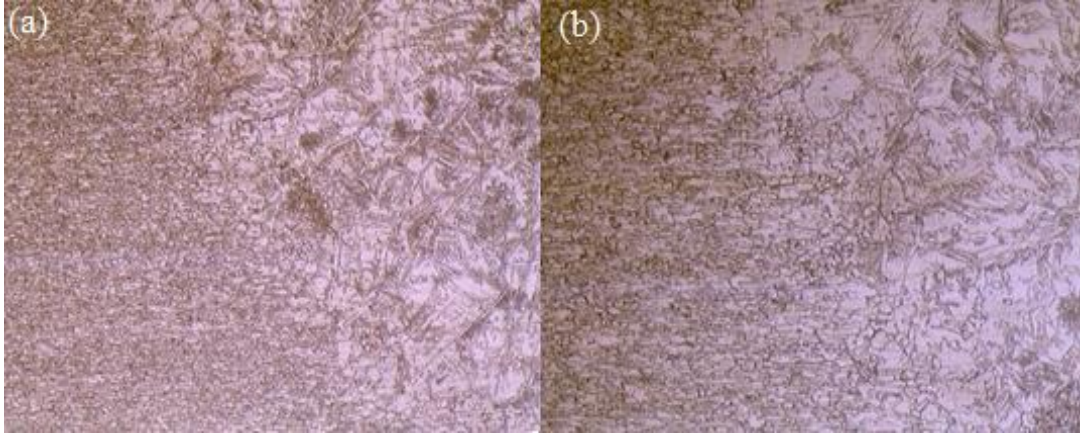


Şekil 4.12. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme

Üç farklı ısı girdisi ile üretilen AISI 318LN bağlantıların ısıdan etkilenmiş bölge (IEB)'lerindeki mikroyapıları gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'te verilmektedir. Düşük ve orta ısı girdisi (3,92 ve 4,25 kJ/mm) ile üretilen kaynaklı bağlantıların her ikisinde de belirgin bir IEB gözlenmemiştir (Şekil 4.13 ve 4.14). Diğer taraftan yüksek ısı girdisi (4,57 kJ/mm) ile elde edilen kaynaklı bağlantıda belirgin dar bir IEB olduğu gözlenmiştir. Bu bağlantının IEB'sinde Şekil 15'ten açıkça görüleceği üzere yeniden kristalleşme gerçekleşmiştir. Bu bağlantının IEB'de yeniden kristalleşme sonucu yüksek ısı girdisi nedeniyle göreceli kaba taneli bir yapı oluşmuş olup, bu bölgedeki içyapı iri ferrit taneleri ve az miktarda tane sınırı östeniti ve tane içi östeniti fazlarından ibarettir. Ayrıca, bu bağlantının IEB'de içyapıda mevcut ferrit fazı östenit fazından daha fazladır.

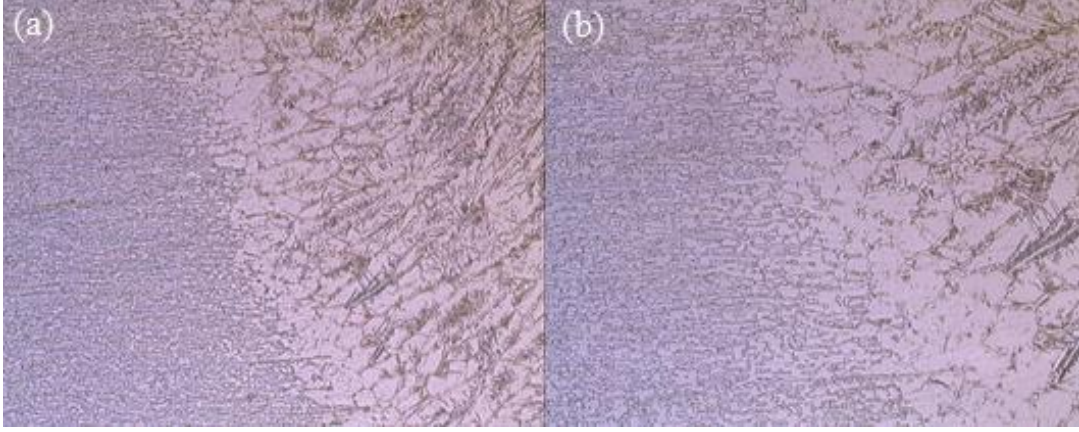


Şekil 4.13. Düşük ısı girdisi ile elde edilen AISI 318LN bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme

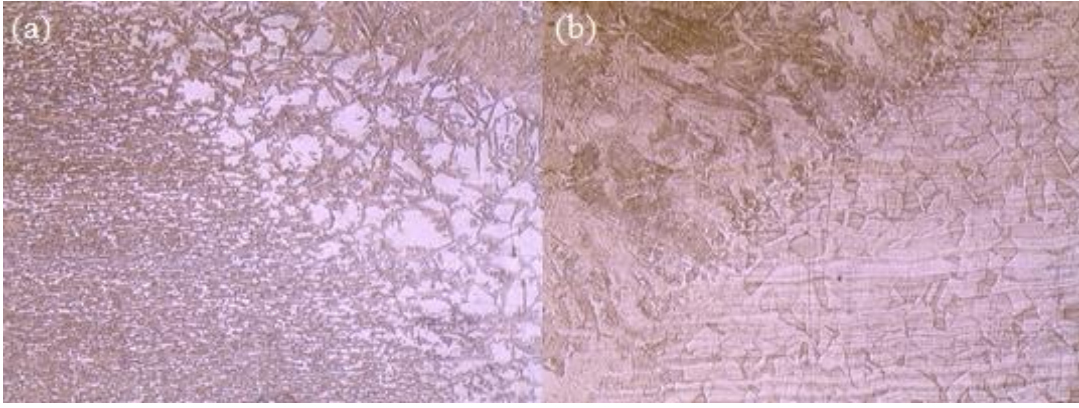


Şekil 4.14. Orta ısı girdisi ile elde edilen AISI 318LN bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme

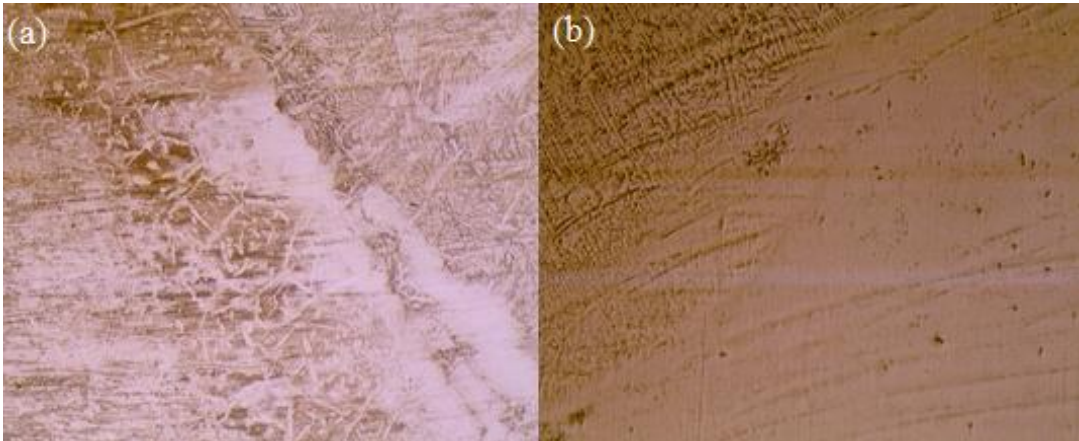
ER2209 dubleks ve ER309L östenitik ilave telleri kullanılarak ve düşük ısı girdisi (3,923 kJ/mm) ile üretilen farklı AISI 316L-AISI 318LN bağlantıların IEB'lerindeki içyapıları gösteren mikro resimler sırasıyla Şekil 4.16 ve 4.17'de verilmektedir. Her iki bağlantının da EB'nin östenitik plaka tarafında belirgin bir IEB oluşmadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, EB'nin dubleks levha tarafında belirgin bir IEB oluşmuştur (Şekil 4.16a ve Şekil 17a). Her iki farklı bağlantının dubleks çelik tarafındaki IEB'de iri taneli bir yapı gözlenmiştir. İçyapısı ferrit bir yapıda olup tane sınırı östeniti ile tane içi östenitinden oluşmaktadır.



Şekil 4.15. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 318LN bağlantının IEB'sindeki içyapı: (a) 10X ve (b) 20X büyütme



Şekil 4.16. ER 2209 ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının IEB içyapıları: (a) kaynak dikişinin dubleks baz levha tarafındaki IEB ve (b) östenitik baz levha tarafındaki IEB (10X büyütme)



Şekil 4.17. ER 309L ilave tel ile elde edilen AISI 316L-AISI 318LN bağlantının IEB içyapıları: (a) kaynak dikişinin dubleks baz levha tarafındaki IEB ve (b) östenitik baz levha tarafındaki IEB (10X büyütme)

