

**ELEKTRİK NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ
İLE BİRLEŞTİRİLEN FARKLI ÖZELLİKTEKİ
PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK
BÖLGESİNİN KARAKTERİZASYONU**

**2015
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Ali YÜRÜK

**ELEKTRİK NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN
FARKLI ÖZELLİKTEKİ PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK
BÖLGESİNİN KARAKTERİZASYONU**

Ali YÜRÜK

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2015**

Ali YÜRÜK tarafından hazırlanan “ELEKTRİK NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN FARKLI ÖZELLİKTEKİ PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK BÖLGESİNİN KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2015

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. İlyas UYGUR (DÜ)

Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)

Tarih/...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ali YÜRÜK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK NOKTA DİRENÇ KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN FARKLI ÖZELLİKTEKİ PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK BÖLGESİNİN KARAKTERİZASYONU

Ali YÜRÜK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Haziran 2015, 109 sayfa

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik levhalar ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalar elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri 0,6 ve 0,8 MPa elektrod kuvveti, 2 ve 3 kA kaynak akımı ve 10, 20 ve 30 kaynak çevrim zamanında gerçekleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantılar üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Kaynak bölgelerinin dayanımlarını belirlemek için çekme-makaslama testleri uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdeği çapları dijital kumpasla, elektrod dalma derinlikleri ise mikrometreyle ölçülmüştür. Ayrıca, kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinde sertlik ve optik mikroskop ile SEM çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan kaynak çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği ölçüm çalışmalarında değişen kaynak parametrelerinin kaynak çekirdek çapı genişliğini ve elektrod dalma derinliğini değiştirdiği saptanmıştır. Çekme-makaslama deneyi çalışmalarında artan kaynak parametrelerinin kaynak metalinin çekme-makaslama dayanımı ve kaynak çekirdeği kopma şekilleri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri sonucunda artan kaynak parametreleri ile kaynak bölgesindeki sertliklerde artışlar gözlenmiştir. Mikroyapı çalışmalarında kaynak parametrelerinde yapılan artış sebebiyle artan ısı girdisinin özellikle ferrit tanelerinde büyümeye neden olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Ferritik paslanmaz çelik, dubleks paslanmaz çelik, elektrik direnç nokta kaynağı.

Bilim Kodu : 915.3.019

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

WELD ZONE CHARACTERIZATION OF VARIOUS STAINLESS STEEL JOINED THROUGH ELECTRIC RESISTANCE SPOT WELDING METHOD

Ali YÜRÜK

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of manufacturing Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

June 2015, 109 pages

In this study AISI 2304 duplex stainless steel sheets were joined with AISI 430 ferritic stainless steel sheets by resistance spot welding using various welding parameters. Both sheets were 1mm in thickness. Welding process were carried out at 0.6 and 0.8 MPa electrode force, 2 and 3 kA welding currents and 10, 20, 30 cycle welding times. The effect of welding parameters on the welded joints were investigated.

In order to determine the strength of the welded zones, tensile-shearing tests were applied. The weld nugget diameters were measured by a digital caliper while the electrode penetration depth values were measured by a micrometer. Also, hardness and SEM scanning studies were done on the welded regions of the welded samples.

From the measured weld nugget diameter and electrode penetration depth values, it was determined that changing welding parameters changed the weld nugget diameter width and electrode penetration depth. The results of tensile-shearing experiments showed that increasing welding parameters were found to be effective on tensile-shearing strength and welding nugget rupture form. Increasing welding parameters increased the weld zone hardness. It was observed from the microstructural examination that increasing welding parameters especially caused the ferrite grains to grow due to the increased heat input.

Key Word : Ferritic stainless steel, duplex stainless steel, electric resistance spot welding.

Science Code : 915.3.019

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının planlanmasında, araŐtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel alıŐmalar esnasındaki yardımlarından dolayı Düzce Üniversitesi Öğretim Üyesi sayın Prof. Dr. İlyas UYGUR'a, KBU Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Yakup KAYA'ya, ve İmalat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine teşekkür ederim.

Ayrıca, bu Yüksek Lisans Tez alıŐmasını KBÜ-BAP-14/1-YL-018 numaralı proje ile destekleyen, KBÜ Rektörlüğüne ve BAP komisyonuna teşekkür ederim.

Ve son olarak Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	4
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	4
2.1. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ.....	5
2.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler	7
2.1.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	10
2.1.3. Dupleks Paslanmaz Çelikler	11
2.1.4. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler	14
2.1.5. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	15
BÖLÜM 3.	17
DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ	
3.1. ÖRTÜLÜ ELEKTROD ARK KAYNAĞI.....	18
3.2. TIG KAYNAĞI.....	19
3.3. MIG KAYNAĞI.....	19
3.4. TOZALTI KAYNAĞI	20

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4	21
FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ.....	21
4.1. ÖRTÜLÜ ELEKTROD ARK KAYNAĞI.....	22
4.2. TIG KAYNAĞI.....	23
4.3. MIG KAYNAĞI.....	23
4.4. TOZALTI KAYNAĞI	24
4.5. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI.....	24
BÖLÜM 5	25
ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI.....	25
5.1. YÖNTEMİN TARİHÇESİ.....	25
5.2. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI PRENSİBİ	26
5.3. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI ÇEŞİTLERİ.....	27
5.3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı	28
5.3.2. Elektrik Direnç Dikiş Kaynağı	30
5.3.3. Kabartılı Kaynak.....	32
5.4. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI DEĞİŞKENLERİNİN İNCELENMESİ.....	33
5.4.1. Kaynak Akımının Etkisi	34
5.4.2. Kaynak Zamanının Etkisi	37
5.4.3. Elektrot Kuvvetinin Etkisi	38
5.4.4. Elektrot Bileşimi ve Şeklinin Isınma Üzerine Etkisi.....	38
5.4.5. Elektrot Bileşiminin Etkisi	39
5.4.6. Elektrot Şeklinin Etkisi.....	39
5.4.7. Elektrotların Malzemesi ve Boyutları.....	39
5.5. KAYNAK ÇEVRİMİ.....	42
5.5.1. Yaklaşma ve Sıkma Zamanı	43
5.5.2. Kaynak Zamanı.....	43
5.5.3. Tutma Zamanı.....	43
5.5.4. Ayrılma Zamanı.....	43
5.6. KAYNAK HATALARI VE NEDENLERİ	43
5.6.1. İç Hatalar	44

	<u>Sayfa</u>
5.6.2. Dış Hatalar	46
5.7. DİRENÇ KAYNAĞINDA KALİTE KONTROLÜ	49
BÖLÜM 6	50
ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	50
6.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAGI YÖNTEMİ ÇALIŞMALARI	50
6.2. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK ÇALIŞMALARI.....	52
6.3. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK ÇALIŞMALARI	53
BÖLÜM 7.	56
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	56
7.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	56
7.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI.....	57
7.3. KAYNAĞIN YAPILIŞI.....	58
7.4. NUMUNE HAZIRLAMA	59
7.5. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESBİTİ.....	60
7.5.1. Elektrod Çekirdek Çapı ve Dalma Derinliğinin Ölçülmesi.....	60
7.5.2. Çekme- Makaslama Deneyi.....	60
7.5.3. Sertlik Testi.....	61
7.5.4. Metalografik Muayene.....	62
7.5.5. SEM Çalışması	64
BÖLÜM 8	65
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	65
8.1. GENEL DEĞERLENDİRME.....	65
8.2. KAYNAK ÇEKİRDEĞİ ÇAPI VE ELEKTROD DALMA DERİNLİĞİ ÖLÇÜMÜ	65
8.3. ÇEKME-MAKASLAMA DENEYİ.....	68
8.4. SERTLİK TESTİ.....	75
8.5. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	84
8.6. SEM ÇALIŞMALARI	94

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 9.	103
SONUÇLAR	103
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları.....	6
Şekil 2.2. Ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.....	8
Şekil 2.3. Martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.....	10
Şekil 2.4. Dupleks paslanmaz çeliğin mikroyapısı.....	11
Şekil 2.5. Östenitik paslanmaz çeliğin mikro yapısı.....	15
Şekil 4.1. Fe-Cr alaşımlarında karbon miktarının östenit alanını genişletici etkisi.....	21
Şekil 4.2. %17 Cr'lu ferritik paslanmaz çelikte ITAB'de tane irileşmesi ve taneler arası martenzit ağı.....	22
Şekil 5.1. Elektrik direnç nokta kaynağının sematik gösterimi.....	26
Şekil 5.2. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektrikli sistemi.....	27
Şekil 5.3. Nokta direnç kaynağının prensip resm.....	29
Şekil 5.4. Nokta direnç kaynağının boyutları.....	30
Şekil 5.5. Dikiş direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesi detayı.....	31
Şekil 5.6. Kabartılı nokta kaynağı.....	32
Şekil 5.7. Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliği üzerindeki etkileri.....	35
Şekil 5.8. Nokta kaynağında akım ve kaynak süresine bağlı olarak kaynak Edilebilirlik diyagramı.....	36
Şekil 5.9. 30° açılı özel nokta kaynak elektrotları.....	41
Şekil 5.10. RWMA'ya göre standart elektrot uç şekiller.....	41
Şekil 5.11. Kaynak çevriminin safhaları.....	43
Sekil 7.1. Nokta direnç kaynak numune ölçüleri.....	57
Sekil 7.2. Kaynak esnasında kullanılan ahşap kalıp resmi.....	57
Şekil 7.3. Kaynaklı birleştirme sonucu elde edilen deney malzemesi.....	59
Şekil 7.4. Çekme deneyi cihazı.....	61
Şekil 7.5. Mikro sertlik ölçüm cihazı.....	62
Şekil 7.6. Zımpara ve parlatma cihazı.....	63
Şekil 7.7. Mikro yapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.....	63

	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.8. Çalışmalarda kullanılan taramalı elektron mikroskobu.....	64
Şekil 8.1. Kaynak çekirdek çapı ölçüm sonuçları	67
Şekil 8.2. 2 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme makaslama deney sonuçları	68
Şekil 8.3. 2 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama deney sonuçları	69
Şekil 8.4. 3 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen.....	70
Şekil 8.5. 3 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama deney sonuçları.....	70
Şekil 8.6. Çekme-makaslama deney sonuçları.....	71
Şekil 8.7. Kaynaklı parçalarının kopma şekli.....	73
Şekil 8.8. Kaynaklı numunelere uygulanan sertlik testinin uygulama yöntemi... ..	76
Şekil 8.9. 2 kA-0.6 MPa'da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri	77
Şekil 8.10. 2 kA-0.8 MPa'da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri	79
Şekil 8.11. 3 kA-0.6 MPa'da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri.....	80
Şekil 8.12. 3 kA-0.8 MPa'da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri	81
Şekil 8.13. AISI 304 ve AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliklerin TTT diyagramları.....	83
Şekil 8.14. Kaynak sonrası meydana gelen yapıyı gösteren schaeffler diyagramı... ..	85
Şekil 8.15. Kaynak metali içindeki ferrit oranını gösteren Schaeffler diyagramı.....	85
Şekil 8.16. En düşük parametrelerde (2 kA ve 0.6 MPa) kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	88
Şekil 8.17. En yüksek sürede (30 periyod) birleştirilmiş kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri	89
Şekil 8.18. Farklı parametrelerde birleştirilen kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri	91
Şekil 8.19. 2 kA kaynak akımı, 0.6 MPa basınç ve 30 periyod süresinde birleştirilmiş kaynaklı numunenin mikroyapı görüntüsü	92
Şekil 8.20. 3 kA kaynak akımı, 0.6 MPa basınç ve 30 periyod süresinde birleştirilmiş kaynaklı numunenin mikroyapı görüntüsü.....	92
Şekil 8.21. 2 kA kaynak akımı, 0.6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin SEM sonuçları.....	93

Şekil 8.22. 2 kA kaynak akımı, 0.6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numuneden alınan çizgisel analiz grafiği.....	93
Şekil 8.23. 2 kA kaynak akımı, 0.6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin tane sınırı ve tane içinden alınan noktasal analiz grafiği.....	97
Şekil 8.24. 2 kA kaynak akımı, 0.8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin SEM sonuçları.....	98
Şekil 8.25. 2 kA kaynak akımı, 0.8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin tane sınırı ve tane içinden alınannoktasal analiz grafiği	99
Şekil 8.26. 3 kA kaynak akımı, 0.6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin a) kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, b) arayüzeyin SEM görüntüsü ve c) çizgisel analiz grafiği.....	100
Şekil 8.27. 3 kA kaynak akımı, 0.8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin SEM sonuçları.....	101
Şekil 8.28. 3 kA kaynak akımı, 0.8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunede oluşan alt tanelerin SEM görüntüsü.....	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler	8
Çizelge 2.2. AISI 430 paslanmaz çeligin; standart numaraları, fiziksel, mekaniksel özellikleri ve korozyon dayanımı.....	13
Çizelge 2.3. Dupleks paslanmaz çeliklerin tipik kimyasal kompozisyonları.....	13
Çizelge 2.4. Dupleks paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri ve PRE değerleri.....	14
Çizelge 5.1. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları	40
Çizelge 7.1. Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.....	56
Çizelge 7.2. Deneyde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	56
Çizelge 7.3. Nokta direnç kaynak makinesinin özellikleri.....	58
Çizelge 7.4. Kaynak esnasında kullanılan parametreleri.....	59
Çizelge 8.1. Kaynaklı parçaların tek taraflı derin ölçümleri.....	66
Çizelge 8.2. Schaeffler diyagramına göre kaynak metali analizi.....	86
Çizelge 8.3. Mikroyapı numune tanımlamaları	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$Cr_{eş}$: krom eşdeğerliliği
$Ni_{eş}$: nikel eşdeğerliliği
Ag	: gümüş
Al	: alüminyum
Ar	: argon
He	: helyum
Mo	: molibden
Ni	: nikel
$erf(z)$: hata işlevi
γ	: birim hacim ağırlığı
$\Gamma(x)$: gama işlevi
σ	: normal gerilme
σ_c	: tek eksenli basınç dayanımı

KISALTMALAR

AISI	:	American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	:	American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
AWS	:	American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
DIN	:	Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EN	:	Avrupa Normu
IIW-IIS	:	Uluslararası Kaynak Enstitüsü
ITAB	:	Isı tesiri altında kalan bölge
MIG	:	Metal inert gas
TIG	:	Tungsten inert gas
TS	:	Türk Standardı
HF	:	Yüksek frekans
DC	:	Doğru akım
DATK	:	Doğru akım ters kutuplama

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler çeşitli endüstrilerde ve çevrelerde yaygın olarak kullanılmakta olan mühendislik malzemelerinin önemli bir sınıfını oluşturmaktadır. Gelişmekte olan ülkemiz endüstrisinin paslanmaz çeliklere olan gereksinimi her geçen gün artmaktadır. Paslanmaz çelikleri diğer çeliklerden ayıran en önemli özellik krom içeriklerinin çok yüksek (% 12) olmasıdır. Paslanmaz çeliklere yüksek korozyon direncini kazandıran yüzeyinde bulunan krom oksit tabakasıdır. Çeliğin içerisine ilave edilen Cr, Mo ve Ni gibi alaşım elementleri çeliği korozyona karşı korur.

Paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir ve ark kaynakları ile (örtülü elektrotla ark kaynağı, TIG kaynağı, MIG kaynağı, Tozaltı ark kaynağı), direnç kaynakları ile (elektrik direnç kaynağı, yakma alın kaynağı, saplama kaynağı), elektron ve lazer ışın kaynakları ile ergitmeli olarak kaynak edilebilirler.

Paslanmaz çelikler; östenitik paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çelikler, çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler, ve çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler şeklinde baskın olan metalurjik fazlara göre sınıflandırılmaktadırlar.

Ferritik paslanmaz çelikler, genellikle Ni yerine % 10,5 ila % 30 arasında yüksek oranda Cr ve karbür yapıcı ve ferritik yapıyı kararlı yapabilecek olan Mo, Ti ve V gibi alaşım elementlerini içeren çeliklerdir. Oda sıcaklığında yüksek korozyon direncine sahip olmasının yanı sıra manyetik özelliklere de sahiptir. Ancak içerisindeki karbon oranı düşük olduğundan tavlama dışında herhangi bir ısıl işleme tabi tutulamazlar. Ferritik paslanmaz çelikler korozyon direncinin yüksek olması nedeni ile iç ve dış dekorasyon işlerinde, mutfak araç ve gereçlerinin yapımında, gıda sektöründe, otomotiv imalatında, petro-kimya endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler [1].

Dubleks paslanmaz çelikler; ferritik ve östenitik fazları aynı anda yapısında bulduran paslanmaz çeliklerdir. Dupleks paslanmaz çelikler içerdikleri ferritik ve östenitik fazlar nedeni ile ferritik çelikler ve östenitik çeliklerin tüm özelliklerini sahiptirler [2]. Dupleks paslanmaz çeliklerin korozyon direnci östenitik paslanmaz çelikler göre iki kat daha fazladır. Dupleks paslanmaz çelikler Türkiye’de ve dünyada son zamanlarda kullanımı büyük bir artış gösteren bir paslanmaz çelik ailesidir. Bu malzemeler, 304 ve 316 kalite paslanmaz çeliklere benzer özellikler göstermesinin yanı sıra, dayanıklılık değerleri (akma, kopma ve burulma) oldukça yüksek seviyede olduğu için sağlamlığın ve hafifliğin gerek duyulduğu birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Dupleks paslanmaz çelikler genellikle, pompa millerinin yapımında, tekne şaftlarının imalatında, pervane üretiminde, özel hidroelektrik santralleri yapımında, gıda ve kimya sektörlerinde ile makine endüstrisinde kullanılmaktadır. Özellikle paslanmaz çelik sac malzemelerin kaynağında, işleminin yüksek bir üretim hızıyla gerçekleşmesinden, otomasyona oldukça elverişli olmasından, aynı veya farklı cins metal ve alaşımlarının birleştirilmesinde de kullanıldığından elektrik nokta direnç kaynağı tercih edilmektedir.

Elektrik nokta direnç kaynağı; ikinci Dünya savaşından sonra gelişen teknoloji ile hızla gelişmiş ve bu gün sac levhaların seri üretim kaynaklarında en çok başvurulan kaynak yöntemlerinden biridir. Elektrik direnç kaynağı; iş parçalarının kendi içlerinden geçen akıma karşı gösterdikleri dirençten sağlanan ısı ile birlikte basınç uygulanması ile yapılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemin ana etken faktörleri kaynak akımı ve elektrod baskı kuvvetidir [3].

Elektrik direnç kaynağı seri üretime uygun olmasının yanında bir butonla veya ayak pedalı ile çalıştırabilmesi, operatöre büyük kolaylık sağlar. Bu özellikleri ile diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında işçilikten büyük bir kazanç sağlamaktadır. Ayrıca ince sac levhalarının kaynağının diğer kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilmesinin zorluğu nedeni ile bu tür malzemelerin kaynağının elektrik direnç kaynağı ile kolaylıkla yapılabilmesi bir diğer avantajıdır.

Bu çalışmanın amacı, 430 kalite ferritik paslanmaz çelik ile AISI 2304 dupleks paslanmaz çelik sac malzemeler, farklı kaynak parametreleriyle (kaynak akımı, akım

zamanı, elektrod baskı kuvveti vb) nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilerek kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması ve incelenmesidir.

Bu çalışma genel itibarı ile literatür araştırması ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın literatür kısmında paslanmaz çelikler ve elektrik nokta direnç kaynağı detaylı bir şekilde tanıtılmıştır. Çalışmanın bu bölümlerinde, paslanmaz çelikler ve kaynaklanabilirliği konusunda yapılmış olan lisansüstü tezler ile Ulusal ve Uluslar arası dergilerde yayımlanmış makalelerden yoğun bir biçimde yararlanılmıştır.

Araştırmanın uygulamalı mühendislik kısmında ise farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip AISI 430 ferritik ve AISI 2304 dubleks paslanmaz çeliklerin, elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın temeli ise karakterizasyon çalışmalardan elde edilen sayısal verilerin değerlendirilmesi, yorumlanması ve benzer çalışmalarla farklılık/benzerliklerinin tartışılması üzerine kurulmaya çalışılmıştır.

BÖLÜM 2

PASLANMAZ ÇELİKLER

Günümüz endüstrisinde paslanmaz çelikler mükemmel korozyon direncinden dolayı tercih edilmektedir. Paslanmaz çeliklerin yüksek korozyon direncine sahip olmasının en önemli etkeni içerisinde yüksek miktarda krom bulundurmasıdır. Demirin içerisinde % 5 oranında krom katılması dahi korozyon direncini artırır. Ancak paslanmaz bir çelik üretmek için en az % 12 Cr katılması gerekir [4].

Altın ve platin gibi metaller doğada saf halde bulunur. Diğer metaller ise başka elementlerle bileşik halindedir ve bu yüzden paslanma eğiliminde olurlar. Yani paslanma bir doğal olaydır. Doğada bulunan demir cevheri dengesizdir ve paslanma eğilimindedir. Korunmasız haldeki demir cevherin suyun içinde bulunan oksijenle birleşmesi sonucunda paslanma meydana gelir. Herhangi bir koruyucu kaplamaya sahip olmayan karbon çeliği üzerinde bir pas katmanı oluşur ve çeliğin kalan kısmını korur. Yüzeydeki pas katmanının alınması durumunda yeni bir pas katmanı oluşur. Bu durum paslanma olarak adlandırılır. Boyama, çinko kaplama (galvanizleme), epoksi reçinelerle yapılan çeşitli kaplamalar paslanma sürecini geciktirir veya durdururlar [5].

Paslanmaz çelik sacların dışındaki metal malzemelerin yüzeylerini etkileyen çok çeşitli korozyon faktörleri bulunmaktadır. Atmosferdeki oksijen, tuzlu deniz suyu, nem, sıcaklık farklılıkları, hava kirliliği bu faktörlerin ön plana çıkanlarıdır. Bu faktörler çelik sacların kullanım performanslarını ve malzeme kalitelerini olumsuz etkilemektedir. Bahsedilen bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için metal yüzeylerine uygulanan kaplamalardan faydalanılmaktadır. Bu kaplamalar birer bariyer görevi görerek, metalin atmosfer, su ve diğer korozyon ortamlarına karşı olan davranışını iyileştirmektedirler [6].

Paslanmaz çelikliğin içerisinde bulunan kromun oksijene büyük bir yakınlığı vardır. Paslanmaz çelik içerisinde bulunan krom oksijenle temas ettiğinde çeliğin yüzeyinde moleküler düzeyde bir krom oksit filmi oluşur. Bu filmin kalınlığı 130 Angstrom'dur. Bu sayede çelik korozyona karşı korunur [5].

Oluşan bu krom oksit tabakası çeliği yüksek sıcaklıklardaki oksidasyona karşı korur. Kromun çeliğin yüksek sıcaklıklarda korunmasına katkıda bulunması sebebi ile paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı dayanıklı malzeme olarak da kullanılır [7].

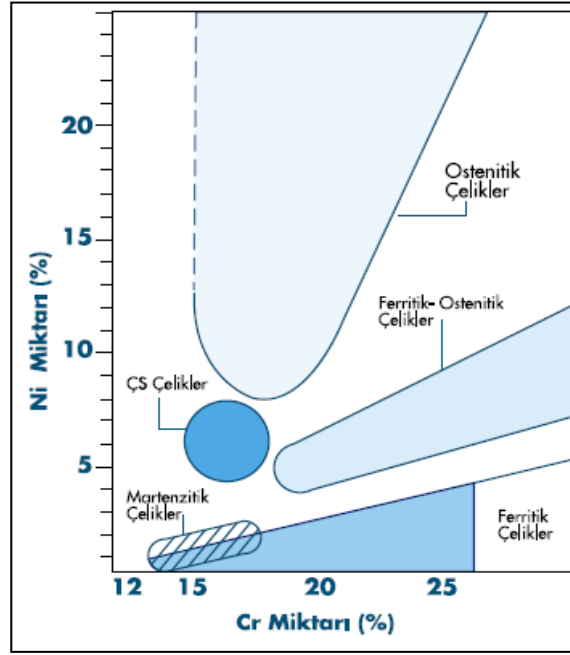
Koruyucu tabakadan istenilen özellikler istenilen sıcaklık ve oksijen kısmi basınçlarında kararlı olması, çok yavaş büyümesi, yani düşük parabolik hızlara sahip olmalarıdır, bunu sağlayan oksitler, SiO_2 , Cr_2O_3 ve Al_2O_3 dir [5].

Paslanmaz çelikler; I. Dünya Savaşı'ndan sonra Avrupa'lı bir hurdacı, paslı hurdalar arasında parlayan bir top namlusunu analiz ettirir ve sonuçta çeliğin içeriğinde yüksek oranda krom bulunduğunu öğrenir; bu keşiften sonra Avrupa'da paslanmaz çelik üretimi başlar. 1911 yılında C. Dantsizen, General Elektrik firmasında, elektrik ampullerinde flaman olarak kullanılmak üzere % 14-16 Cr içeren bir Fe-Cr alaşımı üretmiştir. Aynı yıllarda İngiltere'de Harry Brearley Fe-Cr alaşımlarının yüksek korozyon direncinden yararlanarak çatal, kaşık, bıçak yapmak üzere % 12,8 Cr içeren bir alaşım geliştirmiştir. Aynı araştırmacı bu alaşımların metalografik dağlama ayıraçlarına dirençleri nedeni ile bunlara "paslanmaz çelik" adını vermiştir. Uzun çalışmalar sonucu geliştirilerek patenti alınmış Krupp, V2A çeliği (% 20 Cr, % 7 Ni, % 0,25 C) adı altında endüstriyel çapta ilk paslanmaz çelik üretimi gerçekleştirilmiştir [4].

2.1. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ

Paslanmaz çeliklerin kimyasal yapıları değiştirilerek farklı özelliklere sahip alaşımlar elde edilebilir. Özellikle korozyon dayanımını artırmak için krom miktarı yükseltilebileceği gibi nikel ve molibden gibi alaşım elementleri de katılabilir. Ayrıca paslanmaz çelik içerisine alaşım elemanı olarak bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum ve selenyum gibi elementlerin katılması paslanmaz çeliğe

olumlu avantajlar sağlar. Ancak yine de paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Özellikle paslanmaz çeliğin ferritik ya da östenitik bir içyapıya sahip olmasını belirleyen elementler krom ve nikeldir. Şekil 2.1’de değişik paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları, Çizelge 2.1’de ise paslanmaz çelik gruplarına ait bazı fiziksel özellikler verilmiştir.



Şekil 2.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları (ÇS: çökeltilme sertleşmesi uygulanabilen) [1].

Genel olarak paslanmaz çelikler beş ana grupta toplanırlar. Bunlar;

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

Çizelge 2.1. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [4].

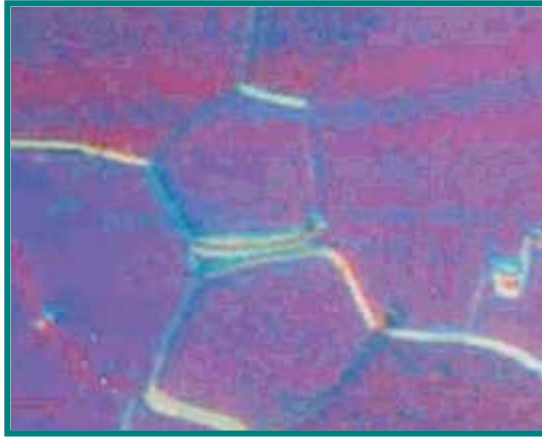
Fiziksel Özellikler	Östenitik paslanmaz çelikler	Ferritik paslanmaz çelikler	Martenzitik paslanmaz çelikler	Çökeltme ile sertleşebilen paslanmaz çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm ³)	8,0	7,8	7,8	7,8
Isıl genleşme katsayısı (µm/m°C)	16,6	10,4	10,3	10,8
Isıl iletkenlik (W/mk)	15,7	25,1	24,2	22,3
Özgül Isı (J/k °K)	500	460	460	460

2.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler % 12–30,5 krom, % 0,20'ye kadar nikel ve çok düşük miktarda Al, Nb, Ti ve Mo gibi ferrit dengeleyici elementler içermektedirler. Bu tip paslanmaz çelikler her sıcaklıkta ferritik yapıda olduklarından, östenit oluşturamazlar dolayısıyla ısıl işlemle sertleştirilemezler [1].

Ferritik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ferrit yapıdadır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında manyetik ve bu özelliklerini Curie sıcaklığına (768 °C) kadar korurlar. Bu gruptaki paslanmaz çelikler Nikel ihtiva etmezler. Ayrıca karbon oranı % 0,02 ile 0,12 gibi çok düşük değerdedir. % 12 Cr'lu ferritik paslanmaz çelikler; düşük maliyette üretim ve iyi korozyon direnci sağlar. Bu çeliklerde ferriti tamamen kararlı hale getirebilmek için yeterli miktarda krom ve diğer alaşım elementlerine ihtiyaç vardır. γ (gama) bölgesini genişlettiği düşünülen karbonun çok düşük oranlarda tutulması gerekir. Bu sayede yüksek tokluk ve çekilebilirlik korunurken, östenit dönüşümü de engellenmiş olur. Isıl işlem görmüş paslanmaz çelikler çok taneli ve tek fazlı bir mikroyapıya sahiptir. Çekilebilirliğe ve tokluğa etki eden zararlı fazların oluşumunu engellemek için alaşımlandırılmış ferritik tanelerin yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 1100 °C) homojenleştirme ısıl işlemi gördükten sonra hızlı soğutulmaları gerekir [4].

Krom oranı % 20'den daha fazla olan ferritik paslanmaz çelikler 550 ile 850 °C arasındaki sıcaklıklarda uzun süre tavlандıklarında sigma (σ) fazı oluşur. Yüksek sıcaklıktaki uygulama sırasında ortaya çıkan bu durum, çeliğin sertliğini artırdığı için bazen yararlı olabilir. Ancak gevrekleşmeye neden olduğu ve korozyon direncini azalttığı için genellikle istenmez [4]. Şekil 2.2'de ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve Çizelge 2.2'de AISI 430 paslanmaz çeliğin; standart numaraları, fiziksel, mekaniksel özellikleri ve korozyon dayanımı verilmiştir.



Şekil 2.2. Ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı [6].

Ferritik paslanmaz çeliklerin kullanım yerleri tamamen içerdiği krom miktarına bağlıdır. Bu bakımdan, bu tip çelikler başlıca üç ana gruba ayrılabilir:

- ✓ Krom miktarı % 10,5-13 arasında olanlar (405 ve 409 kaliteleri)
- ✓ Krom miktarı yaklaşık % 17 olanlar (430 ve 434 kaliteleri)
- ✓ Yüksek kromlular % 19-30 (süperferritikler 442 ve 446 kaliteleri) [8].

Ferritik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu bazı özellikler:

- 1) Korozyon dayanımı orta ile iyi derece arasında olup, malzeme içerisinde krom miktarının artması ile iyileşmektedir,
- 2) Isıl işleme dayanım artırılmaz ve sadece tavlınmış durumda kullanılır.
- 3) Manyetikler,
- 4) Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür,
- 5) Şekillendirme kabiliyeti östenitik paslanmaz çeliklere göre daha azdır [1].

Çizelge 2.2. AISI 430 paslanmaz çeliğin; standart numaraları, fiziksel, mekaniksel özellikleri ve korozyon dayanımı [1].

ASTM 430	EN 1.4016	UNS S43000		
Fiziksel Özellikler				
Elastik modülü (GPa)		220		
Özgül ağırlık (gr/cm ³)		7,7		
Isıl genleşme katsayısı (1/K)		10		
Elektrik direnci (am ² /m)		0,60		
Özgül ısı (J/kg.K)		460		
Isıl iletkenliği (W/m.K)		25		
Manyetiklik		Var		
Mekanik Özellikler				
	% 0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (Brinell)
Tavllanmış durumda	En az 210	430-600	20	150-190
Sıcaklık (°C)	100	200	300	400
Elastik modülü (GPa)	216	212	206	197
% 0,2 Akma dayanımı (MPa)	220	210	200	190
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	10	10	10,5	10,5
Korozyon dayanımı	Doğru bir şekilde ısıl işlem yapılmış durumda atmosferik korozyona direnci yüksektir. Klorür içermeyen sulu ortamlarda, zayıf organik asitli ortamlarda, deterjanda ve alkali çözeltilerde korozyon dayanımı yüksektir. Diğer mineral asitlere ve klorürlere korozyon dayanımı zayıftır. Sıcak işlemlerden sonra (kaynak gibi) taneler arası korozyona dayanımını tekrar kazanması için tavlama gerekir			

Diğer taraftan stabilize edilmemiş paslanmaz çeliklerin bilhassa kaynaklı birleştirmelerde yapılacak 700-800°C arasındaki bir tavlama, krom karbürleri küreleştirdiği gibi olası martenzit fazını da temperleyerek tokluğun daha fazla düşmesini önler. Bunun yanında tane sınırları etrafındaki krom dağılımı yayınma ile bir miktar düzgünleştirilip, pasiflik sınırına (% 11) yeniden ulaşılmış olur. Bu sebeplerle ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak bağlantıları, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı bağlantılarından daha sorunludur. Bu sorunun giderilmesi için şunların yapılması gerekir.

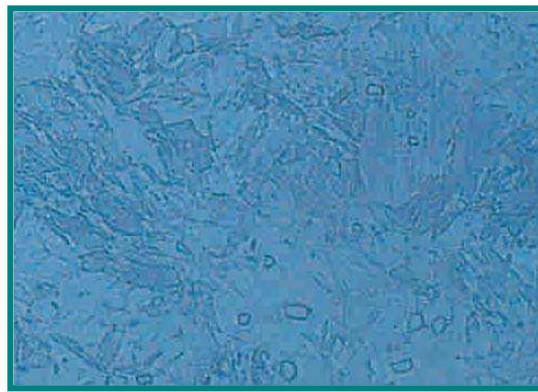
- ✓ Başlangıç tokluğunu artırmak üzere 150-200°C arasında ön ısıtma ve kaynak sonrası 700-800°C sıcaklık aralığında uygulanacak bir tavlama yapılmalıdır.
- ✓ Tane irileşmesini ve karbür çökmesini önlemek için kaynak işleminde ısı girdisi düşük tutulmalıdır [8].

Bu çeliklerin en karakteristik özelliği; kaynakta ve ısı etkisi altındaki bölgede oluşan ve kaynak dikişinin tokluğunda düşüşe neden olan tane büyümesidir. Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında seçilen dolgu metalindeki Cr içeriğinin ana

metaldeki ile aynı ya da ona yakın olmasında yarar vardır. 409 türü kaynak malzemeleri dolu tel olarak, 430 türü kaynak malzemeleri ise her formda üretilirler. Östenitik tip 309 ve 312 türü kaynak malzemeleri özellikle benzemez metallerin kaynaklı bağlantılarında kullanılır. Tane büyümesini en aza indirmek için kaynak dikişindeki ısı girdisi düşük olmalı ve ön ısıtma 300-450 °C arasında sınırlı tutulmalı, hatta sadece yararlı ise uygulanmalıdır. Yüksek alaşımlı ferritik paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu sadece levha ve boru şeklinde üretilir ve genellikle dolgu metali kullanılmadan TIG (GTA) yöntemi ile kaynak edilirler.

2.1.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çeliklerin içerisindeki krom miktarı % 12-17, karbon miktarı ise % 0.1'den fazladır. Çelikler yüksek sıcaklıklarda östenitiktir. Östenitleme sıcaklığı çeliğin cinsine göre 950-1050 °C arasındadır. Bu sıcaklıklardaki çeliğe su verilirse martenzitik bir içyapı elde edilir. Bu şekilde yüksek sertlik ve mekanik dayanım, karbon yüzdesi ile birlikte artar [1]. Martenzitik paslanmaz çelikler manyetiktir. Soğuk olarak haddelenebilir. Yüksek tokluğa sahiptirler. Hava ve kimyasal etkilere karşı dirençleri yüksektir. Martenzitik paslanmaz çeliklere gerektiğinde 650 °C gerilim giderme, 925 °C yumuşatma tavlama yapılabılır [7]. Şekil 2.3'de martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 2.3. Martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı [6].

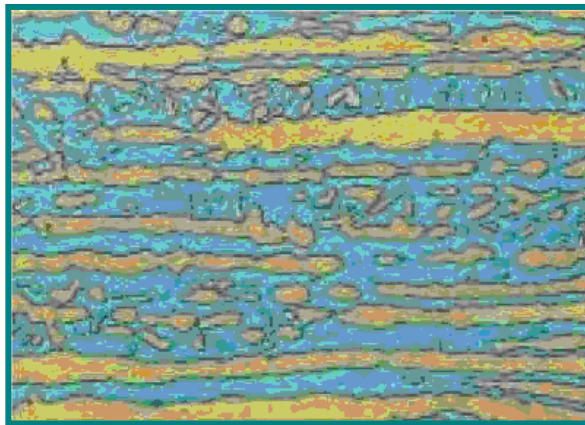
Martenzitik paslanmaz çelikler AISI 403, 410, 414, 416, 420, 422, 431 ve 440 sınıfı alaşımlardır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin ergitme kaynağında, soğuma sırasında sert ve kırılgan martenzitik yapı olduğundan, kaynak dikişinde çatlama eğilimi görülür [9].

Seçilen dolgu metalinin krom ve karbon içeriğinin ana malzemeninkine yakın olmasında yarar vardır. 410 türü dolgu malzemeleri örtülü elektrod, dolu tel ve özlü tel olarak üretilirler ve 402, 410, 414 ve 420 türü çeliklerin kaynağında kullanılabilirler. 420 türü çeliklerin içerdiği karbon oranını yakalamak eğer teknik açıdan yararlı görülüyorsa, dolu tel veya özlü tel olarak 420 kalite dolgu malzemelerinin kullanılmasında yarar vardır. 308, 309 ve 310 türü östenitik dolgu malzemeleri martenzitik paslanmaz çeliklerin birbirleriyle veya diğer çeliklerle olan kaynaklı birleştirmelerinde, dikişin kaynak edildikten sonraki şartlarda yüksek tokluğa sahip olması gereken durumlarda kullanılır.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin çoğunda ön tav sıcaklığının ve pasolar arası sıcaklığın 205-315°C arasında tutulması önerilir. % 0.2'nin üzerinde karbon içeren martenzitik tip paslanmaz çeliklere, kaynak dikişinin sünekliğini ve tokluğunu arttırmak amacıyla kaynak sonrasında genellikle ısıtım işlemi uygulanmalıdır.

2.1.3. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler en hızlı gelişen paslanmaz çelik grubudur ve yaklaşık olarak eşit oranda ferrit ve östenit fazları içeren bir mikro yapıya sahiptir. Dupleks paslanmaz çelikler, daha yüksek akma dayanımına sahip olmaları ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı daha fazla direnç sağlamaları nedeniyle, östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere oranla daha üstün avantajlara sahiptirler [8]. Şekil 2.4'de dupleks paslanmaz çeliğin mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 2.4. Dupleks paslanmaz çeliğin mikroyapısı [6].

Dubleks paslanmaz çeliklerde yüksek oranda krom (% 18-28) ve orta miktarda nikel (% 4,5-8) bulunur. Nikel miktarı en fazla % 8'dir. Çift fazlı mikroyapı çeliğin 1000-1050 °C sıcaklıkta tavlınması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir. Çizelge 2.3'de dubleks paslanmaz çeliklerin tipik kimyasal kompozisyonları verilmiştir.

Çizelge 2.3. Dubleks paslanmaz çeliklerin tipik kimyasal kompozisyonları [2].

Alaşım	UNS No	EN No	Malzeme Tanımı	C	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
2304	S32304	1.4362	X2CrNi 23-4	0.030	21.5-24.5	3.0-5.5	0.1-0.6	0.05-0.6	Cu:0.01-0.6
2205	S31803	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	0.030	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	-
255	S32550	1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	0.04	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	Cu:1.5-2.5
2507	S32750	1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	0.030	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	-
Z100	S32760	1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	0.030	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.2-0.3	Cu:0.5-1.0 W: 0.5- 1.0

Dubleks paslanmaz çeliklerin iyi bir mukavemet ve süneklilik özelliklerine sahip olması için pek çoğunun içerisinde % 2,5-4 arasında molibden içermektedir. Korozif etki yapan ortamlarda dahi çok uygun yorulma dayanımlarına sahiptirler. Gerekli tedbir alındığı takdirde kaynaklı birleştirmeleri oldukça kolaydır. Bu nedenle kimyasal işlemlerde kullanılan araç ve gereçlerin üretiminde, arıtma tesislerinde, denizcilik ve off-shore teknolojisinde sıklıkla kullanılır. Dubleks paslanmaz çeliklerin temel özellikleri:

- 1- Gerilmeli korozyona karşı yüksek bir mukavemete sahiptirler,
- 2- Klor iyonunun bulunmadığı ortamlarda daha yüksek korozif direnç gösterirler.
- 3- Östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek mekaniksel dayanım özelliklerine sahiptir.
- 4- İyi bir kaynak ve şekillendirme kabiliyetine sahiptir [1].

Dubleks paslanmaz çelikler aşağıdaki gruplara ayrılır:

- 1) Molibden'siz Cr-Ni-N alaşımları,
- 2) % 22 Cr içeren Cr-Ni-Mo-N alaşımları,
- 3) % 25 Cr, % 2,5'e kadar Cu içeren Cr-Ni-Mo-N-Cu alaşımları,

- 4) % 25 Cr, % 4 Mo ve % 0,2 N içeren Cr-Ni-Mo-N alaşımları,
- 5) % 25 Cr, % 0,2 N içeren Cr-Ni-Mo-N-W-Cu alaşımları [2].