4.2. Mekanik Özellikler

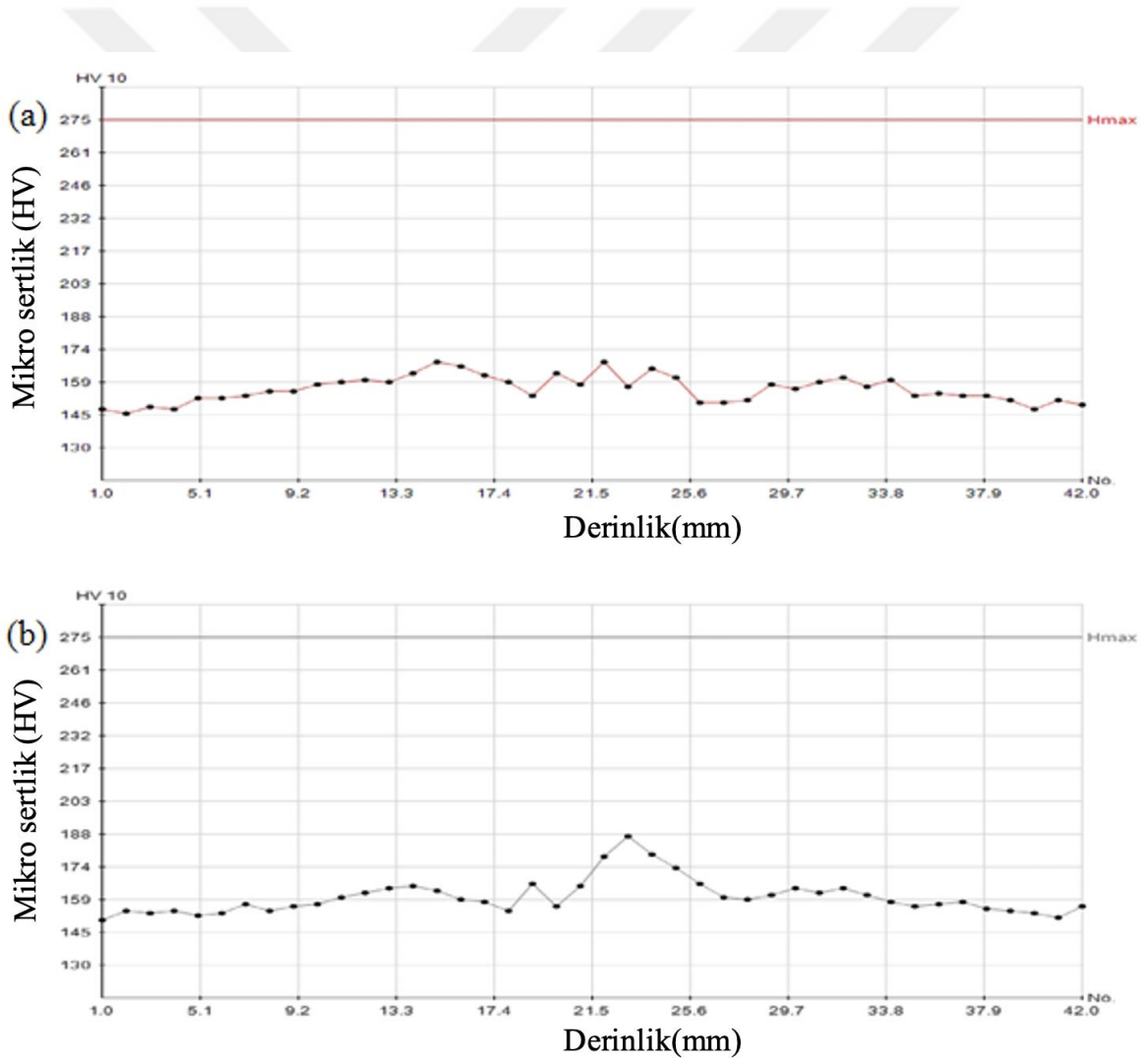
4.2.1 Sertlik

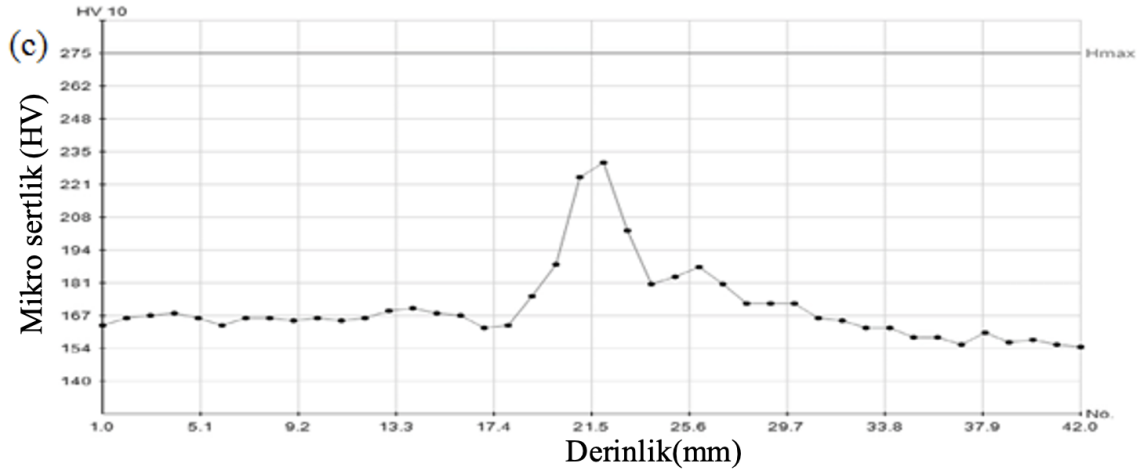
Metalografi deney numuneleri üzerinde kaynak dikişi merkezinde kaynak kesiti boyunca çok sayıda mikro sertlik ölçümü ile ilgili bulgular Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Tüm kaynaklı bağlantılardan elde edilen sertlik ölçümleri ile kaynak kesiti boyunca özellikle IEB’lerde ve ergime bölgesinde sertlik dağılımlarını gösteren sertlik profilleri belirlenmiştir. Şekil 4.18’den görüleceği üzere benzer AISI 316L kaynaklı bağlantılarda kaynak bölgesinde ana metale kıyasla akım değeri ile doğru orantılı olarak artan sertlik değişimleri gözlenmiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerlerini 140 A girdisi ile üretilen bağlantı sergilemiştir (Şekil 4.18c). Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri ile kaynaklı üretilen numunelerin yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantının kaynak dikişinde düşük ısı girdili bağlantıdan daha fazla delta ferrit fazının oluşmasının buna neden olduğu araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir (Şekil 4.4 ve 4.5). Dolayısıyla, bu sonuçlar içyapı incelemeleri ile uyumludur. Tespit edilen sonuçların aksine, Gülenç ve ark. 2005 tarihli çalışmasında GMAK yöntemiyle birleştirilmiş 10 mm kalınlığında 304L östenitik çelik levhaların kaynak bölgesinde sertlik düşüşü olduğunu raporlamışlardır. Bunun nedeni, GMAK yönteminde ısı girdisinin GTAK yönteminden yüksek olması ve özellikle de kalın levhalarda daha fazla ısı girdisi ile kaynak yapılması sonucu, daha fazla ısı girdisinin ergime bölgesinde daha iri bir dendritik yapı oluşturmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca soğuma hızının daha fazla olduğu ve bunun sonucu ergime bölgesinde daha ince taneli bir dendritik yapının oluştuğu lazer kaynaklı östenitik bağlantıların kaynak bölgesinde de, bu çalışmada olduğu gibi, belirli bir sertlik artışı olduğunu raporlamışlardır (Çam ve ark., 1998; Çam ve ark., 1999).

Diğer taraftan benzer AISI 318LN kaynaklı bağlantılarda düşük ısı girdisi ile (3,99 kJ/mm) üretilen bağlantı hariç kaynak dikişi ve IEB’de ana metale göre önemli ölçüde bir sertlik değişimi gözlenmemiştir. Sadece düşük ısı girdili bağlantının kaynak bölgesinde baz levha sertliğine nazaran çok az bir sertlik artışı söz konusudur. İlaveten, bu bağlantıların kaynak dikişi bölgesinde akım değeri arttıkça sertlik düşüşü gerçekleşmiştir (Şekil 4.19). Şekilden görüleceği üzere en yüksek sertlik değeri en düşük ısı girdisi ile yapılan kaynaklı bağlantının kaynak dikişinde ölçülmüştür. Bu bağlantının aksine orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen bağlantılar kaynak bölgesinde herhangi bir sertlik artışı sergilememiş olup, her iki bağlantının kaynak kesiti boyunca homojen bir sertlik dağılımı gözlenmiştir. Hatta

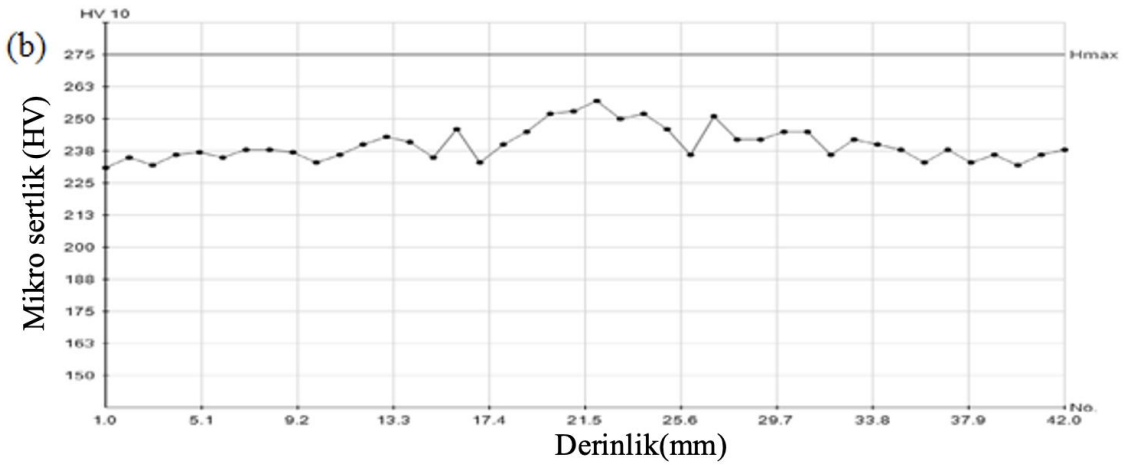
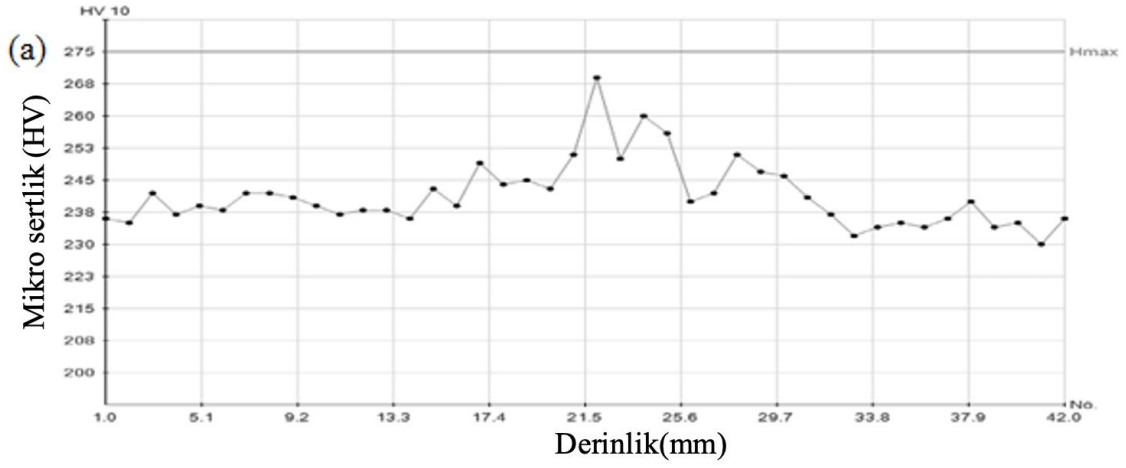
orta ve yüksek ısı girdili bağlantıların IEB'lerinde baz malzemeye göre lokal çok düşük miktarda sertlik düşüşü de gözlenmiştir.

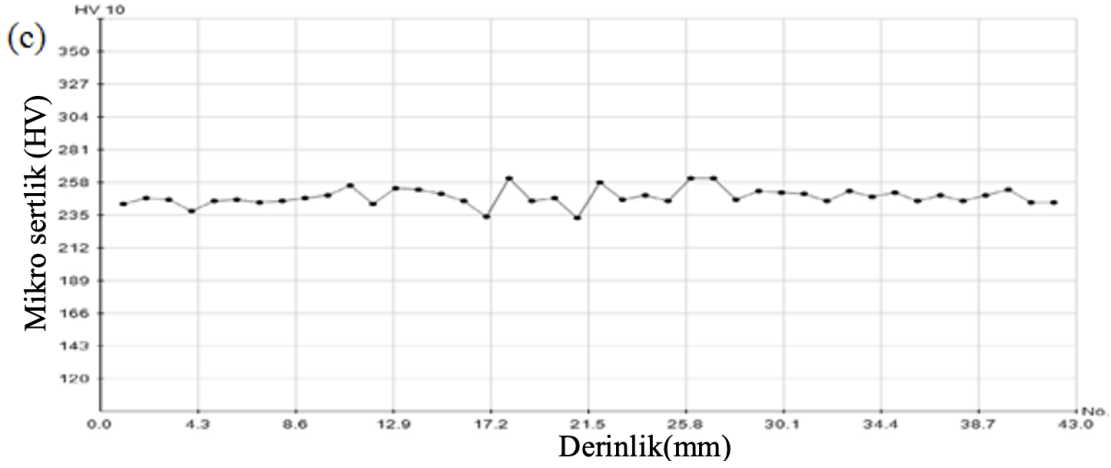
Şekil 4.20'den görüleceği üzere farklı ilave tel kullanılarak aynı kaynak parametreleri ile (ısı girdisi ile) gerçekleştirilen farklı AISI316L-AISI 318LN kaynaklı bağlantılarda ise kaynak kesiti boyunca kaynak dikişi bölgesinde iki baz malzeme sertlikleri arasında bir sertlik değeri ölçülmüştür. Diğer bir deyişe yüksek sertliğe sahip baz malzeme sertliğinden düşük sertlik değerine sahip malzeme sertliğine doğru bir düşüş gözlenmiştir. Ancak, ER2209 ilave tel ile üretilen bağlantının kaynak dikişindeki sertlik değeri ER309L ilave tel ile yapılan kaynaklı bağlantıya nazaran daha yüksektir.