Dubleks paslanmaz çelikler ferrit oluşturuvcu elementlerin oranına bağılı olarak % 10'a kadar delta-ferrit içerirler. Önce katılaşan bu faz, içyapının ince taneli olmasına neden olur. Sıcak çatlama duyarlığını artıran fosfor, kükürt, silisyum gibi elementler de büyük ölçüde ferrit içerisinde çözünerek östenit fazından uzaklaşır ve bu sayede dubleks paslanmaz çeliklerde sıcak çatlama riski azalır [9].

Dubleks paslanmaz çelikler kaynak sonrasında oluşabilecek gerilim korozyon çatlağı riskine karşı dirençlerini korurlar. Oyulma (pitting) direnci dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimine bağılıdır ve alaşım elemanı olarak N miktarı arttıkça oyulma direnci de artar.

Klorürlü solüsyonlarda oyulmaya karşı direnci yaklaşık olarak tespit edebilmek için aşağıdaki oyulma direnci eşdeğeri (PRE) formülü kullanılır.

$$\text{PRE} = \% \text{ Cr} + 3,3 \times (\% \text{ Mo}) + 16 \times (\% \text{ N})$$

Dubleks paslanmaz çeliklerde PRE 24 ile 40 arasındadır [2]. Bu tür çeliklerin oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri ile PRE değerleri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Dupleks paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri ve PRE değerleri [2].

Alaşım	UNS No	EN No	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Çentik Darbe Direnci (J)	PRE
2304	S32304	1.4362	400	630-800	25	60	25
2205	S31803	1.4462	460	640-840	25	60	32-34
255	S32550	1.4507	490	960-890	25	60	
2507	S32750	1.4410	530	730-930	20	60	>40
Z100	S32760	1.4501	530	730-930	25	60	

2.1.4. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir çelikler, östenitik, yarı östenitik veya martenzitik içyapıya sahip olabilirler. Alüminyum, bakır, titanyum ve niyobyum gibi elementlerle alaşımlama yapılarak çökelti oluşumu sağlanır. Çökeltme oluşumu sayesinde dayanımı 1700 MPa ulaşabilen paslanmaz çelikler elde edilir.

Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir çeliklerin başlıca özellikler şunlardır:

- 1) Orta ile iyi derecede korozyon dayanımına sahiptirler,
- 2) Çok yüksek mekanik dayanım göstermektedirler,
- 3) Oldukça iyi kaynak kabiliyetine sahiptirler,
- 4) Miknatıslanma özelliğine sahiptirler [1].

Oldukça yüksek akma dayanımı değerlerine sahip olan (~1700 MPa) çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler, yüksek teknolojinin kullanıldığı alanlarda kullanılmaktadırlar. En yaygın olarak karşılaşılan türü olan 630 çeliğine, uçak-uzay sektöründe sıkça rastlanılmaktadır [6]. Çizelge 2.5’de bazı çökeltme sertleşme paslanmaz çeliklerin bileşimleri verilmiştir[1].

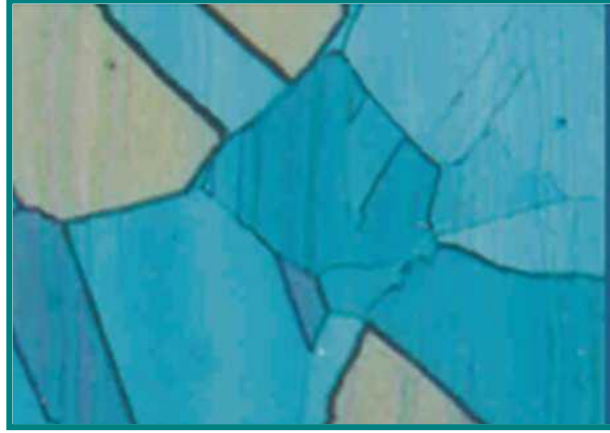
Çizelge 2.5. Bazı çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin bileşimleri.

Sınıf	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% N
17-7 PH ⁺	0.07	0.50	0.30	17.0	7.1		1.2	0.04
PH-15-7 Mo ⁺	0.07	0.50	0.30	15.2	7.1	2.2	1.2	0.04
PH-14-8 Mo ⁺	0.04	0.02	0.02	15.1	8.2	2.2	1.2	0.005
AM-350 ^s	0.10	0.75	0.35	16.5	2.75	2.75		0.10
AM-355 ^s	0.13	0.85	0.35	15.5	2.75	2.75		0.12

Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan standart kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilirler. TIG, MIG ve plazma ark kaynağı uygun yöntemlerdir. Örtülü elektrot ark kaynak yöntemi de uygundur ancak bu çeliklere uygun elektrotların olmadığı hallerde istenen mukavemet özelliklerini sağlamak zordur. Bu çelikler aynı zamanda direnç kaynak yöntemleriyle de kaynak edilebilirler.

2.1.5. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çeliğin içeriğinde yeterli miktarda nikel bulunduğu durumda oda sıcaklığında bile östenitik yapıya sahip olur. Bileşiminde % 16-25 Cr ve % 20'ye kadar Ni bulunan ve yüzey merkezli kübik (ymk) kristal yapısına sahip olan çeliklere östenitik paslanmaz çelik denir. 18 Cr/Ni'li östenitik çeliklerin ve bunların türevlerinin ergime sıcaklıkları bileşimlerdeki karbon miktarına bağlı olarak 1400 ile 1430 °C arasında değişir. Bazı elementler eklenmesiyle bu sıcaklık düşürülebilir. Östenitik içyapı dönüşüm göstermediği için normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemi uygulanamaz [5]. Şekil 2.5'de östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı verilmiştir [6].



Şekil 2.5. Östenitik paslanmaz çeliğin mikro yapısı [6].

Östenitik paslanmaz çelikler manyetik olmayıp, sünek ve tok bir yapıya sahiptirler. Dayanımları, genellikle soğuk şekillendirme uygulanarak artırılabilir gibi alaşımlandırma yaparak da artırılabilir. Bu malzemeler için karbon ve azot en etkili alaşım elementlerdir [6].

Toplam paslanmaz çelik üretiminin %70'i östenitik paslanmaz çelikler oluşturur. Östenitik paslanmaz çeliklerin en çok kullanılanı ise AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliklerdir. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin temel özellikleri;

- ✓ Mükemmel korozyon dayanımı,
- ✓ Mükemmel kaynak edilebilme kabiliyeti,

- ✓ Sünek olduklarından kolay şekilendirilebilme kabiliyeti
- ✓ Hijyeniktirler, temizlik ve bakım kolaylığı,
- ✓ Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahip olması,
- ✓ Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir,
- ✓ Tavlanmış olduklarında manyetik değildirler,
- ✓ Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilme özelliğine sahiptir [1].

Cr ve Ni+Mn oranları arasındaki denge, % 90-100 östenitten oluşan bir mikro yapının elde edilebileceği şekilde oluşturulmuştur. Bu alaşımlar, geniş bir sıcaklık aralığında sahip oldukları yüksek tokluk ve yüksek dayanım değerleri ile ön plana çıkarlar ve 540 °C'a kadarki sıcaklıklarda oksidasyona karşı dayanım gösterirler. Bu grupta yer alan malzemelerin başında 302, 304, 310, 316, 321 ve 347 gelmektedir. Bu çelikler için geliştirilen dolgu malzemeleri genellikle ana metal ile benzer yapıdadır. Ancak birçok alaşım için, sıcak çatlak oluşumunu engellemek amacıyla, düşük miktarda ferrit içeren bir mikro yapının oluşmasına olanak sağlayan dolgu malzemeleri kullanılır. Bu şartı gerçekleştirebilmek için 308 türü dolgu malzemeleri 302 türü çeliklerin, 304 ve 347 türü dolgu malzemeleri ise 321 türü çeliklerin kaynağında kullanılır. Diğer çelik türleri ise kendilerine benzer yapıdaki dolgu malzemeleri ile kaynak edilebilirler. 347 türü çelikler 308 H türü dolgu malzemeleri ile de kaynak edilebilir. Bu türdeki dolgu malzemeleri örtülü elektrod, dolu tel ve özlü tel olarak üretilir. 321 türü dolgu malzemeleri ise sınırlı olarak, sadece dolu tel ve özlü tel olarak üretilmektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında başlıca üç kaynak problemi ile karşılaşılır. Bunlar sırası ile; (1) ısının etkisi altında kalan bölgede "Krom Karbür" oluşması sonucu meydana gelen hassas yapı, (2) kaynak dikişinde görülen "Sıcak Çatlak" oluşumu ve (3) yüksek çalışma sıcaklıklarında karşılaşılan "Sigma Fazı" oluşumu riskleridir.

BÖLÜM 3

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetinden daha iyi ancak östenik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetinden daha zayıftır. Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynak dikişleri çoğu uygulamada herhangi bir ısı işleme tabi tutulmadan dahi istenen düzeyde mekanik dayanım ve korozyon direnci sağlarlar. Kaynak dikişi katılaştığında tamamen ferritiktir ancak, soğuma sırasında ferritin bir kısmı östenite dönüşür ve kaynak dikişi de dupleks olur. Isıdan etkilenen bölgede yeterli östenit oluşumu sağlayabilmek için çok hızlı soğumadan uzak durulmalıdır. Soğuma hızını etkileyen önemli faktörler; ısı girdisi, kaynak sürecinde belirtilen minimum ve maksimum kaynak parametreleri, ön tav ve pasolar arası sıcaklıklardır. Dupleks paslanmaz çeliklerde önerilen ve en çok kullanılan kaynak yöntemleri örtülü elektrod ark kaynağı, gazaltı (MIG, özlü tel) kaynağı, TIG kaynağı, tozaltı kaynağı ve plazma ark kaynağıdır. Dupleks paslanmaz çeliklerde ısı girdisinin 5.000 – 25.000 J/ cm, süper dupleks paslanmaz çeliklerde ise 5.000 - 15.000 J/cm arasında olması tavsiye edilir. Isı girdisi aşağıdaki formülle hesaplanabilir [2]. $H = \text{Isı girdisi, J/ birim uzunluk}$

$H = (60 \times I \times V)/S$; burada

$I = \text{Akım şiddeti (A), } V = \text{Gerilim (V) ve } S = \text{Kaynak hızı, birim uzunluk / dakikadır.}$

Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında genellikle koruyucu gaz olarak Argon gazı kullanılır. Ancak bu kaynak bölgesinde östenitin azalmasına neden olacağından dolayı argon gazının içerisine bir miktar N ilave edilmelidir.

Dupleks paslanmaz çeliklerin içinde bulunan % 0.03 miktarındaki C taneler arası korozyon tehlikesini ortadan kaldırır. Ancak; katılaşma sırasında oluşabilecek olan

katılma çatlağı ve H kırılabilirliği için bazı önlemler alınması gerekir. Ön ısıtma, dubleks paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediğinden tavsiye edilmez. Kaynak sonrası ısıtma işlemi ise dolgu metali kullanılmadan yapılan kaynaklar veya ana malzemeyle benzer bileşime sahip dolgu metaliyle yapılan kaynaklar dışında tavsiye edilmez [10]. Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında Argon ve Helyum gaz karışımı kullanımı Helyum gazı sayesinde kaynak metalinin akışkanlığını artırır.

Tek taraflı kaynak tasarımlarında en iyi sonuç kök pasonun TIG kaynağı ile arkadan gaz koruması yapılarak elde edilir. Gaz koruması kaynak bölgesindeki sıcaklık 260 °C'nin altına düşene kadar yapılması gerekir [2]. Çok hızlı soğumaya neden olduğundan dolayı dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında bakır altlık kullanılmamalıdır.

3.1. ÖRTÜLÜ ELEKTROD ARK KAYNAĞI

Dubleks paslanmaz çelikler doğru akım (DC) kaynak makineleri ile elektrod pozitif (+) kutupta kaynak edilir. Elektrod seçimi kaynak edilecek malzemenin kimyasal kompozisyonu ve kaynak pozisyonlarına göre yapılır. Dupleks ve süper dubleks paslanmaz çeliklerin örtülü elektrodla ark kaynağı için çeşitli kaynak elektrodları üretilmektedir. Ancak bazik ve rutil karakterli elektrodların kullanılması önerilir. Örtülü elektrodla ark kaynağı ile dubleks paslanmaz çelik sacların birleştirilmesi yapılabildiği gibi paslanmaz çelik boruların kaynaklı birleştirilmelerinde dolgu pasoların oluşturulmasında başarı ile kullanılan bir yöntemdir [10].

Örtülü elektrod ile kaynak yaparken kaynağın arka kısmının gaz ile koruması gerekir. Eğer gaz koruması yapılması mümkün değil ise kaynaktan sonra arka taraftan kök pası taşlanarak yeniden kaynatılmalıdır. Ark başlangıçları daima kaynak ağzının içinde yapılmalıdır. Kaynak sırasında kısa ark boyu tercih edilmeli, kaynak başlangıç ve bitişleri yerleri taşlanmalıdır. Pasolar arası sıcaklığı 150 °C'nin altında tutacak ve iyi bir kaynaklı birleştirme gerçekleştirecek minimum kaynak akımı tercih edilmelidir. Çok sıralı kaynaklarda curuflar ve sıçrantılar temizlenmeden diğer pasoya geçilmemelidir.

3.2. TIG KAYNAĞI

TIG kaynak yöntemi dubleks paslanmaz çeliklerde 4 mm'den ince kesitli parçaların tek taraflı kaynağında, çok sıralı kaynakların kök pasolarında, boru kaynaklarında ve puntalama işlerinde kullanılır. Koruyucu gaz genellikle Argon kullanılır. Kök pasolarda ve puntalama işlemlerinde kaynak arka yüzeyi aynı özellikteki koruyucu gaz ile korunmalıdır. Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan kaynak makinesi yüksek frekans (HF) devresi olan doğru akım (DC) kaynak makinesi olmalıdır. Kaynak makineleri çok hassas kaynak akım ayarı ve öngaz-songaz krater kapatma seçeneklerine sahip olmalıdır. Uygulamada tungsten elektrod ucunun ergiyip bozulmaması için tungsten elektrod negatif (-) kutupta olmalıdır.

3.3. MIG KAYNAĞI

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağının ekonomik ve yüksek metal yığıma hızına sahip olması gereken yerlerde MIG kaynak yöntemi tercih edilir. Kullanılacak olan MIG kaynak makinelerinin sabit gerilimli olması ve kullanılan elektrodun (tel) doğru akım pozitif (+) kutupta bağlı olması gerekir.

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirilmelerinde ve dolgu pasolarında MIG kaynak yönteminde Ar+% 1-3 O₂, Ar+% 30 He+% 1-3 O₂ veya Ar+% 15 He+% 1-3 O₂ karışımı gazları kullanılır. Kök paso gazı olarak saf Ar veya %3 N₂ eklenen karışım gaz önerilir [1].

Helyum (He) ilavesi, kaynak metalinin akışkanlığını iyileştirir. N (azot) ilavesi ise ferrit/östenit dengesini sağlar. Kök kaynaklarında ve puntalama esnasında alttan gaz koruması yapılır [2]. MIG kaynağı kapalı ortamda yapılmalı ve kaynak torcu dike yakın konumda tutulmalıdır.

3.4. TOZALTI KAYNAĞI

Kaynak ağzı tasarımı ve kaynak parametreleri diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi tam nüfuziyet sağlayacak şekilde tercih edilmelidir. Dupleks paslanmaz

Çeliklerin kaynağında, en uygun değerde mekanik ve korozyon özelliklerini elde etmede kaynak metalinde ferrit / ostenit faz dengesinin sağlanması gerekir [10].

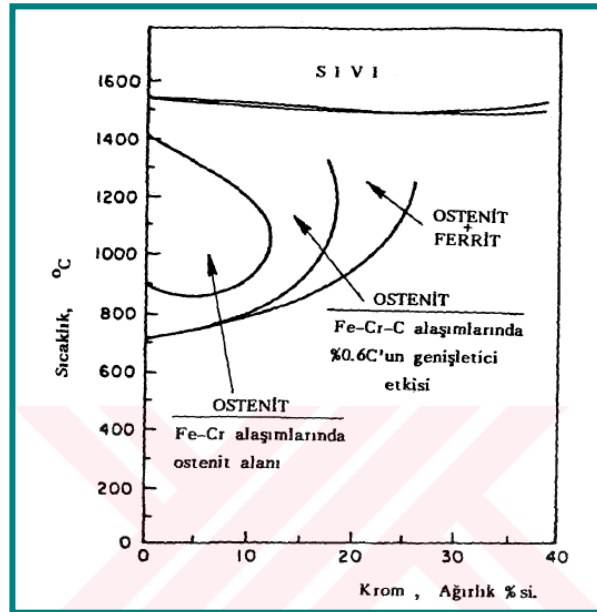
Tozaltı kaynak telleri ana metale göre daha yüksek N elementi içermeli ve bu tellerle bazık karakterli nötr kaynak tozlar kullanılmalıdır. Tozaltı kaynağı ile birleştirilen dubleks paslanmaz çeliklerde yüksek mekanik özellikler elde edilir [2].

BÖLÜM 4

FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ

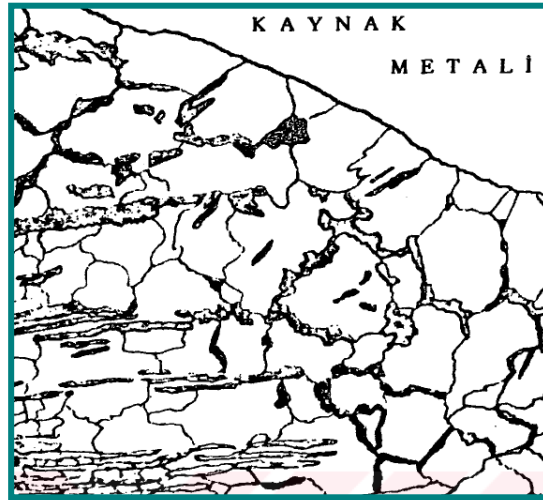
Ferritik paslanmaz çelikler, TIG, MIG, elektrik ark kaynağı, plazma ark kaynağı, direnç kaynağı, elektron ışın kaynağı, lazer ışın kaynağı ve tozaltı kaynak yöntemleri kullanılarak kaynak edilebilir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında yaşanan en büyük sorun 1150 °C'de paslanmaz çelikte meydana gelen tane irileşmesidir. Bu tane irileşmesi çeliğin gevrek ve kırılğan bir yapıya sahip olmasına neden olur. Ferritik paslanmaz çeliklerde katı halde γ/α dönüşümü gerçekleşmediği için ısıl işlem ile bu sorun giderilemez. Bu nedenle bu oluşumu önlemek paslanmaz çeliklerin bileşimine ve elektroda bir miktar N ilave edilir. Yani ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan elektrotlarda bir miktar N bulunmalıdır [7]. Şekil 4.1'de Fe-Cr alaşımlarında karbon miktarının östenit alanını genişletici etkisi görülmektedir.



Şekil 4.1. Fe-Cr alaşımlarında karbon miktarının östenit alanını genişletici etkisi [7].

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan bir diğer sorunda ITAB'da meydana gelen taneler arası korozyon hassasiyetidir. Özellikle stabilize edilmemiş, yüksek Cr ve C içeren ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan önemli bir sorundur. Bu olay, ostenitik yapıya oranla ferritik yapı içinde krom karbür çökmesi daha yüksek oranlarda olduğundan dolayı, ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında oluşanın aksine, ferritik türlerde 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hızlı soğutma sırasında ortaya çıkmaktadır. Kaynak sırasında bu tür çekilerin kaynağa yakın olan kısımları uzun süre ısı etkiye maruz kaldıkları için bu bölgelerde taneler arası korozyona karşı hassasiyet artar. Bunu önlemek için stabilize edilmemiş %12 Cr'lu ferritik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri, kaynak işleminden hemen sonra 750 °C'de tavlmalıdır [10]. Yüksek miktarlarda Cr ve C içeren ferritik paslanmaz çeliklere ITAB özelliklerini iyileştirmek amacı ile 200 °C'lik bir ön tavlama işlemi uygulanabilir [7]. Şekil 4.2'de % 17 Cr'lu ferritik paslanmaz çelikte ITAB'da tane irileşmesi ve taneler arası martenzit ağı oluşumu görülmektedir.



Şekil 4.2. % 17 Cr'lu ferritik paslanmaz çelikte ITAB'de tane irileşmesi ve taneler arası martenzit ağı [7].