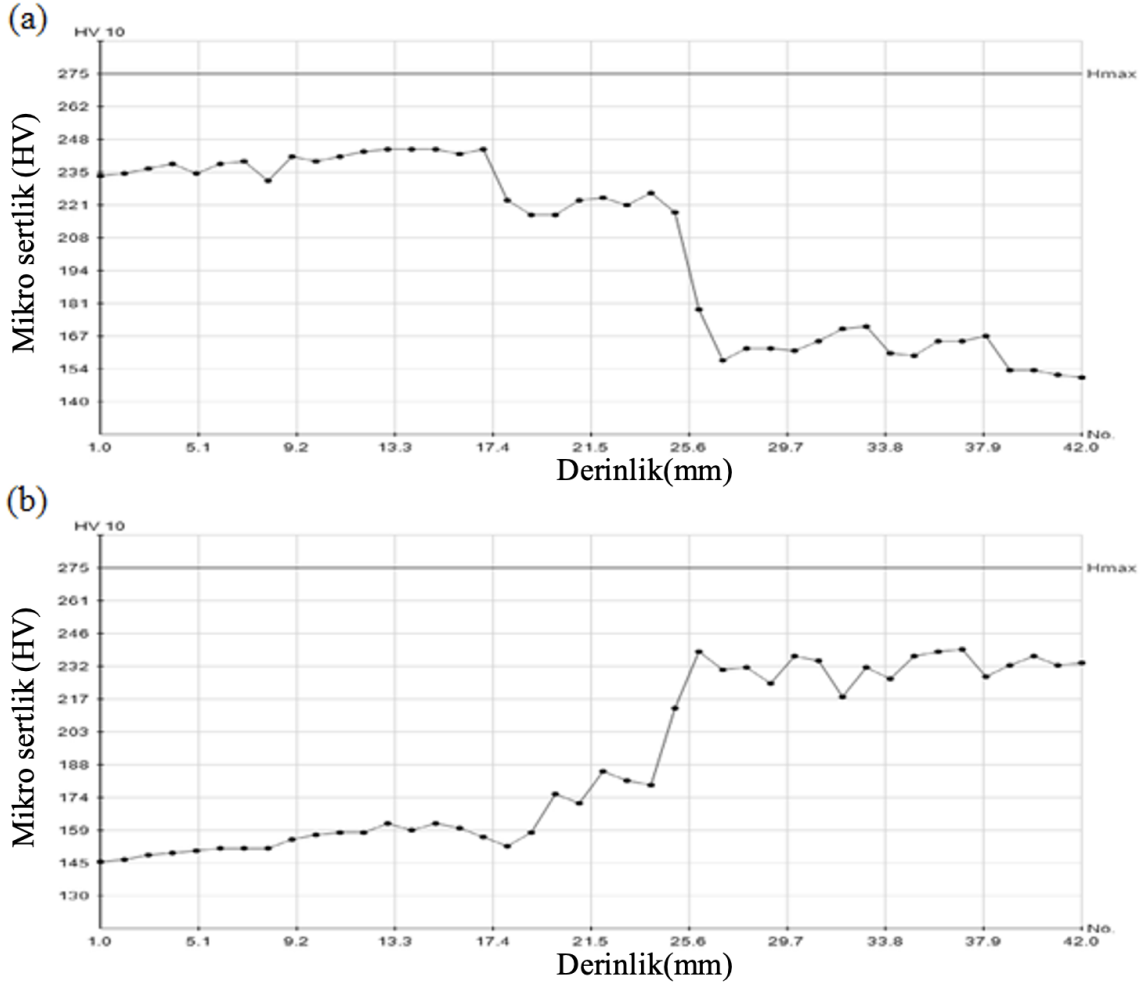


Şekil 4.18. Benzer 316L-316L bağlantılarında kaynak kesitindeki sertlik değişimini gösteren sertlik profilleri: (a) düşük, (b) orta ve (c) yüksek ısı girdili bağlantı





Şekil 4.19. Benzer 318LN-318LN bağlantılarında kaynak kesitindeki sertlik değişimini gösteren sertlik profilleri: (a) düşük, (b) orta ve (c) yüksek ısı girdili bağlantı



Şekil 4.20. Farklı 316L-318LN kaynaklı bağlantılarda kaynak kesitindeki sertlik değişimini gösteren sertlik profilleri: (a) ER2209 ve (b) ER309L ilave tel

Aslında Şekil 4.20'den de açıkça görüleceği üzere, 2209 dubleks ilave tel ile yapılan bağlantının kaynak dikişi sertliği AISI 318LN dubleks baz plaka sertliğine yakın iken, 309L östenitik ilave tel ile yapılan bağlantının kaynak dikişi sertliği AISI 316L östenitik baz plaka sertliğine yakındır ki bu beklenen bir durumdur. Bunun nedeni, içyapı bölümünde de tartışıldığı gibi ER2209 ilave tel ile elde edilen bağlantının kaynak dikişinin ferrit ve östenit fazlarının bir karışımından oluşması (Şekil 4.9) diğer taraftan ER309L ile elde edilen bağlantının kaynak dikişi yapısının ise ağırlıklı olarak östenit fazı ve az miktarda delta ferrit içermesidir (Şekil 4.10), yani ağırlıklı olarak östenitik yapıda olmasıdır. Bu sonuçlar dubleks paslanmaz plaka ile 2209 ilave telin daha iyi sonuç verdiği göstermektedir.

4.2.2 Çekme ve Bükme Deneyleri

Birleştirilmiş levhaların ve baz plakaların mekanik özelliklerini incelemek ve kaynaklı bağlantıların süneklik ve mukavemet cinsinden kaynak performans değerlerini belirleme amacıyla yapılan çekme deneyleri sonuçları AISI 316L numuneler için Çizelge 4.1'de, AISI 318LN numuneler için Çizelge 4.2'de ve farklı 316L-318LN bağlantı numuneleri için Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.2 ve 4.3'te sırasıyla AISI 316L ve AISI 318LN numunelerin süneklik ve mukavemet performans değerleri de verilmiştir. Çizelge 4.3 ve 4.4'te de farklı 316L-318LN bağlantı numunelerinin sırasıyla AISI 316L baz metal (BM) ve AISI 318LN BM'e göre göre süneklik ve mukavemet performans değerleri de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AISI 316L BM ve kaynaklı bağlantı numuneleri için çekme deneyi sonuçları

Numune	R _{P0.2} (MPa)	σ	R _m (MPa)	σ	Süneklik (%)	σ	Mukavemet Performansı (%)	Süneklik Performansı (%)
Baz malzeme	287, 290, 287, 295 (290)	3.8	569, 568, 565, 570 (568)	2.2	53, 50, 51, 50 (51)	1.4	---	---
Düşük ısı girdisi	293, 286, 296, 306 (295)	8.3	578, 568, 574, 578 (575)	4.7	44, 51, 45, 42 (46)	3.9	102	90
Orta ısı girdisi	309, 287, 300, 306 (301)	9.7	576, 553, 578, 576 (571)	11	47, 46, 47, 48 (47)	0.8	101	92
Yüksek ısı girdisi	302, 306, 308, 302 (305)	3	585, 583, 585, 581 (584)	1.9	44, 46, 46, 43 (45)	1.5	103	88

Şekil 4.21'de AISI 316L baz levhadan çıkarılan numunelerin gerilme-%uzama eğrileri verilirken Şekil 4.22, 23 ve 24'te sırasıyla düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen

numunelerin gerilme-%uzama eğrileri verilmiştir. Şekil 4.25 AISI 318LN baz levhadan çıkarılan numunelerin gerilme-%uzama eğrilerini ve Şekil 4.26, 27 ve 28’de sırasıyla düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile üretilen numunelerin gerilme-%uzama eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.28 ve 29’da da sırasıyla dubleks ve östenitik ilave tel ile elde edilen kaynaklı bağlantıların gerilme-%uzama eğrileri verilmektedir.

Çizelge 4.2. AISI 318LN BM ve kaynaklı bağlantı numuneleri için çekme deneyi sonuçları

Numune	R _{p0.2} (MPa)	σ	R _m (MPa)	σ	Süneklik (%)	σ	Mukavemet Performansı (%)	Süneklik Performansı (%)
Baz malzeme	607, 607, 608, 600 (606)	3.7	807, 811, 809, 806 (808)	2.2	26, 26, 26, 25 (26)	0.5	---	---
Düşük ısı girdisi	615, 619, 624, 618 (619)	3.7	757, 760, 777, 799 (773)	19	9, 7, 9, 13 (10)	2.5	96	38
Orta ısı girdisi	618, 622, 609, 611 (615)	6	826, 821, 745, 759 (788)	42	22, 22, 7, 9 (15)	8.1	98	58
Yüksek ısı girdisi	620, 626, 596, 602 (633)	14	833, 831, 827, 816 (828)	7.6	25, 21, 28, 22 (23)	3.2	102	88

Çizelge 4.3. Farklı 316L-318LN bağlantıların AISI 316L baz levhaya göre süneklik ve mukavemet performans değerleri

Numune	R _{p0.2} (MPa)	σ	R _m (MPa)	σ	Süneklik (%)	σ	Mukavemet Performansı (%)	Süneklik Performansı (%)
316L BM*	287, 290, 287, 295 (290)	3.8	569, 568, 565, 570 (568)	2.2	53, 50, 51, 50 (51)	1.4	---	---
ER2209	339, 320, 327, 318 (329)	9.5	586, 585, 590, 583 (586)	3.3	21, 24, 21, 22 (22)	1.4	103	43
ER309L	326, 298, 332, 321 (319)	15	592, 589, 584, 590 (589)	3.4	26, 23, 21, 27 (24)	2.7	104	47

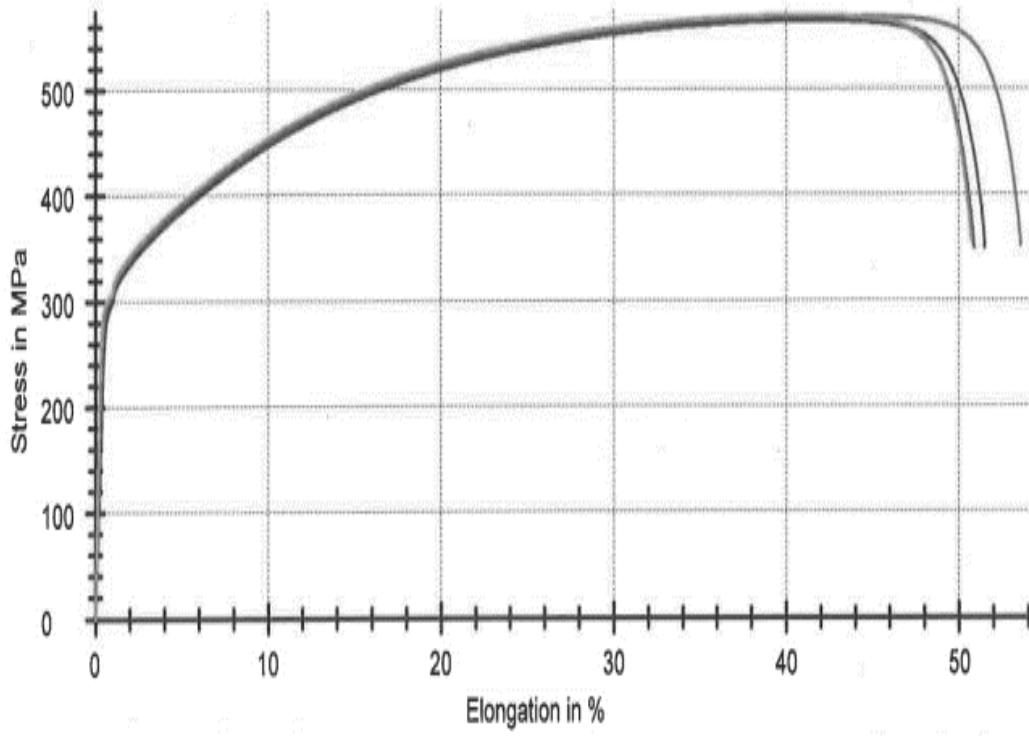
(*BM: Baz Metal)

Çizelge 4.4. Farklı 316L-318LN bağlantıların AISI 318LN baz levhaya göre süneklik ve mukavemet performans değerleri

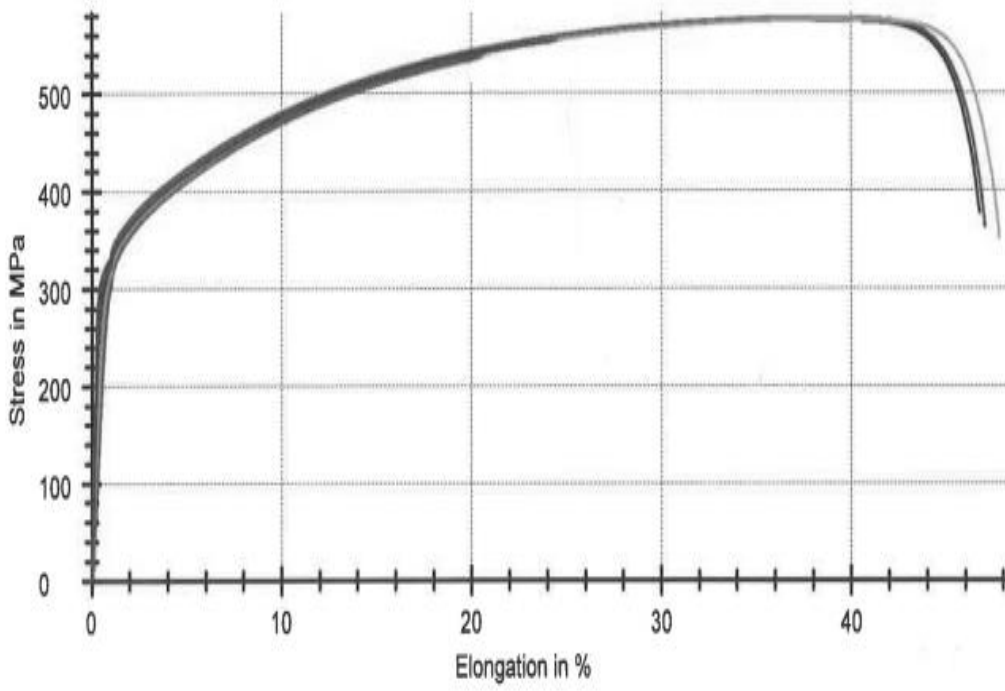
Numune	R _{p0.2} (MPa)	σ	R _m (MPa)	σ	Süneklik (%)	σ	Mukavemet Performansı (%)	Süneklik Performansı (%)
318LN BM*	607, 607, 608, 600 (606)	3.7	807, 811, 809, 806 (808)	2.2	26, 26, 26, 25 (26)	0.5	---	---
ER2209	339, 320, 327, 318 (329)	9.5	586, 585, 590, 582 (586)	3.3	21, 24, 21, 22 (22)	1.4	72	84
ER309L	326, 298, 332, 321 (319)	15	592, 589, 584, 590 (589)	3.4	26, 23, 21, 27 (24)	2.7	73	92