4.1. ÖRTÜLÜ ELEKTROD ARK KAYNAĞI

Ferritik paslanmaz çeliklerin örtülü elektrod ark kaynağında, doğru akım ters kutuplama (DATK) kullanılır. Elektrik ark kaynağı, kaynak bölgesinin saflığını bozmasından dolayı TIG ve MIG kaynağı kadar sağlıklı değildir. Kaynak sırasında

meydana gelebilecek olan tane irileşmesinin önüne geçebilmek için Ferritik paslanmaz çeliklerin örtülü elektrod ark kaynağı ile yapılan kaynak işlemlerinde kullanılan elektrodların ilave N içermesi gerekir [7,10].

Kaynak sırasında ergimiş bölgede oluşabilecek olan tane irileşmesi sonucu meydana gelen gevreklik östenitik elektrod kullanarak önlenebilir. Az karbonlu ferritik çelikler için 18/8 östenitik,% 0,1 den fazla C ferritik çelikler için % 25 Cr ve % 20 N içeren elektrodların kullanımı kaynaklı bağlantıda oluşacak tane irileşmesini önlemeye yardımcı olur [7].

4.2. TIG KAYNAĞI

Ferritik paslanmaz çeliklerin TIG kaynağı ile yapılan kaynaklı birleştirilmesinde doğru akım ve elektrotun negatif kutuplama olması gerekir. Yani doğru akım düz kutuplama tercih edilmelidir [7].

Ferritik paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında alaşımli elektrodlar ve koruyucu gaz olarak ise Ar, He ve bunların karışımı olan gazlar tercih edilir. Ar ve He gazlarına N katkı olarak, ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında asla kullanılmaz. Çünkü şiddetli gevreklik ve korozyon dayanımının düşmesine neden olur [10].

4.3. MIG KAYNAĞI

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında en büyük sorun yaratan tane irileşmesi MIG kaynağında yüksek kaynak hızı ve bazı durumlarda östenitik dolgu teli tercih edilerek önlenebilir. MIG kaynağı ile Ferritik paslanmaz çelikleri kaynatırken doğru akım kullanmaya ve elektrodun pozitif kutup olmasına dikkat edilmelidir. Eğer ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında sprey ark kullanılırsa gaz olarak Argon+%1 O karışımından oluşan koruyucu gaz, eğer kısa ark kullanılırsa Helyum + Argon+%2 CO₂ içeren koruyucu gazları tercih edilmelidir [10].

Kısa ark, düşük ark gerilimi ve kaynak akımı ile küçük çaplı elektrot kullanılmasını zorunlu kıldığından ince kesitlerin kaynağı için çok uygundur. Kısa ark ITAB'a

düşük ısı girdisi vermesi sebebiyle ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında meydana gelebilecek olan tane irileşmesini önler. Fakat kısa arkın sağladığı, düşük ısı girdisi yetersiz ergimeye neden olabilir. Sonuç olarak kısa ark kritik olmayan durumlarda sınırlı kullanılmalıdır. Düşük ısı girdisi ile % 10 ve daha az ergime oranları elde edilmektedir.

Sprey ark, büyük çaplı teller ve kısa arkta daha yüksek gerilim ve kaynak akımları gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Sprey ark ile kısa arka göre daha fazla nüfuziyet ve yeterli ergime meydana gelmiş güvenilir bağlantılar elde edilmesine karşın yatay ve dik pozisyonlarda kullanımlarında bazı sınırlamalar vardır.

Darbeli ark ise, tüm kaynak pozisyonlarında ve büyük çaplı teller ile kullanılabilir ve kaynak banyosu daha iyi kontrol edilir. Dolgu oranının sprej arka göre daha az olmasına rağmen toplam ısı girdisi daha düşük olduğundan ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında meydana gelen tane irileşmesi en aza iner [10].

4.4. TOZALTI KAYNAĞI

Tozaltı kaynak yönteminde ısı girdisi ve dolgu oranının oldukça yüksektir. Ayrıca kaynak metalinin katılaşması, kaynak sırasında oluşan banyonun büyüklüğü nedeni ile çok yavaş olmaktadır. Bu nedenle alaşım elementlerinin segregasyonu ve mikroyapıda tane irileşmesi gibi problemler ile karşılaşmaktadır [1].

4.5. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI

Ferritik paslanmaz çeliklerde tokluk kaybını önlediği için elektrik direnç kaynağı rahatlıkla kullanılabilir [10]. Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirilebilirliği ile ilgili olan çoğu bilgi, ya hidrojen gevrekliği ya da kaynak katılaşma çatlakları ile alakalıdır. Yüksek kromlu alaşımların, kaynak gerektirmeyen uygulamalarda kullanılması veya kaynak zorunlu ise çatlama önlemek için çok kontrollü şartlar altında kaynatılması gerekmektedir. Düşük kromlu alaşımlar ise kaynak sırasında çok az çatlaklara neden olan bir etkiye sahiptir. Orta kromlu alaşımlarda ise hem hidrojen gevrekliği, hem de kaynak katılaşma çatlaklarından etkilendiği tespit edilmiştir [11].

BÖLÜM 5.

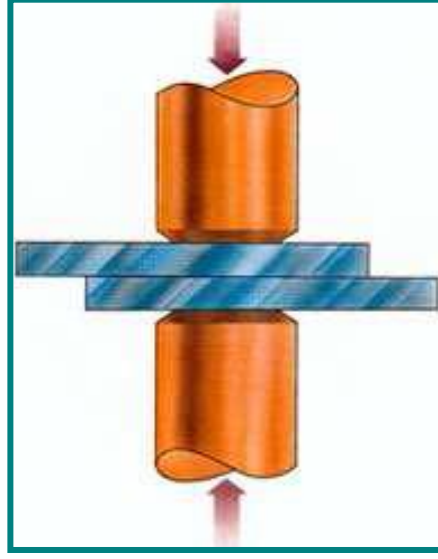
ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI

Elektrik direnç kaynağı, bakır elektrotlar arasında basınç altında bir arada tutulan numune parçalarından geçen elektrik akımına karşı, parçalarının gösterdiği direnç nedeniyle meydana gelen ısı ile yapılan kaynak yöntemidir. Kaynak için gerekli olan akım, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki şebeke elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde kaynak akımına dönüştürebilen kaynak makinasından sağlanır. Gerekli basınç veya elektrod kuvveti ise pnömatik veya mekanik donanımlardan sağlanır [3].

5.1. YÖNTEMİN TARİHÇESİ

Elektrik direnç kaynağı ABD’de 1877 yılında bir rastlantı sonucu bulunan oldukça eski kaynak yöntemlerinden birisidir. Birinci Dünya Savaşı’na kadar elektrik direnç kaynağı endüstride çok az kullanılmıştır. Sonraları ise elektrik devrelerinde ve zaman kontrol cihazlarında meydana gelen gelişmeler sonucunda otomotiv endüstrisinde çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde en çok kullanılan yöntem olmuştur. ITAB’ın küçük olması, çok kısa bir sürede birleştirmeyi sağlaması, düşük işçilik giderleri ve seri üretime uygunluğu nedeni ile bu yöntem otomotiv endüstrisinde ön plana çıkmıştır [12].

Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilen malzemeler diğer kaynak yöntemlerine göre daha fazla serbestliğe sahiptir. Bu yöntemle birçok metal veya metal çiftinin değişik biçim ve boyutlarda kusursuz bir biçimde birleştirmek mümkündür [13]. Şekil 5.1’de elektrik direnç nokta kaynağının şematik gösterimi verilmiştir.

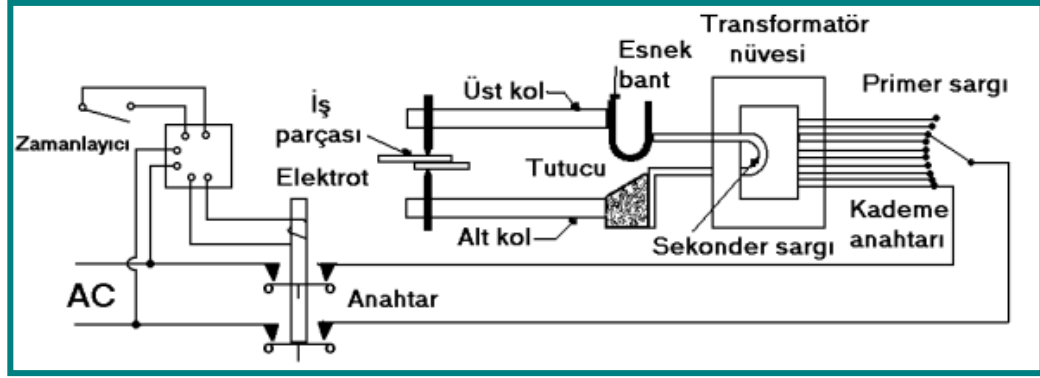


Şekil 5.1. Elektrik direnç nokta kaynağının şematik gösterimi.

5.2. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI PRENSİBİ

Kaynak akımı; yüksek gerilim ve düşük akım şiddetini, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetine dönüştüren transformatörler yardımı ile sağlanır. Gerekli elektrot baskı kuvveti ise, hidrolik, pnömatik veya mekanik donanımlardan elde edilir [14].

Transformatörler şebekeden aldığı elektriğin gerilimini düşürüp, akımını arttırarak nokta direnç kaynağı için gerekli olan ısıyı meydana getirir. İş parçası nokta direnç kaynağı elektrodları arasında belli bir kuvvet altında tutulduğunda üzerinden geçen elektrik akımına karşı direnç göstererek ısı oluşmasına neden olur. Bunun sonucunda iş parçası tek veya çok noktada bölgesel olarak ergiyip basınç altında birleşir. Akım yoğunlaşması ile ısınan kaynak metalinde ergimiş çekirdek oluşur. Akım kesildiğinde, kaynak metali hızlı bir biçimde soğuyarak katılaşırken elektrot kuvveti uygulanmaya devam etmektedir [3]. Şekil 5.2’de nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 5.2. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi [3].

Uygulama, bir biri üstüne getirilen sacların nokta direnç kaynağı bakır elektrodları arasında sıkıştırılması ve tam elektrot kuvvetinin uygulanması ile akımın devreye girmesi şeklinde yapılır. Isı için ayrıca bir kaynak yoktur. Isı birleştirme yerinde Joule kanununa göre oluşur.

Nokta direnç kaynağı ile 12 mm ye kadar çelik saclar, 1 mm ye kadar bakır saclar ve 5 mm ye kadar alüminyum saclar kaynak edilebilir. Alüminyum ve bakırın düşük elektrik dirençleri ve yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle kalın sacların kaynağı zordur [13].

Nokta direnç kaynağında en önemli etken kaynak yapılacak malzemenin direncidir. Örneğin, demirin direnci yeteri kadar yüksek olduğu için demir parçaların kaynağı kolaydır, buna karşın alüminyumun direnci az olduğu için kaynatılması zordur [14].

5.3. ELEKTRİK DİRENÇ KAYNAĞI ÇEŞİTLERİ

Çok değişik elektrik nokta direnç kaynağı yöntemleri vardır. Bu kaynak yöntemlerinin hepsinde temel prensip kaynatılacak parçalar üzerinde yüksek bir direnç elde edip birleştirme noktasında ısıyı yoğunlaştırmaktır. Bu temel prensip kullanılarak farklı teknikler kullanılan yöntemler geliştirilmiştir. Direnç ise iletkenin öz direncine ve geometrisine göre değişir. Bütün elektrik nokta direnç kaynağı yöntemlerinde kaynak elektrodları ve iş parçaları arasında fiziksel bir temas mevcuttur.

Bütün elektrik direnç kaynağı yöntemleri için uygun bir akım şiddeti ile kaynak zamanına ihtiyaç vardır. Devre boyunca kapalı bir akım geçer. Kullanılan kaynak yöntemine uygun olarak biçimlendirilmiş olan elektrodlar tarafından uygulanan basma kuvveti ile akımın sürekliliği sağlanır. Kaynak sırasında değişik işlemlerin sırası en genel ifade ile şöyledir: İlk önce sınırlı bir hacimde metal ergimesi için gerekli ısı miktarını ulaşmak ve sonra bu metalin baskı altında tekrardan katılaşması ve soğumasına imkân sağlamaktır. Zaman tasarrufu sağlamak ve ısı kayıplarını azaltmak için iş parçasının ısınma ve soğuma hızları mümkün olduğunca yüksek olması gerekir. Gevrek bir kaynak dikişi meydana getirecek kadar yüksek bir soğuma hızı olursa kaynak makinesinde gerçekleştirilen bir ısıtma işlemi gerekmektedir [15].

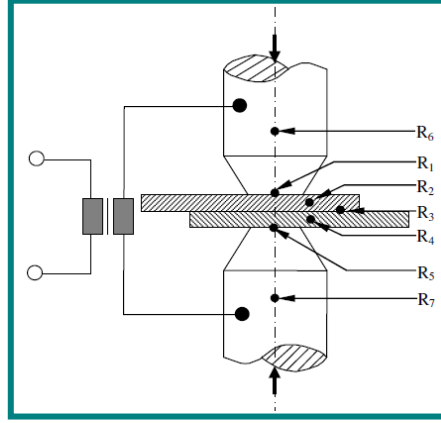
Elektrik direnç nokta kaynağı yöntemleri üç gruba ayrılmaktadır [3];

- 1) Nokta Kaynağı
- 2) Dikiş Kaynağı
- 3) Kabartılı Kaynak.

5.3.1. Elektrik Direnç Nokta Kaynağı

Elektrik direnç nokta kaynağı, direnç kaynağı türleri içerisinde en sık kullanılan yöntemdir. Kaynatılacak parçalar iki bakır elektrot arasına alınır ve belirli bir baskı uygulanmasıyla elektrik akımının geçişi sağlanır.

Kaynak için gerekli olan akım, şebekeden alınan yüksek gerilim ve düşük akım şiddetini, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde kaynak akımına dönüştüren kaynak makinasından sağlanır. Gerekli basınç veya elektrod kuvveti, pnömatik veya mekanik donanımlar ile gerçekleştirilir [16]. Şekil 5.3'de nokta direnç kaynağının prensip resmi verilmiştir [3].



Sekil 5.3. Nokta direnç kaynağının prensip resmi [3].

I akımı, R omik direncinden, t süresince geçtiğinde, Joule kanununa bağlı olarak, Q birim ısı açığa çıkar.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Burada, $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7$ 'dir.

Yani sekonder devredeki toplam dirençtir.

-Malzeme dirençleri

R_6, R_7 : Elektrotların direnci.

R_2, R_4 : İş parçalarının dirençleri.

-Temas dirençleri

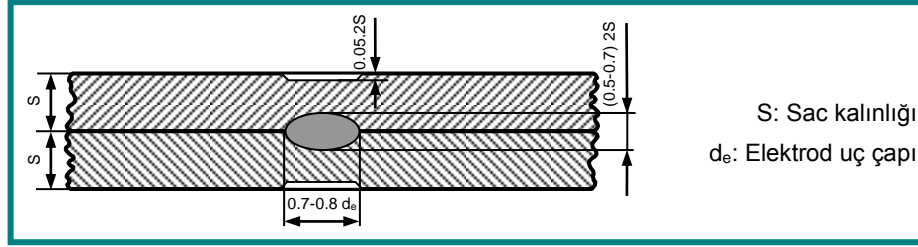
R_1, R_5 : Elektrod - malzeme temas direnci.

R_3 : Malzeme - malzeme temas direnci.

Malzeme direnci, malzemenin fiziksel özelliklerine bağlıdır ve değişken değildir. Temas dirençleri ise malzemenin ve elektrotların uç durumlarına bağlı olarak değişir. Kaynak esnasında R_3 , en büyük ısının gerçekleşeceği direnç olarak kabul edilir. Diğer dirençlerdeki ısınmaların olabildiğince düşük olması gerekir. Bu ise, kaynak akımı (I_k)'nın, kaynak süresi (t_k)'nin ve F elektrot kuvvetinin seçimiyle sağlanır. R_1 , R_3 ve R_5 temas dirençleri bağlantının kalitesini belirler. R_3 kaynak bölgesindeki sıcaklık, malzemenin ergime sıcaklığının (t_e) üzerine çıkar. Burada sıvılaştıran malzeme, kaynak sonrasında kaynak çekirdeğini oluşturur. R_1 ve R_5 temas bölgelerindeki ısınma, olabildiğince düşük tutulur. Bu ise, ısı iletkenliği yüksek olan elektrod ve malzeme yüzeyleriyle temin edilir. Yüzeyde ısı iletimini engelleyecek herhangi bir pas, yağ ve boya gibi etkenlerin olmaması gerekir. Temas dirençleri,

farklı büyüklükte ısı miktarlarına ve bağlantı dayanım özelliklerinin farklılaşmasına yol açar [3].

Hatalı kaynak dikişlerinin önüne geçmek için nokta direnç kaynağında, elektrod baskı kuvveti, akım uygulaması sonu arttırılmaktadır. Nokta çapının büyüklüğü kullanılan elektrodun çapına bağlı olarak ortaya çıkar. Hatasız olduğu kabul edilen bir birleşmede ortaya çıkan noktanın çapı $(0.7-0.8) d_e$ olarak verilmektedir. Ancak en ideal olanı bu çap ile elektrod çapının eşit olmasıdır. Kaynak noktasının diğer boyutları, alabilecekleri en büyük değerler olarak verilmiştir [16]. Şekil 5.4'de nokta direnç kaynağının boyutları verilmiştir.

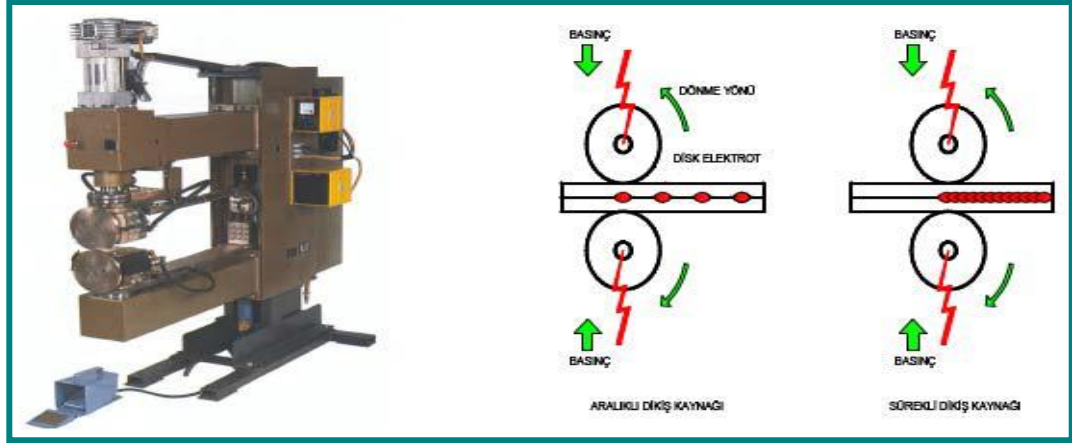


Şekil 5.4. Nokta direnç kaynağının boyutları [3].

5.3.2. Elektrik Direnç Dikiş Kaynağı

Dikiş direnç kaynağı, uygulama tekniği bakımından nokta direnç kaynağına benzer. Nokta direnç kaynağında noktaların ardışık olarak sıralanması dikiş direnç kaynağını meydana getirir. Dikiş kaynağı, aynı nokta kaynağında olduğu gibi birbiri üzerine bindirilen sac parçaların, temas yüzeylerinden geçen elektrik akımına karşı gösterdiği direnç ile ergiyerek basınç altında kaynatılmasıdır. Birleştirilecek olan sac iş parçaları, bakır alaşımdan yapılmış disk biçimindeki iki elektrot arasına yerleştirilerek pnömatik veya hidrolik bir sistemden elde edilen basınç altında sıkıştırılır. Bakır disk elektrotlar dönmeye başladığı anda elektrik akımı da verilerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Eğer tekerleklerin dönmesi sırasında akım kesilerek dönme devam ederse aralıklı dikiş kaynağı yapılmış olur. Eğer sürekli elektrik akımı kullanılırsa kesintisiz bir kaynak birleşimi sağlanır. Bu tür kaynaklı birleştirmeler sıvılar ve gazlar için sızdırmazlık özelliğine sahiptir. Elektrotların soğutulması otomatik bir dolaşım sistemi ile veya elektrot üzerine su püskürtülerek yapılır.

Soğutma sıvısı olarak içerisinde %5 oranında bor yağı karışımı bulunan su kullanılır. Dikiş direnç kaynağında akım (amper) ayarı kaynatılan malzemenin cinsine, kaynatma hızına, kaynatılan malzemelerin kalınlığına ve soğutma suyu olarak kullanılan sıvının miktarına göre farklılıklar gösterebilir [12]. Şekil 5.5’de dikiş direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesi detayı verilmiştir.



Şekil 5.5. Dikiş direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesi detayı [12].

Dikiş kaynağının en önemli uygulama alanlarından biri, benzin tanklarının imalatıdır. Yakıt tanklarının sızdırmazlığı otomobil endüstrisinde emniyet açısından birinci derecede önemlidir. Dikiş kaynağı, parçaları birbirine yekpare bir parçaymış gibi kaydattığı için ve seri imalatta otomatikleşmeye uygun olması nedeni ile dikiş kaynağının otomobil sanayinde tercih edilmesinin en önemli tercih sebebidir. Ayrıca bu kaynak yönteminin çok geniş bir uygulama mevcuttur.