(*BM: Baz Metal)

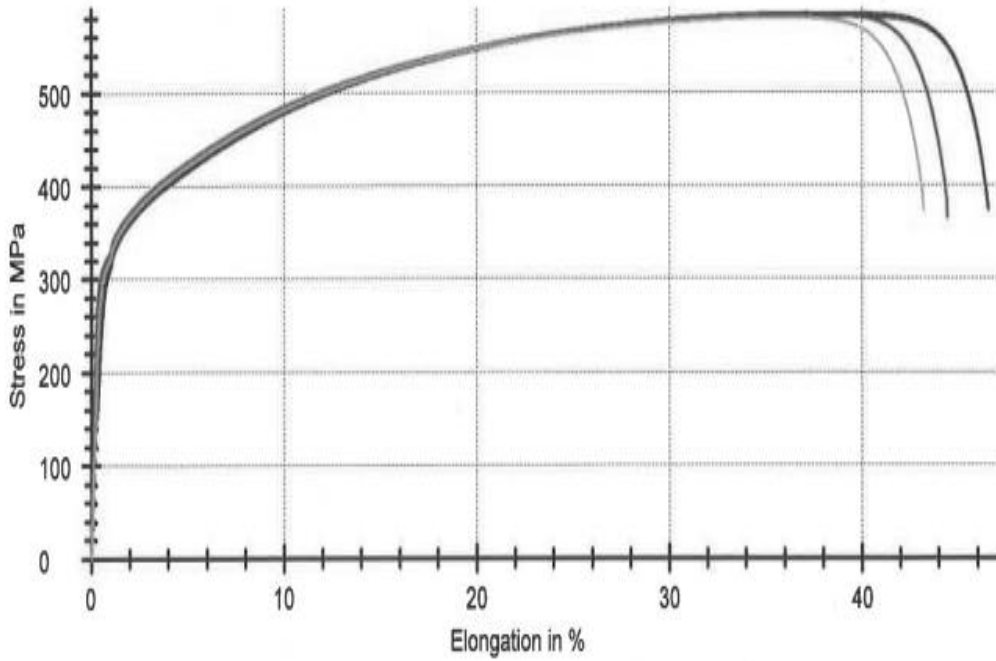
AISI 316L BM ve düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L-AISI 316L kaynaklı bağlantılardan hazırlanan çekme numunelerinin çekme testi sonrası görünüşleri sırasıyla Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmektedir. AISI 318LN BM ve farklı ısı girdili kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası görünümünü gösteren makro resimler de sırasıyla Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de verilmiştir. Son olarak ER2209 dubleks ve ER309L östenitik ilave tel ile üretilen farklı 316L-318LN kaynaklı bağlantılardan çıkarılan çekme numunelerinin çekme deneyi sonrası görünüşleri de sırasıyla Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



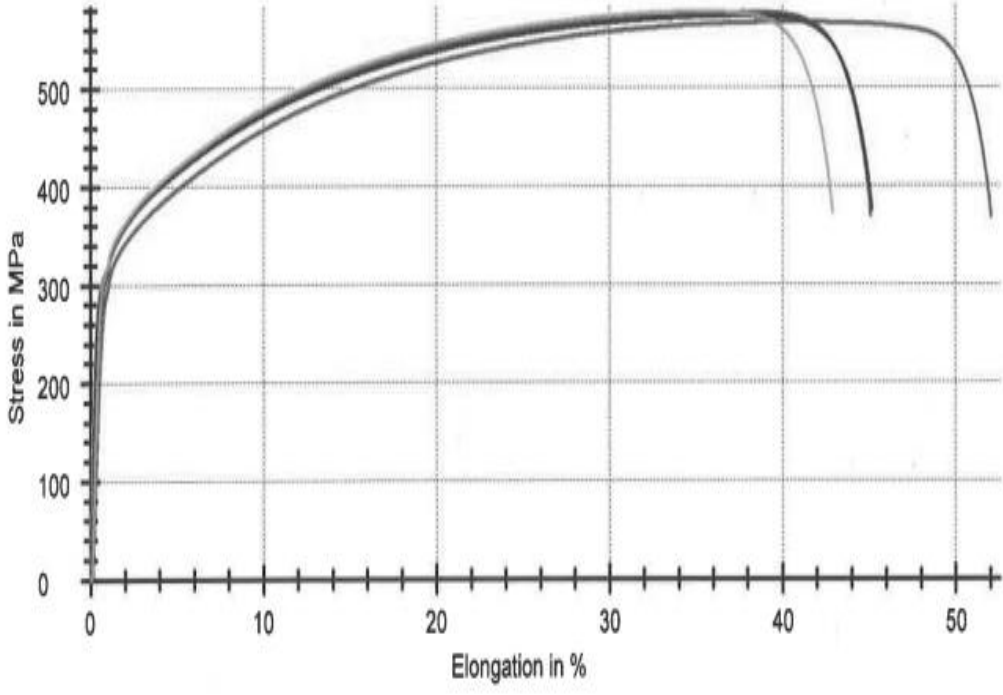
Şekil 4.21. AISI 316L ana metalin gerilme-yüzde uzama eğrileri



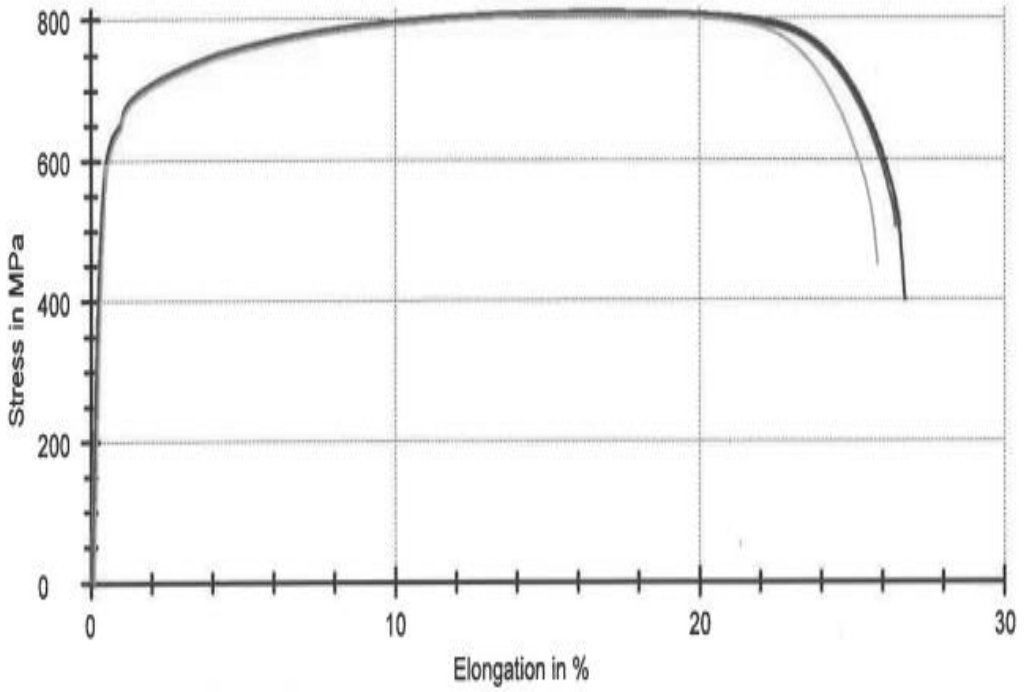
Şekil 4.22. Düşük ısı girdili 316L-316L bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



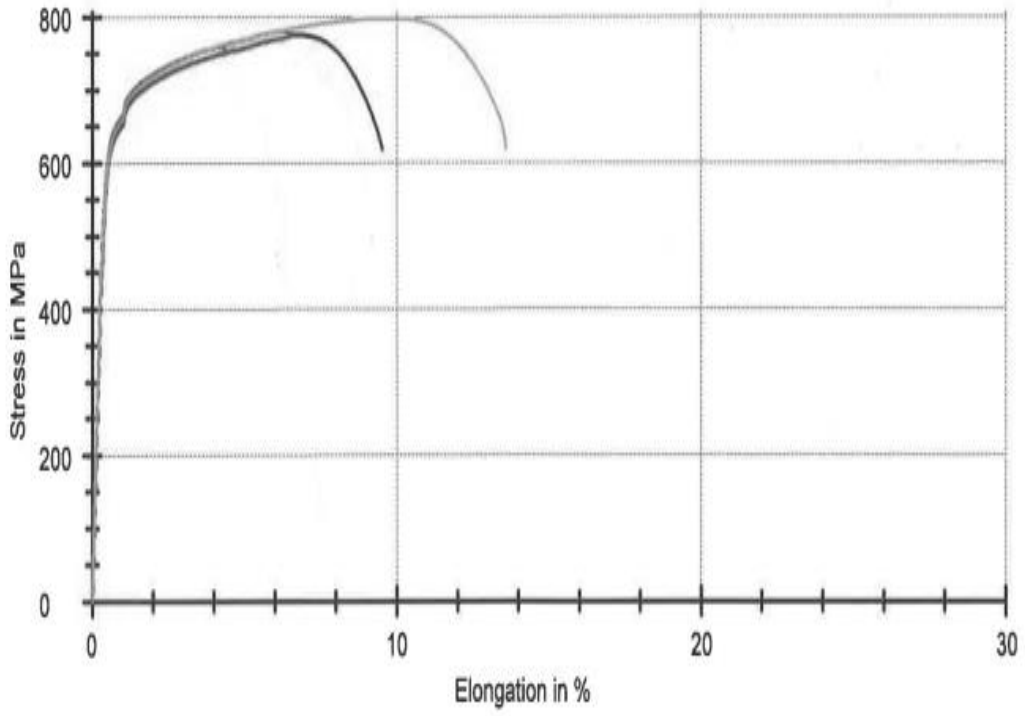
Şekil 4.23. Orta ısı girdili 316L-316L bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



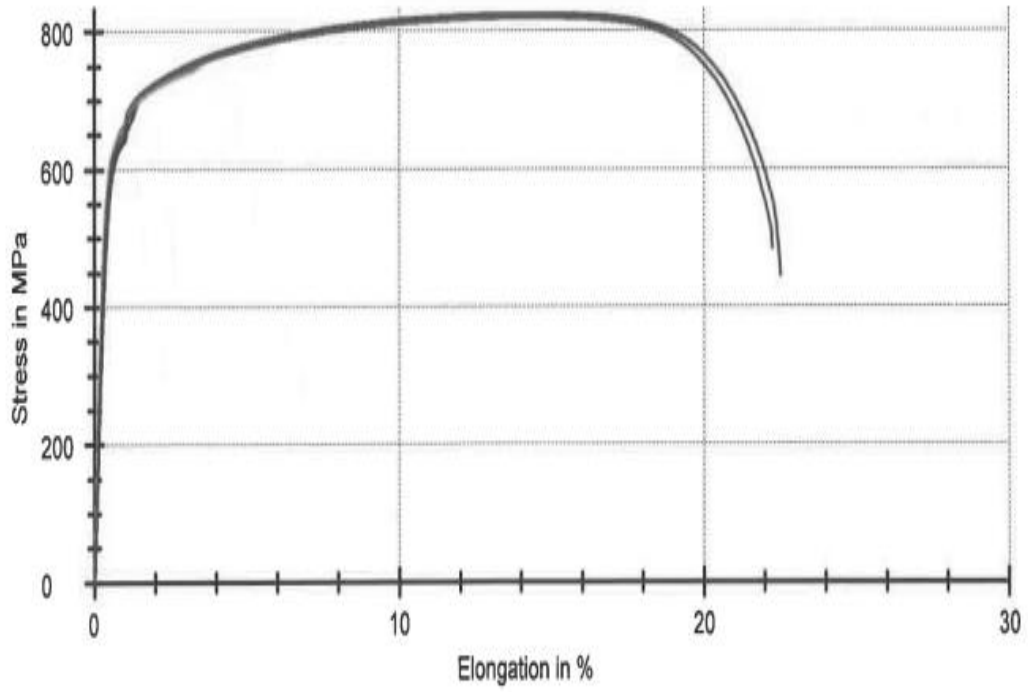
Şekil 4.24. Yüksek ısı girdili 316L-316L bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