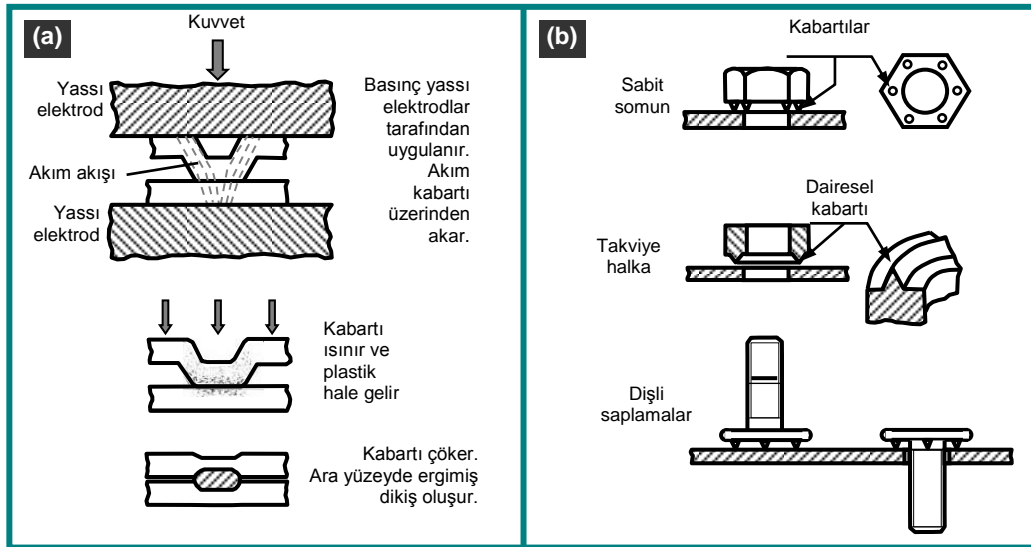
Bu yöntemde kullanılan elektrod çapları 50-600 mm arasında değişmektedir. Elektrod ise, soğuk çekilmiş bakır veya ısıl işlem görmüş sert nitelikteki bakır alaşımından üretilir (bakır-kadmiyum, bakır-krom, bakır-tellür). Elektrotların (kaynak işlemi sırasında) parçalara temas eden yüzeylerinin genişliği, kaynatılacak parçaların kalınlığına göre değişiklik gösterir. Normal olarak kaynak genişliği, kaynatılan iş parçalarının en incisinin kalınlığının 1,5-3 katı kadar olmalıdır. Kaynak genişliği temel olarak ince metal kalınlığından daha büyüktür. Bu da elektrodun kaynak sırasında yıpranma değerini minimuma indirmektedir [16].

5.3.3. Kabartılı Kaynak

Kabartılı nokta kaynağı, prensibi nokta kaynağına benzerdir. Nokta direnç kaynağında sekonder akımın geçiş yüzeyi, elektrod uçlarının boyutları ve şekilleriyle sınırlanır. Kabartılı nokta kaynağında ise birleştirilecek parçaların birinde veya ikisinde de bulunan kabartılarla sınırlandırılmıştır.

Kabartılı nokta kaynağında, aynı nokta direnç kaynağında olduğu gibi parçaların elektrik direnci ile bölgesel olarak erime sağlanır ve basınç uygulanarak kaynak yapılır. Kabartılar, ısının homojen dağılımını sağlar. Kabartılar, çeşitli şekillerde olabilir. Bu kabartılar preslerde şekillendirilebildiği (sun'i kabartı) gibi, parçalarda tabii olarak da (tabii kabartı) olabilir [15]. Şekil 5.6'da kabartılı kaynağın şematik resmi verilmiştir.

Kabartılı kaynakta, birleşme yeri, saclardan birinin yüzeyinde yükselen bir kabartı yardımıyla belirlenir (Şekil 5.6.a). Saclar bir araya getirildiklerinde sadece kabartının bulunduğu yerden birbirlerine temas ederler. Arayüzeyi boyunca geçen akım kabartı boyunca yoğunlaşır ve bu sayede kabartı hızla ısınır. Isının etkisi ile kabartı plastik hale gelir ve sonuçta da ergidiğinden çöker ve arayüzeyde ergimiş bir bölge meydana gelir. Kaynaklı birleştirme tamamlandığında elde edilen sonuç nokta kaynağına benzerdir.



Şekil 5.6. Kabartılı kaynak; a) tekli kabartılı kaynak, b) çoklu kabartılı kaynak [3].

Uygulamada iki veya üç kabartı aynı anda kaynatılır. Kaynak makinaları temelde nokta kaynağında kullanılan makinalara benzer. Fakat elektrodun yerine bağlantı bölgesine üniform bir basınç uygulayan, düz, bakır tablalar konulmuştur. Kabartıların şekil ve boyutları önceki deneyimlere bağlı olarak veya deneme yanılma yöntemi ile belirlenir. Kabartılı kaynak, uzun bindirmeli birleştirmelerde çok sık kullanılmaz. Bu yöntem küçük bağlantı parçalarının sac malzemelere birleştirilmesi esnasında çok daha fazla kullanışlıdır. Kabartmalı nokta kaynak yöntemi otomobil gövdelerinin, ev cihazlarının, büro mobilyalarının ve makina parçalarının üretiminde geniş ölçüde kullanılmaktadır. Örneğin; sabit somunların otomobil şaselerine kaynatılması, bir yüzeyde oluşturulan küçük kabartıların sayesinde gerçekleştirilir (Şekil 5.6.b) [3,16].

5.4. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI DEĞİŞKENLERİNİN İNCELENMESİ

Akım ve zaman, kaynak işlemi sırasında en önemli faktörlerdir. Bu değişkenlere birbirine uyumlu olduğunda en iyi kaynak sonucu elde edilir. Bu değişkenleri kontrolü ve makinanın otomasyonu kaynak makinası üzerindeki elektronik kontrol ünitesi ile yapılır. Akım şiddeti ve zaman uygun bir biçimde ayarlandığında istediğimiz kaynak çekirdek çapını elde edebiliriz. Eğer zaman kısa tutulursa kaynak çapı küçülür. Eğer zaman uzun tutulursa ergiyen hacim artar ve ergiyik dışarı fıskırır.

Bu parametreler sayesinde yavaş ve hızlı kaynak diye iki grup kaynak kavramı ortaya atılmıştır. Kaynağın ilk geliştirildiği dönemlerde yüksek güçte elektrik enerjisi olmadığından uzun süreli, düşük akım ve düşük kuvvetli kaynaklar yapılmıştır. Bu kaynak yönteminde düşük kuvvet uygulanmasına rağmen elektrodun malzemeye fazla batması sebebi ile kaynak etrafındaki renk değişim alanı çok geniştir. Bu durumda nokta başına düşen enerjide daha fazladır. Teknolojinin gelişmesiyle yüksek kuvvet ve akım uygulayabilen kaynak sistemleri gelişmiştir. Bu yeni gelişen sistem sayesinde daha kısa süre ve daha az enerji ile daha sağlam puntalar elde edilmektedir. Direnç nokta kaynak yönteminde, yapılacak kaynağın sağlamlığını belirleyen kaynak değişkenleri her zaman birleştirilecek sac parçaların ince kalınlıkta olanına göre ayarlanmalıdır [3].

Kaynak kalitesini etkileyen başlıca kaynak değişkenleri şu şekilde sıralanır;

1. Kaynak akımının etkisi
2. Kaynak zamanının etkisi
3. Elektrot kuvvetinin etkisi
4. Elektrot bileşimi ve şeklinin ısınma üzerine etkisi
5. Elektrot bileşiminin etkisi
6. Elektrot şeklinin etkisi
7. Elektrotların malzemesi ve boyutları [17].

5.4.1. Kaynak Akımının Etkisi

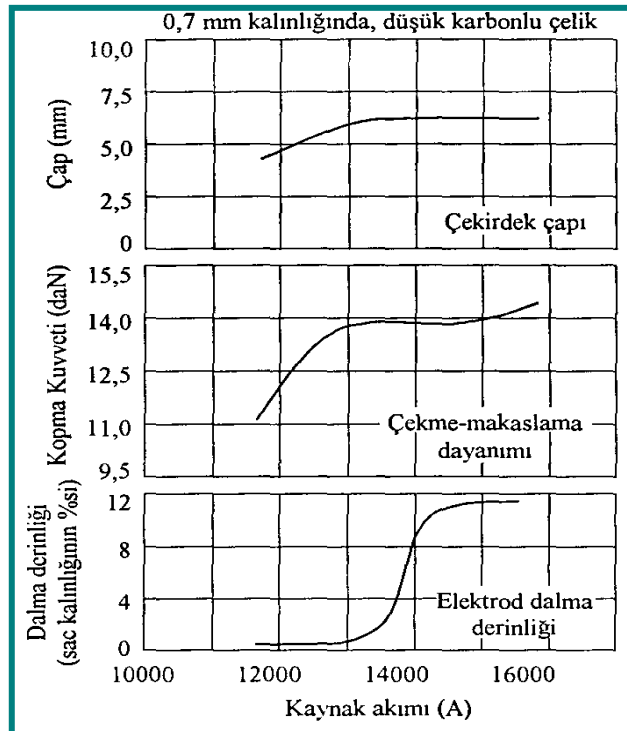
Kaynak için gerekli olan ısının oluşmasında dirençten sonra etkili olan faktör ise akımdır. Isı formülünde de gösterildiği gibi akımın karesi kadar bir çarpan oluşturmaktadır. Bu yüzden istenilen kriterlere uygun bir kaynak sonucu elde etmek için akım değerini iyi seçmek çok önemlidir. Kaynak akımı, transformatör sekonder sargısı, sargıyı kollara bağlayan esnek bantlar, kollar, elektrotlar ve iş parçasından oluşan sekonder devreden akar [18].

Isının bir bölümü elektrotlardan ve iş parçalarından iletim, taşınım ve ışıyım yoluyla kaybolur. Çeliğin ısı iletimi yaklaşık olarak bakırınkinin % 12'sidir. Bu nedenle çeliğin bakır esaslı elektrotlarla kaynağı esnasında, uygun kaynak akımı kullanıldığında, iş parçalarının ara yüzeyinde meydana gelen ısı, kaynak bölgesinden, elektrot uçlarında meydana gelen ısının su soğutmalı elektrotlara iletilmesine oranla, daha yavaş uzaklaşmaktadır. Böylelikle, önce iş parçalarının ara yüzeyinde ergime sıcaklığına ulaşmakta ve kaynak bu ara yüzeyde meydana gelmektedir [17]. Akım yoğunluğu artınca, elektrot temas yüzeylerini birkaç yüz dereceden daha fazla ısınmadan kaynak meydana getirmek için, kaynak süresi yeterli miktarda düşürülebilir [18].

Kaynak akımı için bir üst sınır vardır. Kaynak akımının çok yüksek olması durumunda elektrotlar arasındaki metalin tamamı, kaynak bölgesinin ergime sıcaklığına ulaşmasıyla, plastik bölgeye kadar ısınmış olur ve elektrotlar derinlemesine metale gömülür. Bu yüzden elektrotların dış yüzeyleri aşırı ısınabilir

ya da yanabilir. Bu, özellikle akımın fişkırmaya neden olacak kadar yüksek olduğunda meydana gelir. Bu üst sınırın üzerindeki kaynak akım değerlerinde, kaynak bölgesindeki ergimiş metal, levhalar arasından bölge dışına doğru fişkirir. Bu olay, kaynak dikişinde dayanıklılığın zayıflamasına neden olur. Elektrotlar ile levhalar arasındaki temas yüzeylerinde ergime oluşur ve elektrotlar levhalara yapışarak tahrip olur. Bu durumda elektrotların çalışma ömrü azalır [19].

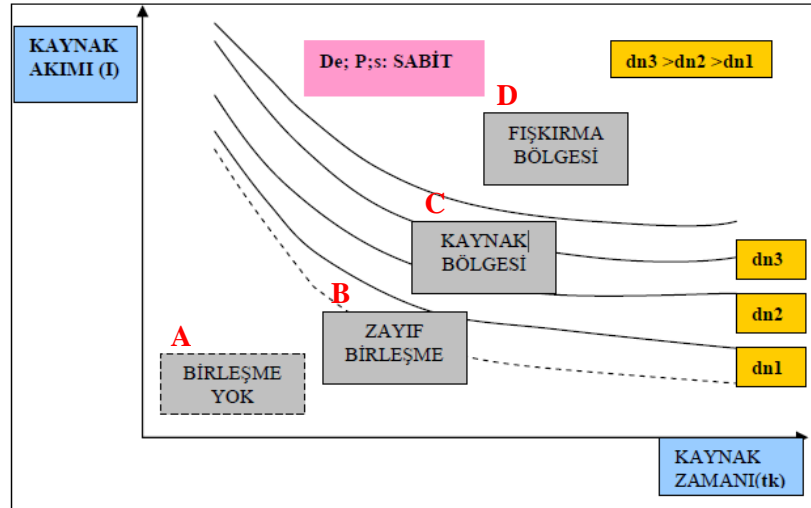
Şekil 5.7’de kaynak akımının, bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliğinin çekirdek çapı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. 6 mm’lik çekirdek çapında akım 13500 A’nın üzerine çıktığında çok önemli bir artış meydana gelmemiştir. Ancak elektrot dalma derinliğinde bir artış görülmüştür. En uygun akıma ulaşıncaya kadar çekme makaslama dayanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Ne var ki akım 14000 A’nın biraz üzerine çıktığında dayanım biraz düşmekte, dalma derinliği ise 13500 A’lık kaynak akımında sac kalınlığının % 2’sinden, 14000 A’nın biraz üstünde % 10 civarına kadar çıkmaktadır [17].



Şekil 5.7. Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliği üzerindeki etkileri [17].

Isı üretiminde kaynak akımının önemli bir değişken olması nedeni ile dikkatli bir şekilde kontrol altında tutulması gerekir. Şebeke gerilimindeki değişiklikler kaynak makinasının sekonder devresinde yapılan değişiklikler akım değişimine neden olabilir. Öte yandan, kaynak esnasında, kaynak bölgesindeki akım yoğunluğunda da azalma meydana gelebilir. Buna sebep, kaynak akımının bir önceki kaynak noktasından ve elektrotların etki alanı dışındaki metalik temas noktalarından kısa devre olmasıdır. Kısa devre yüzünden nokta çapı yeterli bir değere erişemez. Bunun dışında, çalışma esnasında, uç çapı herhangi bir nedenle büyümüş elektrotlar, akım yoğunluğunda azalmaya neden olur [19].

Kaynak çekirdeğinin yüksekliği her iki sacın kalınlığının % 40 ile 80'i arasında olmalıdır. Bu sınırların arasında kalmaya özen gösterilmelidir. Akım şiddetinin üst sınırında fişkırmaya riski vardır, ayrıca akımın yükseltilmesi sonucunda elektrotlar ile saclar arasında basıncında etkisiyle temas yüzeylerinde ergime oluşur ve elektrotlar levhalara yapışarak tahrip olurlar. Belirli bir sac kalınlığı ve malzemesi, elektrot uç çapı ve basma kuvveti için şekildeki gibi (Şekil 5.8) bir akım-zaman diyagramı elde etme olanağı vardır [13].



Şekil 5.8. Nokta kaynağında akım ve kaynak süresine bağlı olarak kaynak edilebilirlik [13].

Kaynak işlemi, kaynak akımı ve kaynak zamanı bakımından dört bölüme incelenebilir. A bölgesinde ergime ve birleşme meydana gelmez. B Bölgesinde basınç etkisi ile erime meydana gelmeden oluşan zayıf bir birleşme oluşur C bölgesi

erime ve kaynama bölgesidir. C ve B bölgesinin eğrilerinden itibaren ergime başlar ve ergimiş kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içinde gittikçe büyür. D bölgesinde ise fişkırtma olayı görülür. C bölgesinin üst sınırından itibaren fişkırtma başlar. Kaynak bölgesi B malzemenin cinsine bağlıdır. Bazı metallerde bu bölge dardır bu durumda akım ve süre hassas olarak ayarlanması gerekir. Pratikte akım ve süre değerleri C bölgesinin üst sınırına yakın seçilir. Ayrıca bu diyagramdan kısa kaynak süresi ve yüksek akım şiddeti kullanarak eş nokta çapları elde edilebileceği görülebilir [13,20].

5.4.2. Kaynak Zamanının Etkisi

Isı (enerji) formülü $Q = K.I^2.R.t$, toplam direnç sabit olmak kaydı ile devrenin herhangi parçasında meydana gelen ısıнын hem kaynak süresinin hem de kaynak akımının karesiyle doğru orantılı olduğunu anlaşılmaktadır. Isı geçişinin zamanın bir fonksiyonu olması nedeni ile yeterli çekirdek çapının gelişmesi için gereken süre, akım ne kadar yükseltirse yükseltisin, sınırlı ölçüde kısaltılabilir. Temas yüzeylerinde ısı oluşumu çok hızlı olduğunda, özellikle elektrot temas yüzeylerinde, oyuklar ve fişkırtma meydana gelir.

Kaynak akımı ve basınç yükseltilerek kaynak süresinde biraz azalma meydana getirilebilir. Akımdaki artıştan dolayı oluşacak olan fişkırtmayı önlemek içinde basıncı yükseltmek gerekir [17].

Kaynak süresi çok kısa seçilirse, kaynak tutmayabileceği gibi kaynak çekirdeğinin çapı da çok küçük olabilir. Kaynak süresi çok uzun tercih edilirse de ergimiş bölge fazla büyür ve baskı altında patlar, aradan malzeme fişkırtır ve çok derin izler oluşur.

Kaynak sırasında yerel bir bölgenin ergitilmesi söz konusu olduğundan, ergiyik etrafındaki malzeme kristal yapısında önemli değişiklikler meydana gelir. Kaynak işleminden hemen sonra elektrodlar kaldırılırsa kaynak bölgesindeki ısı alınamayacağından geniş bir halka şeklinde etrafa yayılır ve elektrod temas yüzeyi siyahlaşabilir. Kaynaktan sonra elektrod bir süre bekletilirse (tutma zamanı),

malzemedeki ısı, su ile soğutulan elektrotlar tarafından alınacağı için kaynak izi küçük ve beyaz olur [21].

5.4.3. Elektrot Kuvvetinin Etkisi

Kaynak kuvveti veya elektrot kuvveti, kaynak çevrimi boyunca elektrotlar tarafından iş parçalarına uygulanan kuvvettir. Genellikle statik bir değer olarak ölçülen ve ifade edilen elektrot kuvveti, uygulamada dinamik kuvvettir ve kaynak makinesinin hareketli parçalarının sürtünme ve ataletinden etkilenmektedir [19].

Elektrot kuvveti, iş parçalarının elektrotlar altında belirli bir alanda temas etmesini sağlayarak kaynak noktasının kesin yerini belirler. Kaynak sırasında elektrot kuvvetinin görevi, parçalar arasından fişkırmaya çalışan sıvı metali, katı haldeki metal çukuru içinde basınç altında tutarak fişkırmayı önlemektir. Dövme aşamasında ise kaynak dikişinin sıvı halden itibaren soğuması ve katılaşması sırasında büzülmeden dolayı meydana gelebilecek olan boşluk, çatlak gibi kusurların oluşumunu engellemektir [12].

Malzeme ve levha kalınlığına (s: mm) göre elektrot kuvveti (P: kN) şu bağıntı ile hesaplanır.

Alaşımsız çelikler için $P = 2 s$

Yüksek alaşımlı çelikler için $P = 3,5 s$

Alüminyum için $P = 2 s$ [19].

5.4.4. Elektrot Bileşimi ve Şeklinin Isınma Üzerine Etkisi

Elektrodun ısınmasını minimumda tutmak için, elektrotlar yüksek elektrik iletkenliği ve düşük temas direncine sahip olmalıdır. Aynı zamanda, elektrot ucu ile metalin temas ettiği alanlardaki ısının atılabilmesi için, yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdırlar. Elektrotlar ayrıca, tekrarlanan yüksek kaynak kuvvetlerinin sebep olacağı deformasyona karşı yüksek bir dirence sahip olmalıdırlar [17].

5.4.4.1. Elektrot Bileşiminin Etkisi

Genellikle elektrotlarda alaşımın sertliği arttıkça ısı ve elektrik iletkenliği azalır ve dolayısıyla en uygun alaşımın seçiminde, elektriksel, ısıl ve mekanik özelliklerin uygun bir kombinasyonu bulunmalıdır [17].

5.4.4.2. Elektrot Şeklinin Etkisi

Aynı bileşimde ve kalınlıktaki parçalar kaynak yapıldığında, elektrotların uç çapları aynı olmalıdır. Ancak, eğer kaynak edilecek parçaların kalınlıkları farklı ise, kalın parçalarla temas eden elektrotun çapının, uygun ısı dengesinin sağlanabilmesi için daha büyük olması gerekebilir.