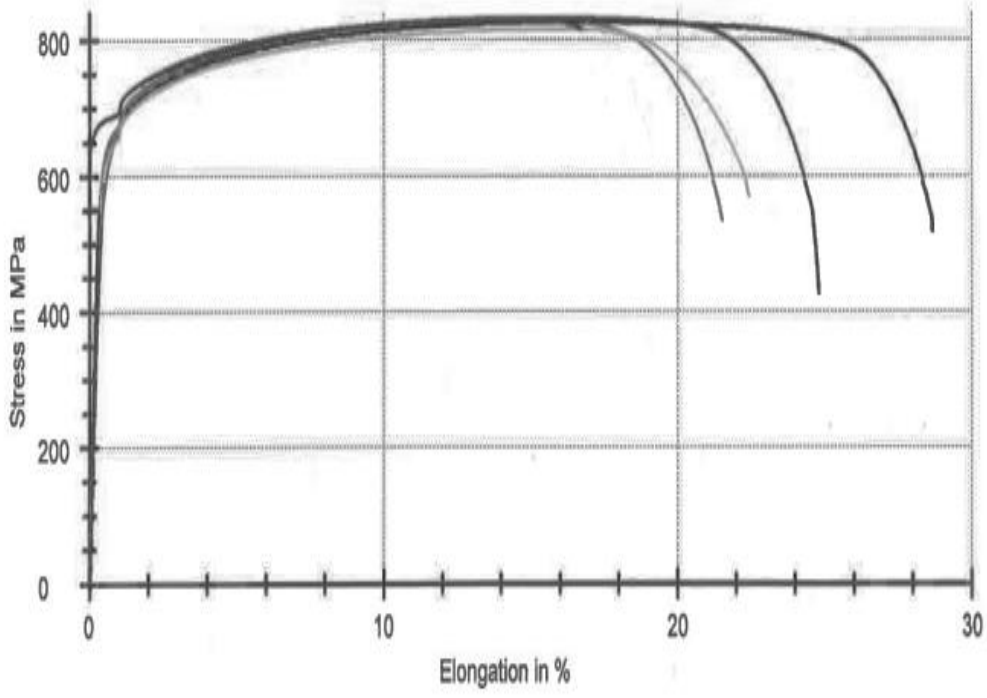
Şekil 4.25. AISI 318LN ana metalin gerilme-yüzde uzama eğrileri



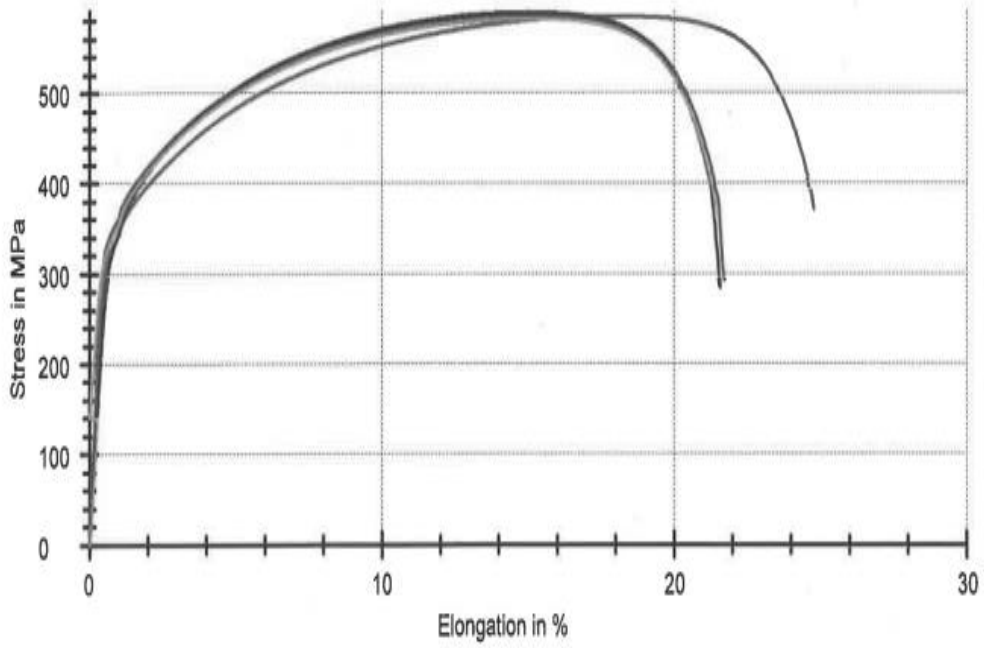
Şekil 4.26. Düşük ısı girdili 318LN-318LN bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



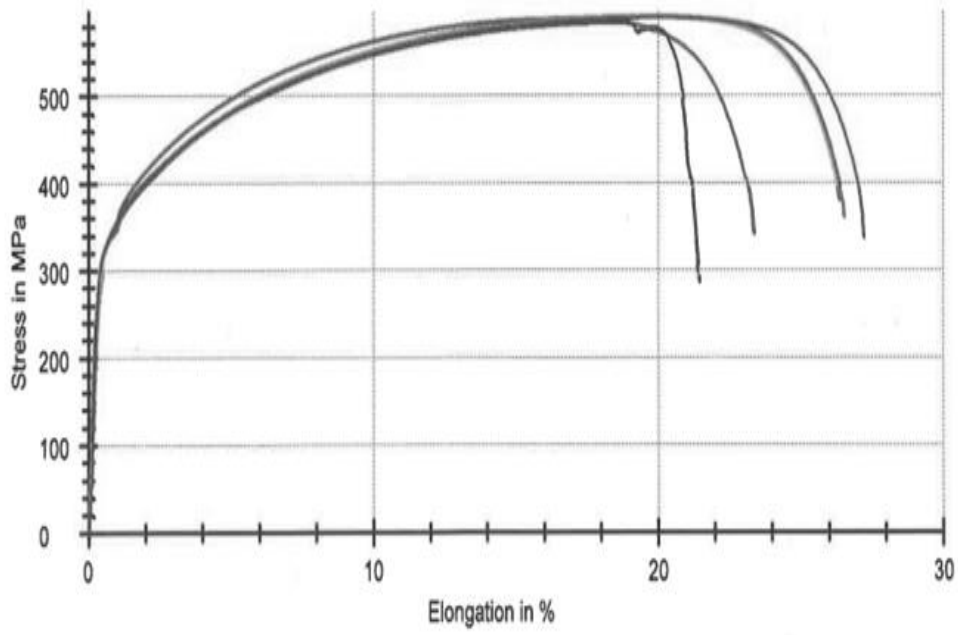
Şekil 4.27. Orta ısı girdili 318LN-318LN bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



Şekil 4.28. Yüksek ısı girdili 318LN-318LN bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



Şekil 4.29. ER2209 ilave tel ile üretilen farklı 316L-318LN bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



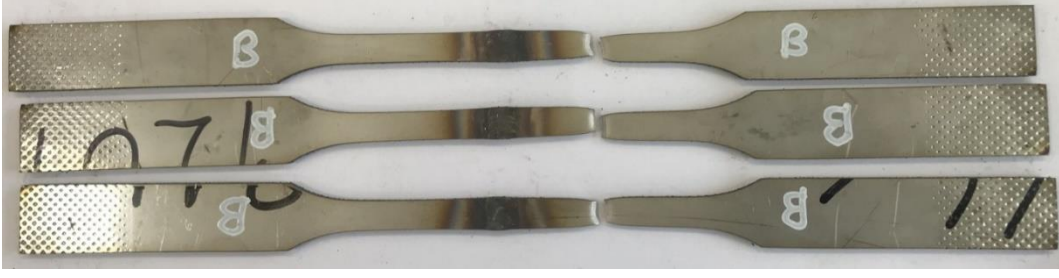
Şekil 4.30. ER309L ilave tel ile üretilen farklı 316L-318LN bağlantının gerilme-yüzde uzama eğrileri



Şekil 4.31. AISI 316L BM çekme numunelerinin test sonrası görünümü



Şekil 4.32. Düşük ısı girdili 316L-316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



Şekil 4.33. Orta ısı girdili 316L-316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



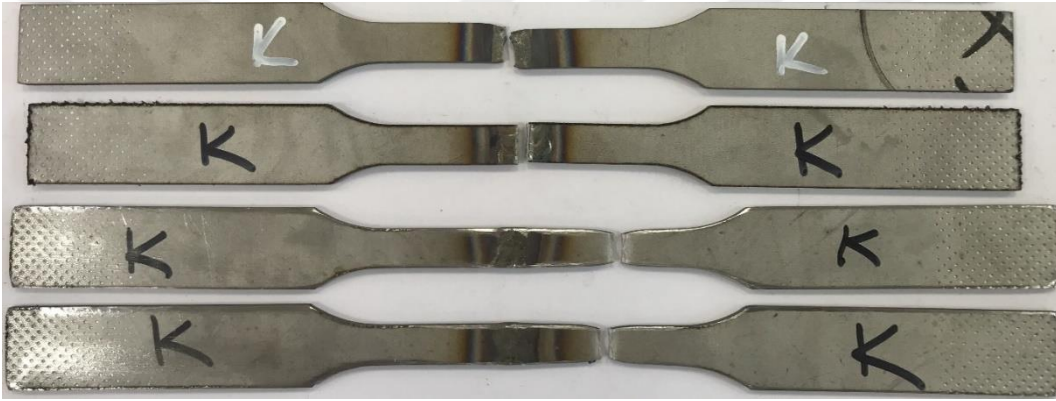
Şekil 4.34. Yüksek ısı girdili 316L-316L kaynaklı bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



Şekil 4.35. AISI 318LN BM çekme numunelerinin test sonrası görünümü



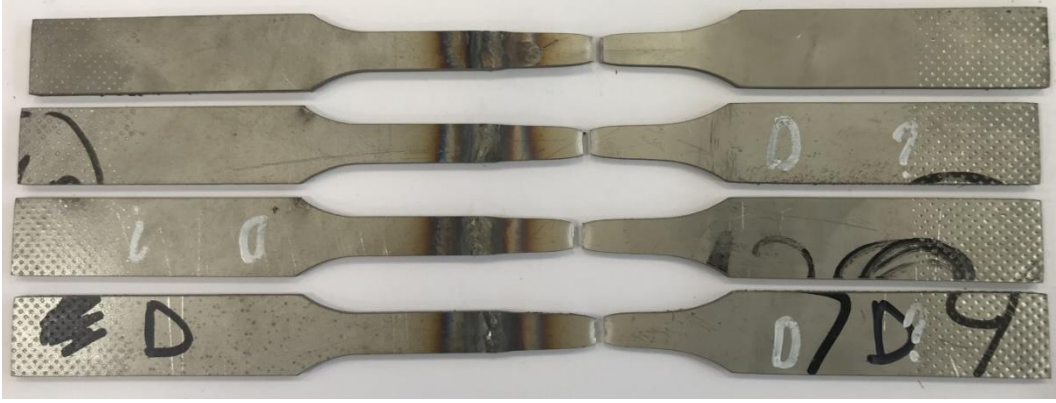
Şekil 4.36. Düşük ısı girdili 318LN-318LN bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



Şekil 4.37. Orta ısı girdili 318LN-318LN bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



Şekil 4.38. Yüksek ısı girdili 318LN-318LN bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



Şekil 4.39. ER2209 ilave tel ile birleştirilen farklı 316L-318LN bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri



Şekil 4.40. ER309L ilave tel ile birleştirilen farklı 316L-318LN bağlantısından çıkarılan çekme numunelerinin test sonrası makro resimleri

Çizelge 4.1'den ve Şekil 4.21-24'ten açıkça görüleceği gibi, benzer 316L-316L kaynaklı levhala numunelerin hepsi ana metal numunelerinden daha yüksek çekme mukavemeti ve akma gerilmesi göstermiştir. Dolayısıyla düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile üretilen kaynaklı levhaların mukavemet cinsinden kaynak performans değerleri sırasıyla % 102, % 101, % 103 olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan tüm ısı girdisi değerleri ile elde edilen tüm kaynaklı levha numuneleri benzer mukavemet performansı değerleri sergilemiştir. Ancak, yüksek ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantı en yüksek mukavemet performansını (%103) göstermiştir. Bu sonuçlar benzer 316L-316L kaynak bağlantısı için yapılan çalışmada kullanılan ısı girdisi aralığının çekme zorlamasında kaynak mukavemet performansına önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Diğer taraftan, her üç kaynaklı levhanın da süneklik cinsinden kaynak performansı da yaklaşık %90 olup, kaynaklı levha numunelerinin tümü ana metal numunelerinden daha düşük % uzama değerleri sergilemiştir. En düşük süneklik performansını yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantı numuneleri sergilemiştir (%88). Bunun nedeni, çekme numunelerinde gerçekleşen plastik şekil değişiminin homojen olmamasıdır. Özellikle yüksek ısı girdili kaynaklı

bağlantının kaynak dikişi mukavemeti baz plakadan fazla olduğu (kaynak dikişinde mukavemet artışı olduğu) için çekme deneyi esnasında elastik bölgede kalarak plastik şekil değişimine katkıda bulunmamıştır. Dolayısıyla, plastik şekil değişimi sadece numunenin kaynak dikişi bölgesi dışındaki bölgelerinde meydana geldiği için %uzama değeri düşük çıkmıştır. Benzer sonuçlar, kaynak dikişinde mukavemet artışı (strength overmatching) olan lazer veya sürtünme karıştırma kaynaklı çelik ve sürtünme karıştırma kaynaklı bakır alaşımı bağlantılarda da rapor edilmiştir (Çam ve ark., 1998; Çam ve ark., 1999; Çam ve ark., 2017; Küçükömeroğlu ve ark., 2108a; Küçükömeroğlu ve ark., 2109; Çam ve ark., 2008; Çam ve ark., 2009).

Benzer AISI 318LN-AISI 318LN kaynaklı bağlantılarda ise Çizelge 4.2, Şekil 4.25-28'den görüleceği üzere, çıkarılan numunelerin orta ısı girdili kaynak birleştirmesinin iki tanesinde ve yüksek ısı girdili kaynak birleştirmesinin bir tanesinde kaynak kusuru oluşmuş ve çizelgelere dahil edilmemiştir. Düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıdan çıkarılan numunelerin tamamı kaynak dikişinden kopmuştur (Şekil 4.36). Diğer taraftan, orta ısı girdili bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinden ikisi kaynak dikişi içerisinden ve diğer ikisi IEB'ye belirli bir mesafede baz levha içerisinden kırılmıştır. Yüksek ısı girdisi ile elde edilen bağlantı numunelerinden sadece biri kaynak dikişinden koparken, diğer üç numune baz malzemenin IEB'ye yakın kısmından kopmuştur. Bu sonuçlar, içyapı incelemeleri ile uyumlu olup, düşük ısı girdili bağlantının kaynak dikişinde ferrit-östenit faz dengesinin bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla düşük, orta ve yüksek ısı girdili kaynaklı levhaların mukavemet cinsinden kaynak performans değerleri sırasıyla % 96, % 98 ve % 102 olarak, süneklik performansı da sırasıyla ortalama %38, %58 ve %88 olup tüm kaynaklı levha numuneleri ana metalden daha düşük yüzde uzama sergilemiştir. Düşük ve orta ısı girdili kaynaklı levhalar düşük mukavemet performansı sergilerken, yüksek ısı girdili bağlantının en yüksek mukavemet performansı (%102) sergilemesinin nedeni bu bağlantının kaynak dikişinde ferrit-östenit dengesinin daha iyi korunmasının (Şekil 4.8) bir sonucudur. Diğer taraftan, Çizelge 3'ten görüleceği üzere kaynaklı bağlantı numunelerinin %uzama değerleri baz levhadan belirgin bir şekilde düşüktür. Bunun sebebinin kaynaklı bağlantı numunelerinin homojen olmamasının olduğu düşünülmektedir. En düşük süneklik performansını düşük ısı girdili bağlantı göstermiştir (%38). Bu kırılmanın kaynak dikişinde gerçekleşmesi ve bu numunelerde baz levhada uzama meydana gelmemesi ve dolayısıyla plastik şekil değiştirmenin kaynak bölgesiyle sınırlı olmasından kaynaklıdır. Diğer taraftan, en yüksek süneklik performansı(%88)

yüksek ısı girdisi ile üretilen bağlantı numuneleri tarafından sergilenmiştir. Bu sonuç, kaynak dikişinde ferrit-östenit dengesinin daha iyi korunmasına bağlı olup numunelerin biri hariç diğerlerinin baz levhadan kırılması ile uyumludur. Benzer sonuçlar, kaynak bölgesinde yüksek mukavemet gösteren kaynaklı bağlantılarda da gözlenmektedir (Çam ve ark., 1998; Çam ve ark, 2017; Küçükömeroğlu ve ark, 2018). Ayrıca, sadece kaynak bölgesinin plastik şekil değiştirdiği kaynak dikişinde aşırı mukavemet kaybı olan yüksek mukavemetli Al-alaşımı kaynaklı bağlantılarda (Ahmed ve ar., 2023; Çam, 2022; Çam, 2003; Çam, 2005; Çam, 2007; Çam ve ark., 2023; Çam ve ark., 2008; İpekoğlu ve Çam, 2019; İpekoğlu ve ark, 2017; İpekoğlu ve ark, 2018;) ve difüzyon kaynaklı farklı malzemelerin kaynağında (Çam ve ark., 1997; Koçak ve ark., 2002) genellikle çok daha düşük süneklik performansı değerleride rapor edilmiştir

ER2209 ilave tel kullanılarak yapılan farklı 316L-318LN kaynaklı bağlantıdan elde edilen tüm çekme numuneleri kaynak bölgesi dışında ana metal içerisinden kopmuştur (Şekil 4.39). Çizelge 4.4 ve Şekil 4.29'dan görüleceği üzere bu kaynaklı levhadan çıkarılan numunelerin tamamı AISI 316L baz plaka numunelerinden daha yüksek çekme mukavemeti ve akma gerilmesi göstermiştir. Dolayısıyla bu kaynaklı levhanın mukavemet performans değeri % 103 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan, kaynaklı levha numuneleri baz plakadan çıkarılan numunelerden daha düşük % uzama değerleri göstermiş olup, bu bağlantının süneklik performansı oldukça düşüktür (%43). Bu sonucun kaynak dikişindeki sertlik değerinin 318LN baz levhaya yakın olması nedeniyle çekme deneyinde kaynak dikişinde ve numunenin AISI318LN baz plaka tarafında (yani numune boyunun yarısından fazlasında) plastik şekil değişimi olmamasıdır. Benzer şekilde, ER309L ilave tel kullanılarak yapılan farklı 316L-318LN kaynaklı bağlantıdan çıkarılan tüm çekme numuneleri de kaynak bölgesinden uzakta ana metalden kopmuştur (Şekil 4.40). Çizelge 4.4 ve Şekil 4.30'dan görüleceği üzere ER309L ilave tel ile elde edilen bağlantı numunelerinin tamamı da AISI 316L baz plaka numunelerinden daha yüksek çekme mukavemeti ve akma gerilmesi göstermiştir. Dolayısıyla bu kaynaklı levhanın mukavemet performans değeri de ER2209 ilave teli le üretilen bağlantıya benzer olup, % 104 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan, bu kaynaklı levha numuneleri de baz plakadan çıkarılan numunelerden daha düşük % uzama değerleri göstermiş olup, bu bağlantının süneklik performansı oldukça düşüktür (%47). Ancak bu bağlantının süneklik performansı ER2209 ile elde edilen bağlantıdan yüksektir. Bunun nedeni bu bağlantının kaynak dikişindeki sertlik değerlerinin AISI 316L baz plaka sertlik değerlerine yakın olması sonucu çekme

deneyinde kaynak dikişinde de plastik şekil değişimi olmasındır. Bu sonuç piyasada farklı paslanmaz çelik levhaların kaynak birleştirme işlemlerinde neden ER309L östenitik ilave kaynak telinin tercih edildiğini tekrar bizlere göstermiştir. Hala süneklik performansının düşük olmasının nedeni ise, yukarıda bahsedildiği gibi numunenin yarısını oluşturan AISI318LN baz plaka tarafının çekme deneyi esnasında elastik bölgede kalması ve plastik şekil değişimine uğramadığı için %uzama değerine katkı yapmamasıdır. Benzer sonuçlar sadece düşük mukavemetli baz plakanın çekme deneyinde plastik şekil değiştirdiği farklı metallere kaynaklı birleştirmeleri için de birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (İpekoğlu ve Çam, 2012; Serindağ ve Çam, 2021).

Tüm kaynaklı bağlantılardan (düşük, orta ve yüksek ısı girdili) çıkarılan bükme numunelerinin tümünde yüzey bükme ve kök bükme şartlarında çatlama meydana gelmemiştir. Bu sonuçlar, tüm kaynaklı bağlantıların bükme iyi performans sergilediklerini göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

3 mm kalınlığındaki AISI 316L östenitik ve AISI 318LN dubleks paslanmaz çelik levhalar hem kendi aralarında üç farklı ısı girdisi (3,92 kJ/mm, 4,25 kJ/mm ve 4,57 kJ/mm) kullanılarak hem de aynı kalınlıktaki bu farklı paslanmaz çelik levhalar birbiri ile iki farklı ilave tel (ER 2209 ve ER 309L) kullanılarak GTAK yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin araştırıldığı bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm üretilen kaynaklı bağlantılarda çatlak ve porozite gibi herhangi bir süreksizlik tespit edilememiştir.
- Üç farklı ısı girdisi ile elde edilen AISI 316L birleştirmelerin kaynak dikişinde, döküm yapısına benzer ince bir dendritik yapı mevcuttur. Mikroyapı, birincil ve ikincil dendrit kolları arasında bir miktar interdendritik delta-ferrit içeren östenit dendritlerinden oluşmaktadır. Yüksek ısı girdili bağlantının kaynak dikişinde delta ferrit miktarı daha fazladır.
- Düşük ve orta ısı girdisi (3,92 ve 4,25 kJ/mm) ile üretilen AISI 316L kaynaklı bağlantıların her ikisinde de belirgin bir IEB gözlenmemiş olup, bu bağlantıların IEB'lerinde baz levha içyapısında önemli bir değişiklik olmamış ve soğuk haddelenmiş östenitik yapı korunmuştur. Bunun aksine, yüksek ısı girdili bağlantının IEB'de tamamen yeniden kristalleşme sonucu görece daha iri taneli eş eksenli östenit taneler oluşmuştur.
- AISI 316L-AISI 316L benzer kaynaklı bağlantılarda kaynak dikişi bölgesinde baz malzemeye kıyasla akım değeri ile doğru orantılı olarak artan sertlik değişimleri gözlenmiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerlerini yüksek ısı girdisi ile üretilen bağlantı sergilemiştir.
- Tüm benzer 316L-316L kaynaklı levha numuneleri baz plakadan daha yüksek çekme mukavemeti ve dolayısıyla yüksek mukavemet performans değerleri (% 100'ün üzerinde) göstermiştir. Ancak, yüksek ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı bağlantı en yüksek mukavemet performansını (%103) göstermiştir. Bu sonuçlar benzer 316L-316L kaynak bağlantısı için yapılan çalışmada kullanılan ısı girdisi aralığının kaynak mukavemet performansına belirgin bir etkisinin olmadığını işaret etmektedir. Diğer taraftan, her üç kaynaklı levha da yaklaşık %90 süneklik

performansı sergilemiş olup, tüm kaynaklı levha numuneleri ana metalden daha düşük % uzama değerleri (%88) sergilemiştir. En düşük süneklik performansını yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantı numuneleri sergilemiştir. Bunun nedeni, çekme numunelerinde meydana gelen plastik şekil değiştirmenin homojen olmayışıdır. Özellikle yüksek ısı girdili kaynaklı bağlantı numuneleri çekme deneyi esnasında plastik şekil değişimi sadece numunenin kaynak dikişi bölgesi dışındaki bölgelerinde meydana geldiği için düşük %uzama değerleri sergilemiştir.

- Düşük ısı girdisi ile üretilen AISI 318LN bağlantının ergime bölgesindeki içyapı ferrit fazı ile tane sınırı östeniti, az miktarda Widmanstatten östeniti ve tane içi östenitinden oluşmaktadır. Ayrıca, dikkat çeken bir başka husus bu bağlantının kaynak dikişinde ferrit miktarı östenit miktarından daha fazladır. Orta ve yüksek ısı girdileri ile yapılan bağlantıların kaynak dikişlerindeki içyapılar da düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıya benzemektedir. Ancak, Widmanstatten östeniti ve tane içi östeniti miktarı daha fazladır. Ayrıca, düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıların ergime bölgesinde daha ince taneli eş eksenli bir yapı oluşurken, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen bağlantıların kaynak dikişinde iri taneli uzun sütunsal bir tane yapısı olduğu gözlenmektedir. Bu uzun sütunsal tane yapısı yüksek ısı girdisi ile gerçekleştirilen bağlantıda daha belirgindir. Ayrıca, özellikle yüksek ısı girdili bağlantının kaynak dikişinde, ferrit-östenit dengesi daha iyidir.
- Düşük ve orta ısı girdisi (3,92 ve 4,25 kJ/mm) ile üretilen AISI 318LN kaynaklı bağlantıların her ikisinde de belirgin bir IEB gözlenmemiştir. Diğer taraftan yüksek ısı girdisi (4,57 kJ/mm) ile elde edilen kaynaklı bağlantıda belirgin dar bir IEB oluşmuştur. Bu bağlantının IEB'sinde yeniden kristalleşme gerçekleşmiştir. Bu bağlantının IEB'de yeniden kristalleşme sonucu nispeten yüksek ısı girdisi nedeniyle göreceli kaba taneli bir yapı oluşmuş olup, bu bölgedeki içyapı iri ferrit taneleri ve az miktarda tane sınırı östeniti ve tane içlerinde oluşan östenit (tane içi östeniti) fazından ibarettir. Ayrıca, bu bağlantının IEB'de içyapıda mevcut ferrit fazı östenit fazından daha fazladır.
- AISI 318LN-AISI 318N benzer kaynaklı bağlantılarda düşük ısı girdisi ile (3,99 kJ/mm) üretilen bağlantı hariç kaynak dikişinde ve IEB'de ana metale nazaran gözle görülür bir sertlik değişimi gerçekleşmemiştir. Sadece düşük ısı girdili bağlantın kaynak bölgesinde baz levha sertliğine nazaran çok az bir sertlik artışı sergilemiştir. İlaveten, bu bağlantıların kaynak dikişi bölgesinde akım değeri

arttıkça sertlik düşüşü gerçekleşmiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değeri en düşük ısı girdisi ile yapılan kaynaklı bağlantı tarafından sergilenmiştir.

- Benzer 318LN- 318LN kaynaklı bağlantılarda düşük ısı girdisi ile üretilen bağlantıdan çıkarılan numunelerin tamamı kaynak dikişinden kopmuştur. Diğer taraftan, orta ısı girdili bağlantıdan çıkarılan çekme numunelerinden ikisi kaynak dikişi içerisinden ve diğer ikisi IEB'ye belirli bir mesafede baz levha içerisinden kırılmıştır. Yüksek ısı girdisi kullanılarak edilen bağlantı numunelerinden sadece biri kaynak dikişinden kopmuştur. Bu sonuçlar, içyapı incelemeleri ile uyumlu olup, düşük ısı girdili bağlantının kaynak dikişinde ferrit-östenit faz dengesinin bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla düşük, orta ve yüksek ısı girdisi ile elde edilen kaynaklı levhaların mukavemet performans değerleri sırasıyla % 96, % 98 ve % 102 iken, süneklik performansı da sırasıyla ortalama %38, %58 ve %88 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, tüm kaynaklı levha numuneleri ana metalden daha düşük yüzde uzama değerleri sergilemiştir. Düşük ve orta ısı girdili kaynaklı levhalar düşük mukavemet performansı sergilerken, yüksek ısı girdili bağlantının en yüksek mukavemet performansı (%102) sergilemesinin nedeni bu bağlantının kaynak dikişinde ferrit-östenit dengesinin daha iyi korunması sonucudur. En düşük süneklik performansını düşük ısı girdili bağlantı göstermiştir (%38). Bu kırılmanın kaynak dikişinde gerçekleşmesi ve plastik şekil değiştirmenin kaynak bölgesiyle sınırlı olmasından kaynaklıdır. Diğer taraftan, en yüksek süneklik performansı ise yüksek ısı girdisi ile üretilen bağlantı numuneleri tarafından sergilenmiştir (%88). Bu sonuç, yine kaynak dikişinde ferrit-östenit dengesinin daha iyi korunması sonucu
- ER 2209 dubleks ilave tel ile elde edilen farklı AISI 316L-AISI 318LN bağlantının kaynak dikişindeki içyapı homojen olup, AISI 318LN-AISI 318LN bağlantılarda olduğu gibi, ferrit fazı ile tane sınırı östeniti, az miktarda Widmanstatten östeniti ve tane içi östeniti içermektedir. Diğer taraftan, ER 309L östenitik ilave tel ile elde edilen bağlantının kaynak dikişindeki içyapı oldukça heterojen olup, kaynak dikişinin AISI 318LN baz levhaya yakın kısmında ferrit fazı ile tane sınırı östeniti, az miktarda Widmanstatten östeniti ve tane içi östenitinden oluşan dubleks bir mikro yapı gözlenirken, AISI 316L östenitik baz plakaya yakın kısmında östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak dikişine benzer şekilde östenit dendritleri ve dendritler arası delta ferrit fazından ibaret dendritik bir yapı gözlemlenmiştir.

- ER2209 dubleks ve ER309L östenitik ilave telleri kullanarak ve 120 amper akım ile üretilen farklı AISI 316L-AISI 318LN bağlantıların kaynak dikişinin östenitik baz plaka tarafında belirgin bir IEB oluşmadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, kaynak dikişinin dubleks çelik baz levha tarafında belirgin bir IEB oluşmuştur. Her iki farklı bağlantının dubleks baz levha tarafındaki IEB’de iri taneli bir yapı gözlenmiş olup, içyapı ferrit ve tane sınırı östeniti ile tane içi östenitinden oluşmaktadır.
- Farklı ilave tel kullanılarak aynı kaynak parametreleri ile (ısı girdisi ile) gerçekleştirilen farklı AISI316L-AISI 318LN kaynaklı bağlantılarda ise kaynak kesiti boyunca kaynak dikişi bölgesinde iki baz malzeme sertlikleri arasında bir sertlik değeri tespit edilmiştir. Bu bağlamda, ER2209 ilave tel ile üretilen bağlantının kaynak dikişindeki sertlik değeri AISI 318LN baz plaka sertlik değerine yakın iken, ER309L ilave tel ile yapılan kaynaklı bağlantıda bu bölgenin sertlik değeri AISI 316L baz plaka sertlik değerine yakındır.
- ER2209 ve ER309L ilave teller kullanılarak yapılan farklı 316L-318LN kaynaklı bağlantıların tüm çekme numuneleri kaynak bölgesinden uzakta AISI 316L ana metalden kopmuştur. Her iki ilave telle yapılan kaynaklı levhalardan çıkarılan numunelerin tamamı AISI316L baz plakadan yüksek mukavemet değerleri göstermiş olup, mukavemet performans değerleri yaklaşık % 104 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan, kaynaklı levha numuneleri AISI 316L ana metalden daha düşük % uzama değerleri göstermiş olup, süneklik performansları ER2209 ve ER309L için sırasıyla %43 ve %47 olarak bulunmuştur. ER309L ilave tel ile üretilen kaynaklı levhanın daha yüksek süneklik performansı sergilemesinin nedeni kaynak dikişindeki sertlik değerlerinin AISI 316L baz plaka sertlik değerlerine yakın olması sonucu çekme deneyinde kaynak dikişinde de plastik şekil değişimi olmasıdır. Bu sonuç piyasada farklı paslanmaz çelik levhaların kaynak birleştirme işlemlerinde neden daha yüksek süneklığe sahip ER309L östenitik ilave kaynak telinin tercih edildiğini desteklemektedir.
- Tüm üretilen bağlantılardan çıkarılan kök ve yüzey bükme numuneleri çatlamamıştır. Bu da elde edilen kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesindeki mikroyapısal değişimlerin bükme şartlarındaki performans üzerinde önemli bir rol oynamadıklarını göstermektedir.

5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen incelemeler ile alakalı olarak aşağıdaki önerilen konularda çalışmanın genişletilmesinde fayda olduğu düşünülmektedir:

- Tüm kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesindeki (kaynak dikişi ve IEB) içyapılar daha detaylı olarak SEM ile incelenebilir. Bu bağlamda EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analizleri ve X-ışını difraksiyonu (XRD - X-Ray Diffraction) ile içyapıdaki fazlar belirlenebilir.
- Özellikle AISI 318LN-AISI 318LN ve AISI 316L-AISI 318LN bağlantıların kırılma tokluğu kompakt çekme (compact tension) numuneleri test edilerek belirlenebilir.
- Yine özellikle AISI 318LN-AISI 318LN ve AISI 316L-AISI 318LN bağlantıların kaynak dikişindeki değişimlerin korozyon davranışına etkisini belirlemek için korozyon testleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, M. M. Z., El-Sayed Seleman, M. M., Fydrych, D., ve am, G. (2023). Friction stir welding in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review, *Materials*, vol. 16, s. 2971.
- Anık, S. ve Vural, M. (1993). *1000 Soruda Kaynak Teknolojisi*, Cilt-2, Birsen Yayınları, İstanbul, s. 355-357.
- Aran, A. ve Temel, M. A. (2003) *Paslanmaz elik Yası Mamuller*, Sarıtaş elik Sanayi ve Ticaret A.ř., İstanbul, 165 s.
- AWS, (1994), *Welding Handbook Materials and Applications*, Part 2, Volume 4, American Welding Society (AWS), Miami-Florida, USA, s. 278-279.
- Atkinson, R. F. ve King, R. W. (1982). The Properties and Applications of Two Cast Duplex Stainless Steels, *Duplex Stainless Steels, Conference Proceedings American Society For Metals*, Ohio, s. 399-413.
- Birçelik Paslanmaz elik, (2023). Birçelik Paslanmaz elik Mamulleri Sanayi ve Tic. A.ř. <https://bircelik.com/tr/kategori/316l-1-4404->, Erişim tarihi: 02 şubat 2023.
- Castner, H. R. (1992) Material and Procedure Considerations for Welded Austenitic Stainless Steels, *8th Annual North American Welding Research Conference*, Edison Welding Institute, Columbus, Ohio, s. 1-6.
- Chandrasekar, G, Kailasanathan C, Verma DK, et al. (2017). Optimization of welding parameters, influence of activating flux and investigation on the mechanical and metallurgical properties of activated TIG weldments of AISI 316 L stainless steel, *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 70, no. 3, s. 671-684.
- Cobb, H. M. (2010). *History of stainless steel melting and refining*, ASM International, Ohio, USA.
- am, G. (2022). Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM), *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, part 1, s. 77-85.
- am, G. (2020). *Kaynak Bilimi ve Teknolojisi*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, s. 205-209.