Farklı metallerin kaynağında, eğer metallere bir tanesinin elektriksel direnci diğerinden büyükse aynı durum geçerlidir. Bu farklılık, elektriksel direnci yüksek olan parça ile temasta olan elektrotun ucunun çapı büyütülerek veya düşük elektriksel dirence sahip olan parça ile temasta olan elektrot için yüksek dirençli malzeme kullanarak telafi edilebilir.

Kaynak çekirdeğinin çapı, elektrotun temas yüzeyinden hafifçe küçük olarak meydana gelir. Elektrotun ucu yıprandıkça veya mantarlaşıma sebebi ile büyüdükçe, kaynak çekirdeğinin çapı büyür. Uç çapının büyümesi, akım yoğunluğunu azalttığı için açığa çıkan ısı iyi bir kaynak meydana getirmeye yeterli olmayacak ve kaynak kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir [3].

5.4.5. Elektrotların Malzemesi ve Boyutları

Ticari saflıktaki bakır, en iyi iletkenidir. Saf bakır elektrotlar, sahip oldukları üstün mekanik özellikleriyle beraber, yeterli elektrik iletkenliğine sahip malzemeler elde edilene kadar, direnç kaynağı elektrotu olarak kullanılmıştır. Daha yüksek kaynak akım şiddeti, elektrot kuvveti ve kaynak hızına sahip yöntemlerin gelişmesi, saf bakırın elektrot malzemesi olarak kullanımını engellemiştir [17].

Soğuk çekilmiş bakır, statik ve dinamik basma kuvvetlerine karşı düşük mukavemete ve düşük yumuşama sıcaklığına sahiptir. Ticari saf bakırın istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak ve daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip bir elektrod elde etmek için değişik bakır alaşımlar geliştirilmiştir. Direnç kaynağında kullanılan başlıca elektrot alaşımları ve özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

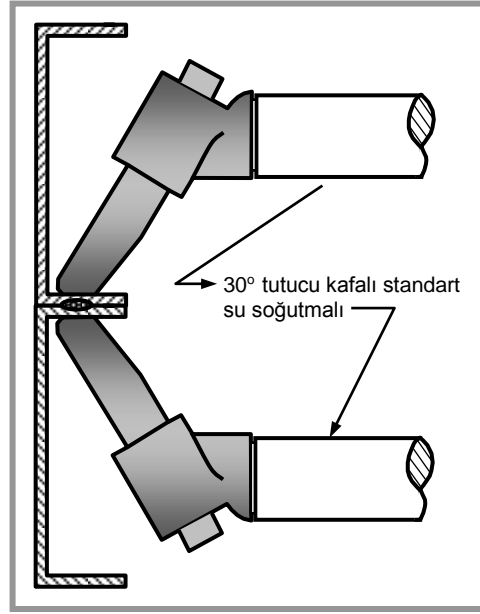
Çizelge 5.1. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları [17].

Alaşım	Sertlik (HRB)	İletkenlik (% Cu)	Yumuşama Sıcaklığı (°C)	Kullanıldığı Yer
Bakır (soğuk çekilmiş)	95	90	150	Alüminyum
Tellür-Bakır	100	90	175	Alüminyum
Kadmiyum-Bakır	110	85	250	İnce yumuşak çelik sac
Krom-Bakır	150	80	500	Tüm çelikler
Tungsten-Bakır	200-300	30	1000	Çelik ve bakır alaşımları

Genellikle, alaşımın sertliğinin artması, elektriksel ve ısı direnci artması demektir. Bu nedenle, herhangi bir uygulama için belli bir elektrot alaşımının seçimi, onun mekanik özelliklerine göre değişen ısı ve elektriksel özelliklerinin de göz önüne alınmasıyla gerçekleşir [15].

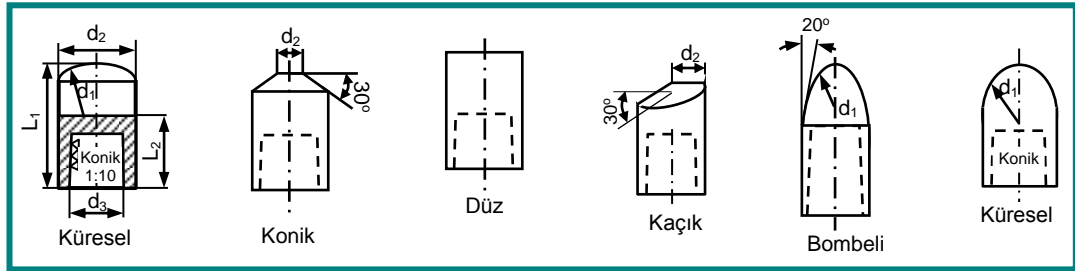
Elektrotların şekil ve boyutları, kaynak yapılacak iş parçalarının cinsine, şekil ve boyutlarına göre belirlenir. Standart elektrotlar içinde en çok kullanılanlar, kesik koni uçlu ve küresel olanlardır [3].

Genel olarak elektrot şekilleri; düz, açılı ve dirsekli olmak üzere üç temel gruba ayrılır. Açılı ve dirsekli elektrotlar soğutma koşullarındaki zorluklar, yüksek eğme kuvvetleri, üretim ve işleme maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle mümkün olduğunca düşük elektrot kuvvetlerinin ve akım yüklemelerinin söz konusu olduğu özel kullanımlar için tercih edilir. Şekil 5.9’da 30° açılı nokta kaynak elektrodları ile kaynak işleminin yapılışı görülmektedir. Açılı elektrotlar kaynak bölgesine kolay erişilebilirlik açısından çok önemlidir.



Şekil 5.9. 30° açılı özel nokta kaynak elektrodları [16].

İş parçası ile temas eden elektrot uçları silindirik veya konik olabilir. Ayrıca, bu elektrodlar temas düzlemine göre de küresel, düz veya halka şekilli olarak sınıflandırılabilir. Şekil 5.10'da imalat sektörlerinde en çok kullanılan nokta kaynak elektrot uç formları verilmiştir [16].



Şekil 5.10. İmalat sektörlerinde en çok kullanılan nokta kaynak elektrot uç formları.

Küresel uçlu elektrotlar kullanıldığında, elektrot temas yüzeyinin iş parçası yüzeylerine paralel olarak, hassas bir biçimde ayarlanması gerekmemektedir. Bu nedenle, küresel uçlu elektrot, üst elektrotun dairesel hareket yaparak iş parçasına yaklaştığı kaynak makinelerinde rahatlıkla kullanılabilen bir elektrottur. Bu elektrot mükemmel bir sıkıştırma ve iş parçası yüzeylerinde kaynak sonrası daha iyi bir

görünüm sağlar. Soğuma hızları daha yüksek olduğundan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılır.

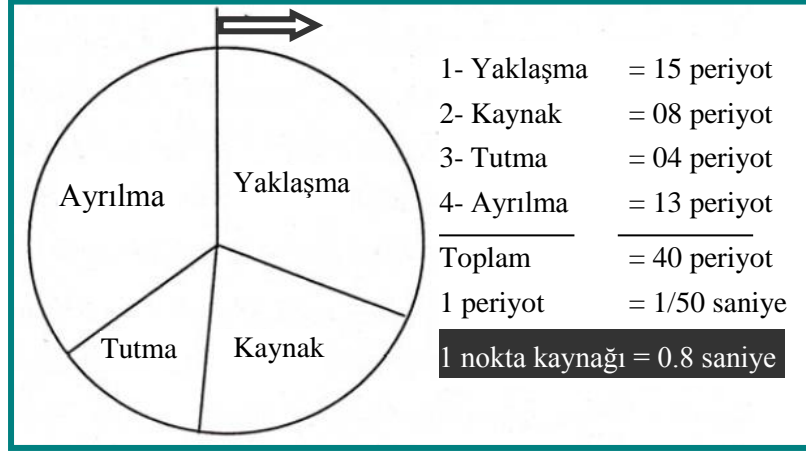
Elektrotlardaki soğutma delikleri, yuvarlak veya dişlidir. Dişli delikler yuvarlak olanlardan daha fazla soğutma yüzeyi sunar. Soğutma delikleri, elektrot dayanımını tehlikeye atmayacak biçimde olabildiğince elektrot yüzüne kadar uzamalıdır. Elektrot ucunun veya temas yüzeyinin çapı kaynak düğmesinin boyutunu kontrol eder. Ucu çapı çok küçükse, elde edilen kaynak sağlam görünebilmesine rağmen zayıfta olabilir. Küçük çaplı uçlar ayrıca şiddetli yüksek ısı konsantrasyonu ve yüzey işaretlenmesine veya düzgün olmayan elektrot izine sebep olabilir. Ayrıca büyük çaplı uca sahip elektrotlar özellikle yüksek kaynak akımında yetersiz elektrot basıncı yüzünden aşırı ısınabilir ve boşluklara veya zayıf yüzey görünümüne sebep olurlar [17].

5.5. KAYNAK ÇEVİRİMİ

Bütün direnç kaynağı yöntemleri, uygun bir akım şiddeti ve kaynak zamanı ile düzenlemesi gerektirir. Nokta direnç kaynağında kaynak çevrimi dört ana zaman diliminden oluşmaktadır. Bunlar;

- 1) Yaklaşma ve sıkma zamanı,
- 2) Kaynak zamanı,
- 3) Tutma zamanı,
- 4)Ayrılma zamanıdır.

Şekil 5.11’de kaynak çevriminin safhaları şematik olarak gösterilmiştir [14]. Bütün bu zaman dilimlerinin süreleri periyot olarak ifade edilir. Frekansı 50 Hz olan bir elektrik akımında bir periyot 1/50 saniyeye karşı gelir [12,14,17].



Şekil 5.11. Kaynak çevriminin safhaları [12].

5.5.1. Yaklaşma ve sıkma zamanı

Kaynak esnasında elektrotların birbirine yaklaşıp iki sacı sıkması için geçen süredir.

5.5.2. Kaynak zamanı

Kaynak akımının uygulanmaya başlanmasından, bitmesine kadar geçen süredir.

5.5.3 Tutma zamanı

Kaynak akımının kesilmesinden sonra, kaynak metalinin katılaşıncaya kadar elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği zaman aralığıdır.

5.5.4. Ayrılma zamanı

Oldukça kısa bir süre olup parçaların diğer nokta kaynağı için hareket ettirildiği süredir.

5.6. KAYNAK HATALARI VE NEDENLERİ

Sürekli ve yüksek kaliteli nokta kaynaklarının elde edilmesi için sacların kalınlıkları bileşimleri, yüzey durumları ve kaynatılacak malzemelerin temperlenmesi, teçhizatın elektrik - mekanik ilişkisinin, elektrot bakımının, kaynak programı tercihini sağlam ve doğru bir şekilde kontrolü gerekir. Bu kontrollerin en iyi şekilde yapılabilmesi

için kaynak hatalarının türlerini ve bu hataları meydana getiren sebeplerin iyi bilinmesi gerekir. Kaynak hataları dış ve iç hatalar olmak üzere iki ayrılır.

5.6.1. İç Hatalar

İç hatalar kaynatılan parçaların içerisinde meydana gelen ve özellikle kaynak çekirdeği ile doğrudan ilgili olan hatalardır. İç hatalar kaynaklı birleştirmenin dayanımı üzerinde doğrudan etkilidir.

5.6.1.1. Kaynak nüfuziyeti

Nokta kaynağında nüfuziyet, ergimenin parçalar içinde ulaşabildiği derinlik olarak tanımlanır. Malzeme kalınlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Nüfuziyet sınırları % 20 ile % 80 arasındadır. Minimum ve maksimum kaynak sınırları aşan kaynakların kaynak dayanımlarında istenmeyen değişimler sonuçlar oluşabilir [19].

5.6.1.2. Yetersiz Nüfuziyet

Kaynakların akım, zaman ve elektrod kuvvetindeki normal değişimlerden dolayı zayıf olarak gerçekleşmesi sonucu nüfuziyetin % 20'den az olması durumudur.

Yetersiz nüfuziyete sebep olan etkenler;

- ✓ Yetersiz kaynak akımı,
- ✓ Aşırı kaynak basıncı,
- ✓ Uygun olmayan ısıl denge,
- ✓ Çok büyük elektrot ucu,
- ✓ Uygun olmayan yüzey durumudur [19].

5.6.1.3. Aşırı Nüfuziyet

Kaynak akımı, zaman ve elektrod basıncının sıradan değişimleri sonucunda nüfuziyetin % 80 den fazla gerçekleştiği kaynaklardır. Ayrıca fişkıma, çatlaklar ve gözenekler gibi hatalara neden olabilir. Aşırı nüfuziyete sebep olan etkenler;

- ✓ Uygun olmayan yüzey durumu,

- ✓ Çok küçük elektrot ucu,
- ✓ Uygun olmayan kaynak sırası zaman ayarı,
- ✓ Yeterli olmayan kaynak basıncı
- ✓ Yeterli olmayan elektrot soğutulmasıdır [19].

5.6.1.4. Simetri

Hatasız bir şekilde meydana gelmiş olan kaynak noktasının yatayda ve düşeyde simetri olması gerekir. Simetrik olmayan kaynak noktasının sebepleri;

- ✓ Elektrotların yanlış hizalanması,
- ✓ Çok küçük elektrot ucu,
- ✓ Uygun olmayan yüzey durumu,
- ✓ Uygun olmayan kaynak programı,
- ✓ Parçaların düzgün yerleştirilmemesidir.

5.6.1.5. Gaz kabarcıkları ve gözeneklilik

Uygun olmayan kaynak akımı ve basıncı kaynakta gözeneklere neden olur. Gaz kabarcıklarının oluşmasına ve gözenekliliğe sebep olan unsurlar;

- ✓ Uygun olmayan kaynak basıncı,
- ✓ Uygun olmayan kaynak sırası zaman ayarı,
- ✓ Uygun olmayan kaynak akımı yükselme hızıdır.

5.6.1.6. İç çatlaklar

Kaynak içinde çatlaklar enine veya boyuna doğru yönelebilecekleri gibi ısı tesiri altındaki bölgeye kadar da ilerleyebilir. İç çatlakların oluşum sebepleri;

- ✓ Yetersiz kaynak basıncı,
- ✓ Uygun olmayan kaynak sırası zaman ayarı,
- ✓ Elektrotların aynı hizada olmamaları.
- ✓ Aşırı kaynak akımı
- ✓ Elektrotların yana kayması,
- ✓ Yetersiz elektrot soğutulması [19].

5.6.2. Dış Hatalar

Elektrik direnç kaynağı ile birleştirilen malzemelerde gözle görülebilen hatalar olup dayanım üzerinde büyük etkileri vardır.

5.6.2.1. Yüzey yanması

Elektrotlar ile temasta olan metal yüzeyinin ergimesidir. Kaynak kalitesi ve kaynak görünümü, yüzey yanmasından etkilenir. Yüzey yanmasının nedenleri;

- ✓ Çok seyrek elektrot temizlenmesi,
- ✓ Uygun olmayan yüzey durumu,
- ✓ Yetersiz kaynak basıncı,
- ✓ Aşırı kaynak akımı,
- ✓ Parçaların düzgün yerleştirilmemesi,
- ✓ Uygun olmayan kaynak sırası zaman ayarı,
- ✓ Elektrotların yana kayması,
- ✓ Yetersiz elektrot soğutulması,
- ✓ Uygun olmayan elektrot malzemesidir [19].

5.6.2.2. Levha ayrılması

Kaynak noktasının yakınlarından parça yüzeylerinin birbirinden ayrılmasıdır. Ayrılma, iki dış sacın ortalama kalınlığının % 10'undan fazla olmadığı normal kabul edilebilir. Ancak makaslama kuvveti uygulandığında birleşme yerindeki eğilme momentini arttırdığından dolayı aşırı ayrılma istenmeyen bir durumdur.

Levha ayrılmasının nedenleri;

- ✓ Aşırı kaynak basıncı,
- ✓ Bir hizada olmayan elektrotlar,
- ✓ Çok küçük elektrot ucu,
- ✓ Fıskırma,
- ✓ Aşırı kaynak akımı,
- ✓ Parçaların düzgün yerleştirilmemesi,
- ✓ Aşırı kaynak zamanıdır [19].

5.6.2.3. Fıskırma

Aşırı ısınma ve uygun olmayan basınç nedeni ile ergimiş metalin kaynak bölgesinden taşmasıdır. Fıskırmayı önlemek için elektrot kuvveti ve şekli kaynak bölgesi etrafında bir basınç çemberi oluşturacak şekilde olmalı ve kaynak yüzeyleri temizlenmelidir. Fıskırma, yüzey ezilmesine, levha ayrılmasına, gaz kabarcıklarına ve kaynak dayanım kaybına sebep olur. Fıskırmaya yol açan etkenler;

- ✓ Uygun olmayan yüzey şartları,
- ✓ Yeterli olmayan kaynak basıncı,
- ✓ Aşırı kaynak akımı,
- ✓ Elektrot ucunun çok küçük olması,
- ✓ Elektrotların bir hizada olmamaları,
- ✓ Elektrotların yana doğru kaymalarıdır. [19].

5.6.2.4. Distorsiyon

Kaynakların parça kenarına çok yakın gerçekleştirildiğinde oluşan bir hatadır. Deformasyona karşı yeterli mukavemet sağlamak ve ısı ile kenar çatlamlarını azaltmak amacı ile kenar mesafesi yeteri derece de büyük olmalıdır. Yüzey distorsiyonunun sebepleri;

- ✓ Elektrotun yana kayması,
- ✓ Aşırı kaynak basıncı,
- ✓ Parçaların düzgün yerleştirilmemesi,
- ✓ Uygun olmayan kenar mesafesi,
- ✓ Fıskırma,
- ✓ Aşırı kaynak akımıdır [19].

5.6.2.5. Aşırı ezilme

Kaynak yüzeylerinde derin çukurlaşmaların meydana gelmesi ile aşırı ezilme oluşur. Kabul edilebilir ezilme sınırı levhanın kalınlığının % 10 - 20'si arasındadır. Aşırı ezilmenin sebepleri;

- ✓ Çok küçük elektrot ucu,

- ✓ Aşırı kaynak basıncı,
- ✓ Aşırı kaynak akımı,
- ✓ Fıskırma,
- ✓ Aşırı nüfuziyet,
- ✓ Aşırı yüzey ısınması,
- ✓ Uygun olmayan dövme periyodudur [19].

5.6.2.6. Dış çatlaklar

Nokta kaynağının yüzeyine doğru uzanan çatlaklardır. Yüzey çatlağı nokta kaynağının korozyona karşı direncini azaltır. Aşırı bir yüzey çatlağı oluşursa nokta kaynağının dayanımını azaltır. Dış çatlakların sebepleri;

- ✓ Elektrotların yanlış hizalanması,
- ✓ Yeterli olmayan kaynak basıncı,
- ✓ Parçaların düzgün yerleştirilmemesi,
- ✓ Uygun olmayan kaynak sırası zaman ayarı,
- ✓ Aşırı nüfuziyet,
- ✓ Aşırı kaynak akımı,
- ✓ Yetersiz elektrot soğutulmasıdır. [19].

5.6.2.7. Bakır birikmesi

Bakır birikmesi, nokta kaynağının korozyona karşı hassasiyetini arttırır. Bakır birikmesinin sebepleri;

- ✓ Uygun olmayan yüzey hazırlama seçimi,
- ✓ Çok seyrek elektrot temizliği,
- ✓ Elektrot uçlarındaki rutubet,
- ✓ Aşırı kaynak akımı,
- ✓ Yeterli olmayan kaynak basıncıdır [19].

5.7. Direnç kaynağında kalite kontrolü

Kaynak noktalarının tahribatsız muayenesi pek mümkün değildir. Bu nedenle oluşacak hataların önceden belirlenmesi ve uygun tedbirlerle önlenmesi bakımından bütün kaynak parametrelerinin kontrolü önemlidir.

Nokta kaynağında her şeyden önce kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod basma kuvveti parametreleri kontrol edilmelidir. En uygun ayar değerleri (olması gereken değerler) ön deneylerle tespit edilir. Ölçülen değerlerle (gerçek değerlerle) olması gereken değerlerin karşılaştırılması kaynağın kalitesi hakkında bir fikir verir. Oluşan sapmalar daha sonra kaydedilir veya uygun ayar düzeneğiyle doğrudan eşitlenir. İşlem parametrelerinin kontrolü için özel ölçüm cihazları vardır. Bunlar makine kontrol sistemine entegre edilmiş veya dışarıdan bağlanmış olabilir. Kaynak akımı, kaynak gerilimi ve kaynak süresinin kontrolü için uygun özel kombine ölçüm cihazları tüm bu değerleri aynı zamanda kaydedebilir ve gösterebilirler. Çoğunlukla son derece kısa kaynak sürelerinden dolayı bu tür cihazlarda yüksek ölçüm hızları gereklidir.