- Çam, G. (2007). Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamalarındaki Son Gelişmeler, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi ve Sergisi*, 9-10 Kasım 2007, Ankara, s. 35-43.
- Çam G. (2005). Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) – Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi, *Mühendis ve Makina*, cilt: 46, sayı: 541, s. 30-39.
- Çam G. (2003). Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi*, 24-26 Ekim 2003, Kocaeli, s. 47-64.
- Çam, G., Javaheri, V., ve X Heidarzadeh, V. (2023). Advances in FSW and FSSW of dissimilar Al-alloy plates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 37, no. 2, s. 162-194.
- Çam, G., Güçlüer, S., Çakan, A., ve Serindağ, H. T. (2008). Mechanical properties of friction stir butt-welded Al-5086 H32 plate, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME)*, vol. 30, no. 2, s. 151-156.
- Çam, G., İpekoğlu, G., Küçükömeroğlu, T., ve Aktarer, S. M. (2017). Applicability of Friction Stir Welding to Steels, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (JAMME)*, vol. 80, no. 2, s. 65-85.
- Çam, G., Mistikoglu, S., ve Pakdil, M. (2009). Microstructural and mechanical characterization of friction stir butt joint welded 63%Cu-37%Zn brass plate, *Welding Journal*, vol. 88, no. 11, s. 225s-232s.
- Çam, G., Serindag, H.T., Çakan, A., Mistikoglu, S., ve Yavuz, H. (2008). The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, vol. 39, no. 6, s. 394-399.
- Çam, G., Yeni, Ç., Erim, S., Ventzke, V., ve Koçak, M. (1998). Investigation into properties of laser welded similar and dissimilar steel joints, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 3, no. 4, s. 177-189.
- Çam, G., Erim, S., Yeni, Ç., ve Koçak, M. (1999). Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints, *Welding Journal*, 1999, vol. 78, no. 6, s. 193s-201s.

- Çam, G., Koçak, M., Dobi, D., Heikinheimo, L., ve Siren, M. (1997). Fracture behaviour of diffusion bonded bimaterial Ti-Al joints, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 2, no. 3, s. 95-101.
- Dolutaş, H. ve Cavcar, M. (2001). *Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı*, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş., Ankara, s.7-11.
- Erkkila, P. (2004). Trends and challenges in the stainless steel industry. *Ironmaking ve Steelmaking*, vol. 31, s. 277-284.
- Ertek Emre, H., Kaçar, R., Bülbül, A. ve Manisalı, B. (2017). AISI 316L-AISI 2205 farklı paslanmaz çelik çiftinin kaynak kabiliyeti, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 1, s. 244-256.
- Ezer, M.A. (2021). Gaz Metal Ark Kaynağı ile Birleştirilen AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Levhaların İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, İskenderun-Hatay.
- Ezer, M.A. ve Çam, G. (2022). A study on microstructure and mechanical performance of gas metal arc welded AISI 304 L joints, *Materialwiss. Werkstofftech.*, vol. 53, s. 1043-1052.
- Gerken, M. ve Kotecki, D. (1990). *Stainless Steels Properties, How to Weld Them, Where to Use Them*, The Lincoln Electric Company, USA, s. 101.
- Gülenç, B., Develi, K., Kahraman, N., ve Durgutlu, A. (2005). Experimental study of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in MIG welding of austenitic stainless steel, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, s. 1475-1481.
- Günay, H. (1999). Plasma nitriding behavior of AISI 316 L stainless steel, *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, İzmir.
- Hosoi, Y. (1987). Introduction to stainless steel, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol. 37, no. 9, s. 624-635.

- İpekoğlu, G. ve Çam, G. (2019). Formation of weld defects in cold metal transfer arc welded 7075-T6 plates and its effect on joint performance, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 629, s. 012007.
- İpekoğlu, G. ve Çam, G. (2014). Effects of initial temper condition and postweld heat treatment on the properties of dissimilar friction-stir-welded joints between AA7075 and AA6061 aluminum alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 45A, no. 7, s. 3074-3087.
- İpekoğlu G. ve Çam, G. (2012). Farklı Al-alaşımı levhaların (AA6061/AA7075) sürtünme karıştırma kaynağına temper durumunun etkisi, *Mühendis ve Makina*, cilt. 53, no. 629, s. 40-47.
- İpekoğlu, G., Akçam, Ö., ve Çam, G. (2018). Determination of the suitable weld parameters for friction stir welding of AA6061-T6 plates with different thicknesses, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering (AKU J. Sci. Eng.)*, vol. 18, no. 1, s. 324-335.
- İpekoğlu, G., Akçam, Ö., ve Çam, G. (2017). AA6061-T6 Al-Alaşımı Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağında Levha Kalınlığının Kaynak Hızına Etkisi, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi X. Ulusal Kongre ve Sergisi (KAYKON 2017)*, 17-18 Kasım 2017, Ankara, s. 63-75.
- Kahraman, F., Kasman, Ş., Kahraman, A. D., ve Tunuslu, O., (2013). Investigation of the weld zone of dissimilar austenitic stainless steels to tool steels, *Journal of Qafqaz University- Mechanical And Industrial Engineering*, s 73-81.
- Kahraman, H., Güvenç, M. A., ve Mıstıkoğlu, S. (2021). AISI 304 östenitik paslanmaz çelik levhaların TIG kaynağı ile birleştirilmesinde farklı koruyucu gaz tiplerinin mekanik özelliklerine etkisi, *Journal of Materials and Mechatronics: A*, vol. 2, no. 1, s. 1-12.
- Kaluç, E. ve Tülbentçi, K. (1998) “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi, Eğitim ve Uygulama Merkezi, Kocaeli.
- Kaya, Y. (2010) AISI 304 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerin TIG, MIG ve örtülü elektrod ark kaynağıyla birleştirilebilirliğinin araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, cilt 25, no 3, 549-557, 2010

- Khatib, J. (2009). *Sustainability of construction materials*,. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Koçak, M., Pakdil, M., ve Çam, G. (2002). Fracture behaviour of diffusion bonded Ti-alloys with strength mismatch, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 7, no. 4, s. 187-196.
- Kulkarni, A, Dwivedii D. K., ve Vasudevan, M. (2020). Microstructure and mechanical properties of A-TIG welded AISI 316L SS-Alloy 800 dissimilar metal joint, *Materials Science ve Engineering A*, vol. 790, s. 139685.
- Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S. M., İpekoğlu, G, ve Çam, G. (2018a). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded St52 steel joints, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 25, no. 12, s. 1457-1464.
- Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S. M., İpekoğlu, G., ve Çam, G. (2109). Investigation of mechanical and microstructural properties of friction stir welded dual phase (DP) steel, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 629, s. 012010.
- Kükürtçü, G. E. (2014). Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti ve mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, Sakarya.
- Lippold, J. C. ve Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, s. 141-200.
- Lothongkum, G., Viyanit, E., ve Bhandhubanyong, P. (2001). Study on the effects of 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*, vol. 110, no. 2, s. 233-238.
- Murat, M. G. ve Başyigit, A. B. (2021). 420 ve 304L farklı paslanmaz çeliklerin TIG kaynağı sonrası radyografik muayenesi, *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 13, no. 1, s. 288-295.
- Noble, D.N. (1992). Oil and Gas Industry Experience with Duplex Stainless Steel Fabrication, *8th Annual North American Welding Research Conference*, Arco Alaska, s. 1-2.

- Serindağ, H. T. ve Çam, G. (2021). Microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded AISI 430/AISI 304 dissimilar stainless steels butt joints, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1777, s. 012047.
- Serindağ, H. T. ve Çam, G. (2022a). Multi-pass butt welding of thick AISI 316L plates by gas tungsten arc welding: Microstructural and mechanical characterization, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 200, s. 104842.
- Serindağ, H.T. ve Çam, G. (2022b). Gaz tungsten ark kaynaklı 10 mm kalınlığındaki AISI 316L bağlantıların içyapı ve mekanik karakterizasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt: 10, sayı: 4, s. 1873-1889.
- Serindağ, H. T. ve Çam, G. (2023). Characterizations of microstructure and properties of dissimilar AISI 316L/9Ni low alloy cryogenic steel joints fabricated by GTAW, *Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG)*, (<https://doi.org/10.1007/s11665-022-07601-x>).
- Silverstein, R, Eliezer, D, ve Boellinghaus, Th. (2018). Hydrogen-trapping mechanisms of TIG-welded 316L austenitic stainless steels, *J. Mater. Sci.*, vol. 53, s. 10457-10468.
- Soltani, H. M. ve Tayebi, M. (2018). Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding, *J. Alloys Compd.*, vol. 767, s. 112-121.
- Şenol, M. ve Çam G. (2023). Investigation into microstructures and properties of AISI 430 ferritic steel butt joints fabricated by GMAW, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 202, s. 104926.
- Taban, E., Deleu E., Dhooge A., ve Kaluc E. (2007). Gas metal arc welding of modified X2CrNi12 ferritic stainless steel, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 45 (2), s. 67-73.
- Tülbentçi, K. (1985). *Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı*, Böhler Kaynak Dünyası, s. 5-10.
- Tülbentçi, K. (1998). *MIG/MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi*, Arctech Yayını, İstanbul.
- Tekin, N. (2011). Paslanmaz çelik malzeme ile düşük Karbonlu alaşımsız çelik malzemelerin tozaltı kaynak metodu ile birleştirilmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, s. 14-19.

- Woollin, P. (1994). *Developments in Fusion Welding of Stainless Steels*, Welding and Metal Fabrication, Cambridge, s. 18-26.
- Wang, H. S., Yang, J. R., ve Bhadeshia D. H. (2005). Characterisation of severely deformed austenitic stainless steel wire, *Materials Science And Technology*, vol. 21, s. 11-21.
- Yıldızlı, K. ve Dengiz, C. G. (2014). Ostenitik ve dubleks paslanmaz çelik sacların şekil alma kabiliyetlerinin karşılaştırılması, *15. International Materials Symposium*, Ankara, s. 21-28.
- Yorulmazel, S. C. (2007). Paslanmaz çelik konstrüksiyonlarda oluşan distorsiyonların etüdü, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 13.
- Metal Uzmanı, (2023). <https://www.metaluzmani.com/dubleks-paslanmaz-celikler/>, Erişim tarihi: 16 Şubat 2023.

DİZİN

A

Akma gerilmesi · 59, 62
Alaşımli çelik · 16
Argon · 18, 19, 31, 33, 35, 75

B

Baz plaka · 39, 42, 53, 59, 62, 65, 69

Ç

Çekme dayanımı · 18, 19, 20
Çekme numuneleri · 20, 39, 61, 69
Çekme testi · 18, 20

D

Dendritik yapı · 18, 42, 51, 64
Dubleks · vii, x, 16, 20, 23, 29, 30, 31, 74
Düşük ısı girdisi · x, xi, xii, 35, 40, 44, 47, 48, 60, 65

E

Eğme · 17, 37
Elektrik iletkenliği · 28
ER2209 · xi, xii, xiii, 19, 34, 35, 39, 41, 45, 49, 53, 54, 55, 57, 59, 61, 69
ER309L · xi, xii, xiii, 34, 39, 41, 45, 49, 53, 54, 55, 58, 59, 62, 69

F

Ferritik · vii, 23, 24

G

Gaz Tungsten Ark Kaynağı · vii, xv, 32

I

IEB · xi, xii, xv, 17, 18, 19, 20, 24, 47, 48, 49, 50, 51, 60, 64, 66, 67, 69, 70
Isı girdisi · iv, 24, 28, 31, 37, 39, 42, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 59, 61, 64, 65, 66, 67, 69

İ

İçyapı · vi, xi, xii, 18, 24, 26, 38, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 53, 60, 65, 66, 67, 68, 69, 78

İlave tel · iv, x, xi, xii, xiii, 18, 19, 20, 24, 34, 36, 42, 45, 46, 47, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 61, 64, 68, 69, 70

K

Karbon · 17, 22, 23, 28
Kaynak · iv, x, xi, xiv, 17, 18, 20, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 43, 50, 64, 67, 71, 72, 73, 74, 76, 79
Kaynak dikişi · xi, 31, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 60, 64, 65, 67, 69, 70
Korozyon · iv, 16, 17, 22, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 71
Koruyucu gaz · 18, 31, 32, 35, 76

M

Makro · x, xi, xiii, 18, 39, 43, 55, 58, 59
Martenzitik · vii, 22, 23, 28
Metalografi · 37, 38, 42, 50
Mikrosertlik · x, 39
Mukavemet · ix, 18, 20, 23, 31, 39, 53, 54, 59, 61, 62, 65, 67, 70

O

Optik Mikroskop · iv, x, xi, 18, 25, 42, 43, 47, 48
Orta ısı girdisi · x, xi, xii, 36, 40, 42, 49

Ö

Östenitik · iv, vii, ix, 17, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 34, 74, 77

P

Paslanmaz Çelik · vii, 16, 17, 23, 71, 74

S

SAF 2205 · ix, xi, 34, 35, 36, 42, 43
Süneklik · ix, 39, 53, 54, 60, 61, 62, 65, 67, 70

T

Tane sınırı · 24, 44, 45, 48, 49, 65, 66, 68, 69

Y

Yüksek ısı girdisi · x, xi, xii, 18, 36, 40, 41, 44, 48, 49, 60, 67
Yüzde uzama · 39, 61, 68



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