Kaynak akımı “Rogovvski-Kuşağı” ile ölçülür. Kaynak gerilimi miktarı doğrudan iki elektrod üzerinden ölçülebilir. Tutucu çeneler arasındaki mesafe mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. İndüksiyon etkisinin oluşturduğu parazit gerilimlerin azaltılması için izole edilmiş ölçüm kabloları kullanılmalıdır. Kaynak süresi ise; modern cihazlarla periyodik hassasiyette ölçülebilir. Özellikle faz kesit kontrollü makinelerde süreye bağlı akım ilerlemesinin hassas kaydı akım ilerleme açılarının belirlenmesi ve bununla efektif akım şiddetlerinin belirlenmesi gereklidir [21].

BÖLÜM 6.

ÖNCE DEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

6.1. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI ÇALIŞMALARI

Kocabekir et al. [22] 1 mm kalınlığındaki 316 L kalite östenitik paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler, kaynaklı bağlantıları mikroyapı, sertlik ve yük taşıma kapasiteleri incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda kaynağın mekanik özelliklerinin doğrudan kaynak zamanı ve kaynak atmosferi ile ilgili olduğunu ayrıca kaynak zamanı ile ilgili olarak ısı girişi artışıyla artan çekirdek boyutu nedeni ile kaynaklı parçaların çekme-makaslama kapasitelerinde artış olduğunu bildirmişlerdir.

Kianersi et al. [23] 1 mm kalınlığındaki 316 L kalite östenitik paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı parametrelerde birleştirmişler ve birleştirilen numunelere mikroyapı, mikrosertlik ve çekme-makaslama çalışmaları yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda, 8 kA kaynak akımına kadar artan kaynak akımı ile kaynak çekirdek boyutundaki artışlar nedeniyle çekme-makaslama yük kapasitesi artış olduğu ancak 9 kA kaynak akımında dayanımın azaldığı belirlenmiştir. Mikroyapı çalışmaları sonucunda kaynak çekirdeğinin farklı delta ferritlerden oluştuğunu, mikrosertlik çalışmalarında ise kaynak çekirdeği sertliğinin ITAB ve ana metalden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir.

Hasanbaşıoğlu ve Kaçar [24] 2 mm kalınlığındaki 316L kalite paslanmaz çelikler ile DIN EN 10130-99 (7114 grade) IF (interstitial-free) çelik malzemeleri birleştirmişler, farklı metallerin kaynağında mikroyapı, mikrosertlik ve çekme-makaslama kapasiteleri üzerinde ısı girişi ve kaynak akımı gibi birincil kaynak parametrelerinin etkisini araştırmışlardır.

Artan kaynak akım nedeni ile kaynak çekirdek boyutunun genişlemesi ile kaynaklı malzemelerde çekme-makaslama yük taşıma kapasitesi artmış, IF çeliği tarafındaki kaynak çekirdek boyutu ostenitik paslanmaz çelikten daha büyük bulunmuştur. En yüksek çekme-makaslama dayanımı 9 kA kaynak akımında, 6 bar kaynak basıncında ve 17 periyod kaynak süresinde bulunmuştur. Kaynaklı numunelerde kopma IF çeliğin ITAB bölgesinde meydana gelen aşırı tane büyümesinden dolayı bu malzemedeki gerçekleşmiştir. Sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerleri genelde kaynak çekirdeğinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmiştir. Nokta direnç kaynaklarında iç kusurların genellikle düşük elektrot kuvveti, yüksek kaynak akımı ya da aşırı kaynak ısı üreten tüm diğer koşulları kaynaklandığı bildirilmiştir.

Özyürek [25] 1 mm kalınlığındaki 316L kalite paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında birleştirmiş ve kaynaklı bağlantıların mikroyapı, mikrosertlik ve yük taşıma kapasiteleri incelemiştir. Kaynak akımı arttırıldığında çekirdek boyutunun arttığı, buna bağlı olarak bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca kaynak esnasında azot gazının kullanıldığı birleştirmelerin dayanımlarının atmosferik şartlarda yapılanlardan daha yüksek olduğu sonucu bulunmuştur. Mikroyapı incelemeleri sonucunda ITAB'da kaba taneli bir bölgenin oluştuğu, sertlik testleri sonucunda ise ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeğinden ölçülen değerlerin birbirlerine yakın olduğu rapor edilmiştir.

Karcı et al. [26] 2 mm kalınlığındaki AISI 304 grade kalite paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı metalinin mikroyapısını, sertlik ve çekme-makaslama yük taşıma kabiliyetini incelemişleridir. Soğuk deformasyona uğramış ve sonra kaynak yapılmış numunelerin çekme-makaslama yük taşıma kapasitelerinde artan kaynak zamanı ile düşüş meydana geldiği, ayrıca kaynak çekirdeğine bitişik ITAB'daki tane büyümesi nedeniyle çekme-makaslama numunelerinin % uzamasında azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Kaynak çekirdeği sertlik değerleri ile ısıl işleme sertleştirilemeyen ostenitik paslanmaz çeliklerin sertlik değerlerinin benzer olduğu, ayrıca azot

atmosferinde yapılan kaynakların sertliğinin hava atmosferinde yapılan kaynakların sertliğinden yaklaşık olarak 30-35 HV daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Moshayedi ve Sattari-Far [27] 1 mm kalınlığındaki AISI 304L kalite östenitik paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynağı ile birleştirmişler ve nokta direnç kaynağının östenitik paslanmaz çeliklerin çekirdek tane boyutuna etkisini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda genellikle kaynak akımı ve zamanının artışına bağlı olarak kaynak bölgesinin genişliğinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca artan kaynak zamanı kaynak bölgesinde ısı kaybına neden olduğu için, kaynak akımının çekirdek büyümesinde daha etkili olduğunu rapor etmişlerdir.

6.2. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK ÇALIŞMALARI

Durgut ve Kaçar [28] 1,2 mm kalınlığındaki 2205 dubleks paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çekme-makaslama yükü taşıma kapasitesi ve sertlik değerlerini bularak mikroyapı incelemesi yapmışlardır. Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerin çekme-makaslama yükü taşıma kapasitelerinde artan kaynak zamanı ve akım şiddetine bağlı olarak artış meydana geldiği, kaynaklı birleştirmelerin ITAB ve kaynak çekirdek sertlikleri kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanına bağlı olarak artan ısı girdisiyle arttığı ve artan ısı girdisiyle birleştirmelerin ITAB bölgesi ve kaynak çekirdeği tane boyutunun arttığı bildirilmiştir.

Mourad et al. [29] 6,4 mm kalınlığındaki 2205 kalite dubleks paslanmaz çelikleri hem TIG kaynak yöntemi ile hem de karbon dioksit lazer kaynağı ile kaynatmışlar ve her iki kaynak yönteminin de 2205 kalite dubleks paslanmaz çeliğin ergime bölgesinin mikro yapısı, tane boyutu, mekanik ve korozyon özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve elde edilen sonuçları birbiri ile karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda kaynak metali ve ITAB'daki ferrit-östenit dengesi kaynak yöntemi ısı girdisine göre etkilendiği, ayrıca TIG kaynağındaki yüksek ısı girdisi nedeniyle ferrit-östenit dengesinin ana malzemeye daha yakın olduğu rapor edilmiştir. Korozyon testleri sonucunda lazer kaynağı ile kaynatılmış parçaların korozyon direncinin TIG kaynağı ile kaynatılan parçalarda daha iyi olduğu bildirilmiştir.

Capello et al. [30] 5 mm kalınlığındaki 2205 dubleks paslanmaz (UNS S32205) çelik levhaları lazer kaynağı ile tek pasoda birleştirmişler ve mikro yapı incelemelerini optik ve elektron mikroskopları ile gerçekleştirmişler ayrıca mikro sertlik çalışmalarını da Vickers sertlik ölçme yöntemi ile yapmışlardır. Çalışmalar sonucunda optimum lazer parametreleri ile gerçekleştirilen kaynaklarda herhangi bir katılma ve büzülme kusurları oluşmadığı, kaynak bölgesinin düzenli olduğu, kaynak metali yapısının çoğunlukla östenitle çevrilmiş uzamış ferrit tanelerinden oluştuğu belirtilmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertliğin kaynak metalinde olduğu, en düşük sertliğin ise ergime sınırına bitişik ısının tesiri altında kalan bölgede olduğu rapor edilmiştir.

6.3. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİK ÇALIŞMALARI

Alizadeh et al. [31] 1.2 mm kalınlığındaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemeleri nokta direnç kaynağı ile birleştirmişler ve mikroyapı ile performans arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kaynak ısıl çevrimleri sırasında oluşan faz dönüşümlerini ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında fiziksel metalurjiyi baz alarak analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda ergime bölgesinin ve ITAB'ın tane büyümesi, martenzin oluşumu ve karbür çökmesi gibi farklı olaylardan etkilendiği bildirilmiştir. Ayrıca ferrit sınırında bir miktar martenzit fazı ile ince bir şekilde dağılmış karbür çökmesi ve sütunsal ferrit tanecikleri tarafından ergime bölgesi karakterize edildiği, her bölgede farklı metalurjik dönüşümler meydana gelmesine dayanarak yüksek sıcaklıktaki ITAB, orta sıcaklıktaki ITAB ve düşük sıcaklıktaki ITAB olmak üzere ITAB'ın üç farklı bölgeye ayrıldığını belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklık ITAB'ı martenzit-serbest ferrit mikroyapısı ile yüksek sıcaklıktan dolayı tane büyümesi, orta sıcaklık ITAB'ı ferrit-martenzit mikroyapısından dolayı en yüksek sertliği ve sınırlı tane büyümesini, düşük sıcaklık ITAB'ının ise ferrit taneleri içerisinde düzenli krom karbür oluşumunu rapor etmişlerdir.

Bina et al. [32] 1,5 mm kalınlığındaki AISI 304 östenitik paslanmaz çelik levhalar ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhaları nokta direnç kaynağı ile fark kaynak akımlarında kaynatarak mikro yapı, mikro sertlik ve çekme-makaslama deneylerine

tabi tutmuşlardır. Çalışmalar sonucunda yetersiz kaynak akımı kullanıldığında yetersiz bir birleştirme olduğunu, artan kaynak akımı ile çekirdek çapının, dolayısıyla da kaynak dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Kaynak metali mikroyapısının östenit, martenzit ve ferritten oluştuğunu ve artan kaynak akımının kaynak metali ve ITAB'da tane irileşmesine sebep olduğunu, en yüksek sertlik değerlerinin kaynak çekirdeğinden ölçüldüğünü belirtmişlerdir.

Kaya [33] 3 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik levha ile aynı kalınlıkta AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhaları TIG, MIG ve Örtülü elektrod ark kaynak yöntemleri ile birleştirilmiş ve birleştirilen malzemelerin çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, mikrosertlik ve mikroyapı özelliklerini incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda tüm numunelerde kopma birleştirmenin ferritik paslanmaz çelik esas metal tarafında ve kaynak metaline yakın olan ITAB'de gerçekleştiği, kaynaklı bağlantılarda en yüksek çekme dayanımı ise TIG kaynağı ile birleştirilmiş bağlantılardan elde edildiği belirlenmiştir. Çentik darbe testlerinde, TIG ve MIG kaynağı ile birleştirilmiş bağlantıların çentik darbe kırılma enerjileri, ark kaynağı ile birleştirilmiş bağlantılardan yüksek ölçüldüğünden mikrosertlik testleri sonucunda, tüm kaynak yöntemlerinde en yüksek sertlik değeri AISI 430 ferritik paslanmaz çelik esas metal tarafında kaynak metaline yakın olan ITAB' da ölçüldüğü, ayrıca mikroyapı incelemelerinde, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin ITAB bölgesinde belirgin bir tane irileşmesinin meydana geldiği belirtilmiştir.

Kaçar ve Gündüz [34] çalışmalarında AISI 304 östenitik ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelik sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı birleştirmelerinin kalitesine, malzemenin kaynak öncesi farklı oranlarda maruz kaldığı soğuk deformasyonun etkisinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Farklı paslanmaz çelik çifti temin edildiği halde ve farklı oranlarda (5, 10 ve 15) soğuk deformasyona uğratıldıktan sonra 7 kA akım şiddetinde 35 çevrim kaynak zamanında, 7 bar elektrot baskı kuvveti uygulanarak birleştirilmiştir. Kaynak kalitesini değerlendirmek için birleştirmenin mikroyapısı incelenerek, çekme makaslama yükü taşıma kapasitesi ve sertlik profili belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda ticari olarak temin edildiği gibi birleştirilen numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasitesine göre artan deformasyon miktarına bağlı olarak

deforme olmuş numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasitelerinin arttığı bulunmuştur. Ayrıca, ticari olarak temin edildiği halde birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeğinin sertliği ferritik paslanmaz çelik tarafında ostenitik paslanmaz çelik tarafına göre bir miktar yüksek bulunmuştur. Deforme edildikten sonra birleştirilen numunenin kaynak çekirdek sertliği ise ostenitik paslanmaz tarafının, ferritik paslanmaz tarafına oranla daha yüksek bulunmuştur.

Bu çalışmada, endüstride sıklıkla kullanılan paslanmaz çelik ailelerinden ferritik paslanmaz çelik (AISI 430) ile dubleks (AISI 2304) paslanmaz çelikler, elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmişler ve birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

BÖLÜM 7

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışmada, yüksek akma dayanımına ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek dirence sahip olmaları nedeniyle AISI 2304 dubleks paslanmaz çelikler ile yüksek korozyon direncine sahip olan AISI 430 ferritik paslanmaz çelikler malzeme olarak kullanılmıştır. Çizelge 7.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 2304 dubleks paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimleri, Çizelge 7.2’de ise bu malzemelerin bazı mekanik özellikleri verilmiştir.

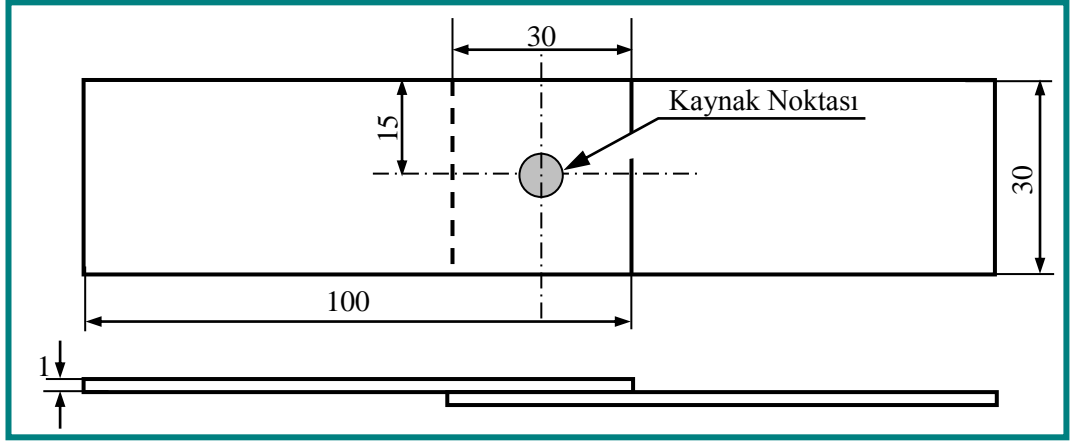
Çizelge 7.1. Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.

Malzeme	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S	Fe
AISI 2304	0.03	≤ 2.0	≤ 1.0	22-24	0.1-0.6	3.5-5.5	0.035	0.015	Kalan
AISI 430	0.07	≤ 1.0	1.0	16-18	-	-	0.04	0.03	Kalan

Çizelge 7.2. Deneyde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Sertlik (HV _{0.5})
AISI 2304	400	630-800	25	225±3
AISI 430	205	450	22	150±3

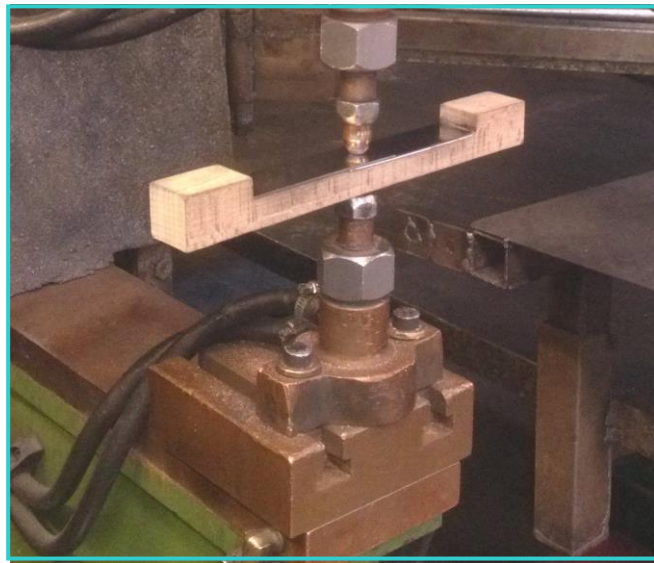
Deneysel çalışmalar için AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik sac malzemeler ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik sac malzemeler, Şekil 7.1’de görülen ölçülerde ve standartlara uygun olarak 100x30x1 mm ebatlarında toplam 96 numune (48 adet dubleks, 48 adet ferritik) Düzce Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu lisesi atölyesindeki giyotin makas ile kesilerek hazırlanmıştır.



Şekil 7.1. Nokta direnç kaynak numune ölçüleri.

7.2. MALZEMELERİN KAYNAĞA HAZIRLANMASI

1 mm kalınlığındaki, 100 mm uzunluğunda ve 30 mm genişliğindeki AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik levhalar ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalar, nokta direnç kaynağı ile birleştirilmek için Şekil 7.1'de görüldüğü gibi üst üste bindirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında meydana gelebilecek olan aksel kaymaları önlemek için Şekil 7.2'de görüldüğü gibi ahşaptan özel bir kalıp hazırlanmıştır. Kaynak sırasında bütün parçaların standart olması için dubleks paslanmaz çelik üste olacak şekilde kaynak yapılmıştır.



Şekil 7.2. Kaynak esnasında kullanılan kalıp.

7.3. MALZEMELERİN KAYNAĞININ YAPILIŞI

Öncelikle, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhalar ile AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik levhaların kaynağında optimum kaynak parametrelerini belirlemek için ön deney çalışmaları yapılmıştır. Ön deney çalışmalarında özellikle yeterli birleşme ve en uygun nokta izi elde edilebileceği kaynak parametrelerinin belirlenmesi amaç edinilmiştir. Kaynak parametrelerinin tespiti için yapılan çalışmalar sırasında elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının çok düşük olduğunda yetersiz birleşme ve nokta izi, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının çok yüksek olduğu durumda ise kaynak numunelerinde aşırı ergime ve basınçtan dolayı aşırı deformasyon ve geniş nokta izi meydana geldiği görülmüştür.

Ön deneyler sonucunda; elektrod kuvveti olarak 0.6 ve 0.8 MPa, kaynak akımı olarak 2 ve 3 kA ve kaynak zamanı olarak ise; 10, 20 ve 30 çevrimin (1 çevrim=0,02 sn) kullanılmasının kaynaklı birleştirme için uygun olduğuna karar verilmiştir.

Deney çalışmalarda numunelerin kaynağında kaynak parametreleri dijital olarak ayarlanabilen MFDC orta frekans punta projeksiyon kaynak makinesi (SPR3) kullanılmıştır. Çizelge 7.3'de kaynak işlemlerinde kullanılan nokta direnç kaynak makinesinin bazı teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 7.3. Nokta direnç kaynak makinesinin özellikleri.

Makinanın Adı	MFDC orta frekans punta projeksiyon kaynak makinesi SPR3
Makine gücü (kVA)	120
Besleme gerilimi (V) (3 fazlı)	380
Punta kollarını besleyen hava basıncı (kg/cm ²)	6
Soğutma suyu debisi (l/dk)	20
Elektrodların soğutma suyu debisi (l/dk)	15
Kol boyu (mm)	400
Elektrod malzemesi	Konik uçlu Cu (Bakır) elektrot

Kaynak işlemi öncesinde numune yüzeylerinin birbiri üzerine düzgün bir şekilde oturabilmesi için öncelikle numune kenarlarındaki giyotin makas çapakları zımpara ile giderilmiştir. Birleştirilecek olan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik saclarla, AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik saclar, Şekil 7.1’de görüldüğü gibi 30 mm kısımları üst üste bilecek şekilde hazırlanan kalıba konulup nokta direnç kaynak makinesinin elektrodlarının sıkıştırılması sonucu kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Tüm kaynak işlemlerinin standart olması için, kaynak esnasında tüm numunelerde ferritik paslanmaz çelik levha alt, dubleks paslanmaz çelik ise üst levha olarak seçilmiştir. Kaynak işlemi boyunca kaynak parametreleri sık sık kontrol edilmiştir. Deneylede kullanılmak üzere her parametre için 4’er numune hazırlanıp toplamda 48 adet kaynak işlemi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 7.4’te verilmiştir. Kaynak sonrası numuneler açık havada soğumaya bırakılmıştır.

Çizelge 7.4. Kaynak esnasında kullanılan parametreleri.

Kaynak Akımı (kA)	Elektrod kuvveti (MPa)	Kaynak Zamanı (çevrim)			Sıkıştırma Zamanı (çevrim)	Ara Zaman (çevrim)	Tutma Zamanı (çevrim)
2	0,6	10	20	30	30	10	15
	0,8						
3	0,6	10	20	30	30	10	15
	0,8						

7.4. NUMUNE HAZIRLAMA

Kaynaklı birleştirme sonucunda 170x30 ebadında elde edilen 48 adet deney malzemesinden 1 tanesi örnek olması açısından Şekil 7.3’de gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Kaynaklı birleştirme sonucu elde edilen deney numunesi.

Kaynaklı birleştirilmesi gerçekleştirilen numunelerden her birinden 3'er adet toplamda 36 adedi çekme-makaslama deneyi için, geri kalan her bir parametreden 1'er numune de (toplam 12 adet) sertlik ve mikroyapı çalışmaları için kullanılmıştır.

7.5. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TESPİTİ

7.5.1. Kaynak Çekirdek Çapı ve Elektrod Dalma Derinliği Ölçümü

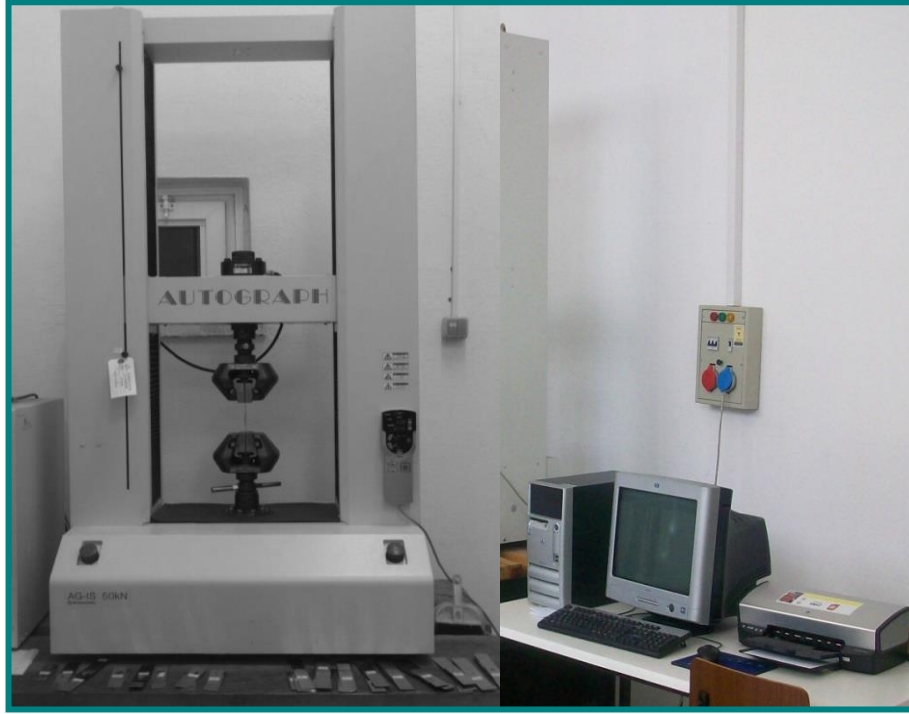
Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş kaynaklı numunelerde elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının kaynaklı birleştirmeler üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile kaynak çekirdek çapları ve elektrod dalma derinlikleri ölçülmüştür. Kaynak çekirdek çapı ölçümlerinde dijital kumpas, elektrod dalma derinliği ölçümlerinde ise mikrometre kullanılmıştır. Elektrod dalma derinliği ölçümünde sadece birleştirmenin üst malzemesindeki (dubleks paslanmaz çelik) derinlikler ölçülmüştür.

7.5.2. Çekme-Makaslama Deneyi

AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik levhaların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi sonucu oluşan kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi yapılmış ve Şekil 7.4'te resmi verilen, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme Laboratuvarında bulunan 5 ton kapasiteli Shimadzu marka çekme testi cihazı kullanılmıştır.

Nokta direnç kaynak yöntemi ile 12 farklı parametrede birleştirilmiş kaynaklı numuneler, standartlara uygun olarak çekme deney cihazına bağlanmış ve çekme-makaslama testi 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, gerilme ve % uzama değerleri, çekme cihazı üzerindeki proplar ile bilgisayara aktarılarak otomatik olarak kaydedilmiştir.

Çekme deneylerinde kaynak hatalarından meydana gelebilecek etkileri en aza indirmek için her deney numunesinden 3'er adedi çekme testleri için kullanılmıştır. 3 numuneden elde edilen verilerin ortalaması alınarak her bir parametre için bir grafik oluşturulmuştur.



Şekil 7.4. Çekme deneyi cihazı ve donanımı.

7.5.3. Sertlik Testi

Farklı kaynak parametrelerinde (elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zaman) nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği üzerindeki sertlik değişimini tespit etmek amacıyla kaynaklı bağlantılardan metalografik muayene için seçilen toplam 12 adet numuneye mikrosertlik testi uygulanmıştır. Mikrosertlik deneyleri, KBÜ Teknoloji Fakültesi Malzeme Laboratuvarında bulunan Şekil 7.5'te resmi verilen Shimadzu HMV marka cihaz ile 0.5 kg yük altında 15 sn bekletilip izler oluşturularak yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri ile grafikler çizilerek elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının etkileri incelenmiştir.



Şekil 7.5. Mikrosertlik ölçüm cihazı.

7.5.4. Mikroyapı Çalışmaları

Nokta direnç kaynağı ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiş numuneler üzerinde elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının, kaynak bölgesindeki tane morfolojisine etkilerinin belirlenmesi amacıyla optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için her bir kaynak parametresi ile birleştirilmiş numune, (12 adet) kesme diski (diskoton) yardımıyla bir tarafı tam çekirdek merkezi olacak biçimde kesilmiş ve kesme işleminden sonra numuneler soğuk olarak bakalite alınmışlardır. Daha sonra Şekil 7.6'da resmi verilen cihaz yardımıyla zımparalama ve parlatma yapılmıştır.

Zımparalama işlemi sırasıyla olmak üzere 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik silisyum karbür su zımparası ile ve de her zımparalama arasında 90^0 çevrilerek tamamlanmıştır. Zımparalama işlemi biten numuneler malzeme yüzeyini hazırlamada son basamak olan parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. Parlatma işleminde amaç düzgün yüzeyli, çizik olmayan ve ayna gibi bir görünüm sağlamaktır. Parlatma işlemi, dönen bir disk üzerine yerleştirilmiş $3 \mu\text{m}$ bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe üzerine de $3 \mu\text{m}$ 'lik elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemleri esnasında 600 dev/dk hız kullanılmış olup, her bir numune 5 dakika süreyle disk üzerinde yük uygulanmaksızın tutulmuştur.



Şekil 7.6. Zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatma işlemi tamamlanan numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Dağlama işlemi, % 10 oksalik asit ile elektrolitik olarak, 13.8 V, 3 Amper akımda 12 saniye süre ile yapılmış ve mikroyapı incelemesi için hazır hale getirilmişlerdir. Hazırlanan numunelerden NIKON Epiphot 200 model ve bilgisayara görüntü aktarabilen optik mikroskop ile gerekli görülen bölgelerden mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Şekil 7.7’de mikroyapı çalışmalarının yapıldığı optik mikroskopun fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 7.7. Mikro yapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop.

7.5.5. SEM (Taramalı elektron mikroskobu) Çalışmaları

Farklı kaynak parametreleri ile nokta direnç kaynağı yapılan numunelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) çalışmaları, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM laboratuvarında bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM model cihazda yapılmıştır (Şekil 7.8). Deneysel çalışmalarda cihaza bağlı olan bilgisayar ekran görüntüsü üzerinden yararlanılarak noktasal ve çizgisel analizler yapılmıştır. Cihaz üzerindeki EDX dedektörü ile kalitatif ve kantitatif kimyasal analizler yapılmakta olup, ayrıca EDX dedektörü ile bir yüzeyin elementel haritasının çıkarılması mümkündür.



Şekil 7.8. Çalışmalarda kullanılan taramalı elektron mikroskobu.

BÖLÜM 8

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. GENEL DEĞERLENDİRME

Deneyleerde; daha çok otomotiv sanayinde karoser parçaları ve tampon üretiminde kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile ısı değiştiriciler, basınç kapları, kimya endüstrisi, taşımacılık, petrol ve doğal gaz endüstri alanlarında kullanılan AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik malzemeler nokta direnç kaynağı ile birleştirilerek, kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kaynaklı birleştirmeler farklı elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanlarında gerçekleştirilmiş ve bu değişkenlerin bağlantı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda tüm numunelerin gözle muayenesi gerçekleştirilmiş ve kaynak kabul sınır seviyelerini aşacak bir kaynak hatasına rastlanılmamıştır. Bu olayın olumlu olarak gerçekleşmesinde en büyük etkinin kaynak öncesi yapılan pilot çalışmalar olduğu bir gerçektir.

8.2. KAYNAK ÇEKİRDEK ÇAPI VE ELEKTROD DALMA DERİNLİğİ ÖLÇÜMÜ

Farklı kaynak parametrelerinin çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği üzerine etkilerini ve bunların, malzemelerin mekaniksel özelliklerine yansımalarını araştırmak için nokta direnç kaynağı ile birleştirilen AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ve AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik numunelerin kaynak çekirdek çapı ve elektrod dalma derinlikleri ölçülmüştür. Çizelge 8.1’de kaynaklı parçaların çekirdek çapı ve tek taraflı derinlik ölçümleri, Şekil 8.1’de ise kaynak çekirdek çapı ölçümleri görülmektedir. Ölçümler AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik tarafından ve birkaç farklı açıdan yapıp ortalama değerleri alınmıştır.

Çizelge 8.1. Kaynaklı parçaların tek taraflı derin ölçümleri.

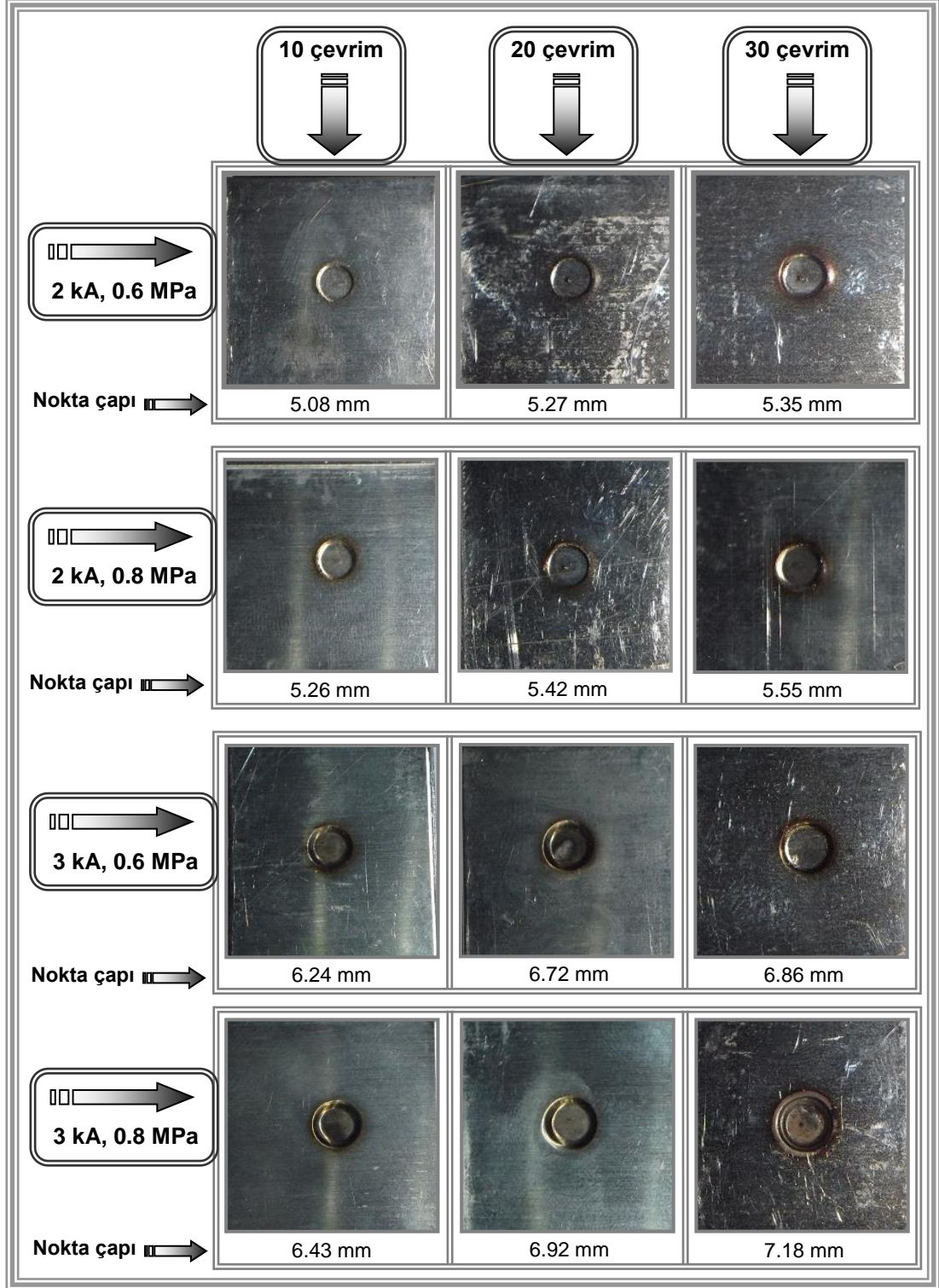
Numune adı	Numune kodu	Çekirdek çapı (mm)	Derinlik (mm)
2 kA-0.6 MPa -10 çevrim	1	5.08	0.07
2 kA-0.6 MPa-20 çevrim	2	5.27	0.12
2 kA-0.6 MPa-30 çevrim	3	5.35	0.18
2 kA-0.8 MPa-10 çevrim	4	5.26	0.11
2 kA-0.8 MPa-20 çevrim	5	5.42	0.15
2 kA-0.8 MPa-30 çevrim	6	5.55	0.22
3 kA-0.6 MPa-10 çevrim	7	6.24	0.36
3 kA-0.6 MPa-20 çevrim	8	6.72	0.41
3 kA-0.6 MPa-30 çevrim	9	6.86	0.48
3 kA-0.8 MPa-10 çevrim	10	6.43	0.38
3 kA-0.8 MPa-20 çevrim	11	6.92	0.45
3 kA-0.8 MPa-30 çevrim	12	7.18	0.52

Yapılan ölçümler sonucunda varılan ilk yargı, kaynak çevrim süresinin, ısı girdisine etkisinden dolayı kaynak çekirdek çapı üzerinde etkili olduğudur. Yani kaynak çevrimi artırıldığında malzemeye giren ısı miktarı da artmaktadır. Bu da kaynak çekirdek çapının büyümesine neden olmaktadır. Örneğin 2 kA kaynak akımı 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 10 kaynak çevriminde yapılan kaynağın çekirdek çapı 5,28 mm ölçülürken aynı kaynak akımı ve elektrod baskı kuvvetinde kaynak çevrimi 20 yapıldığında çekirdek çapı 5,27 mm olarak ölçülmüştür. Buradan ısı girdisinin artmasına bağlı olarak kaynak çekirdek çapının düzenli olarak arttığı sonucu çıkarılabilir. Hayat [17] çift fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında martenzit hacim oranı ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisini araştırdığı çalışmasında, kaynak çevriminin düğme çapını değiştirdiğini belirtmiştir.

Ayrıca kaynak çevrimi sadece çekirdek çapına değil, elektrod kuvveti ile birlikte elektrod dalma derinliğini de etkilemektedir. Aynı çekirdek çapında olduğu gibi kaynak çevrimi kaynak bölgesinin ısı girdisini doğrudan etkilemektedir. Bu etkiye ilave olarak elektrod baskı kuvvetinin de dâhil olması ile birlikte elektrod dalma derinliğinde değişiklikler meydana gelmektedir.

Bir ana fikir ortaya koymak gerekirse, değişen kaynak parametreleri çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği üzerinde etkilidir. Değişen kaynak parametreleri ile değişen

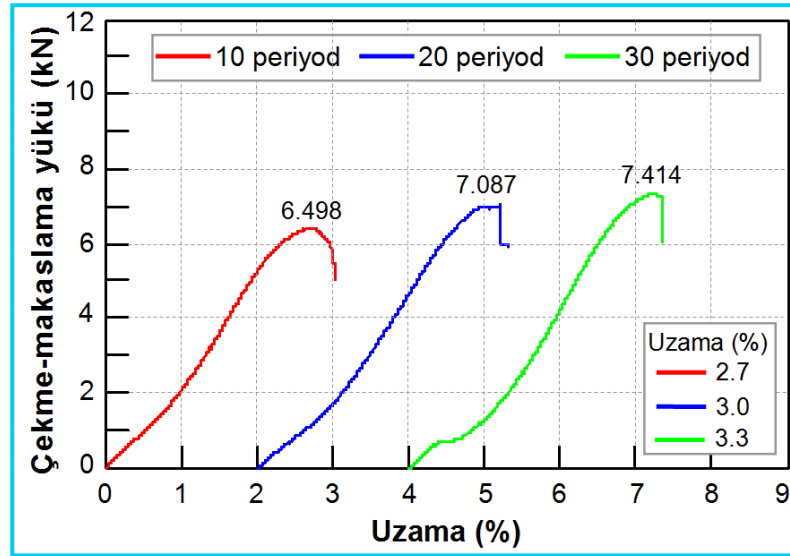
çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği kaynaklı bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve % uzama gibi mekanik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 8.1. Kaynak çekirdek çapı ölçüm sonuçları.

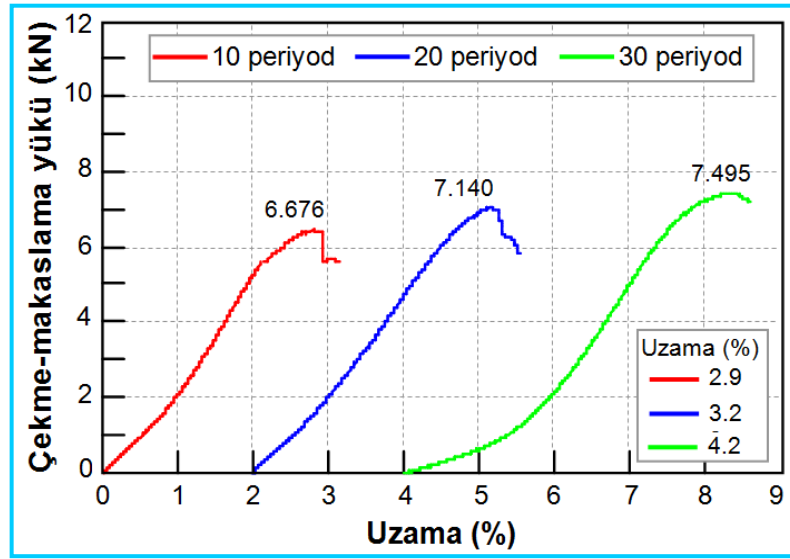
8.3. ÇEKME-MAKASLAMA DENEYİ

Yüksek akma dayanımına ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek dirence sahip olan AISI 2304 dubleks paslanmaz çelikler ile yüksek korozyon direncine sahip olan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerine nokta direnç kaynağının farklı kaynak parametrelerinin etkisini belirlemek için çekme-makaslama deneyi uygulanmıştır. Kaynaklı numunelere uygulanan çekme-makaslama sonucunda tüm numunelerde kopma, dayanımı daha düşük olan ferritik paslanmaz çelik malzemede meydana gelmiştir. Çizelge 7.2’de birleştirmelerde kullanılan ana malzemelerin çekme dayanımları incelendiğinde AISI 2304’ün dayanımı 630-800 N/mm², AISI 430’un dayanımı ise 450 N/mm² olarak görülmektedir. Bu sonuçlar kopma işleminin ferritik paslanmaz çelik malzemeden meydana gelmesinin nedenini doğrulamaktadır. Çekme-makaslama deneyleri sonucunda elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanını ve deney numunelerinin mekanik özelliklerini etkilediği belirlenmiştir. Şekil 8.3’de 2 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa elektrod kuvveti ile yapılan kaynaklı birleştirmenin çekme-makaslama deney sonuçları görülmektedir. Şekil 8.2’de görüldüğü gibi kaynak çevrim süresi artması ile çekme-makaslama dayanımı ile kaynaklı numunelerin % uzama değerinde artma meydana gelmiştir.



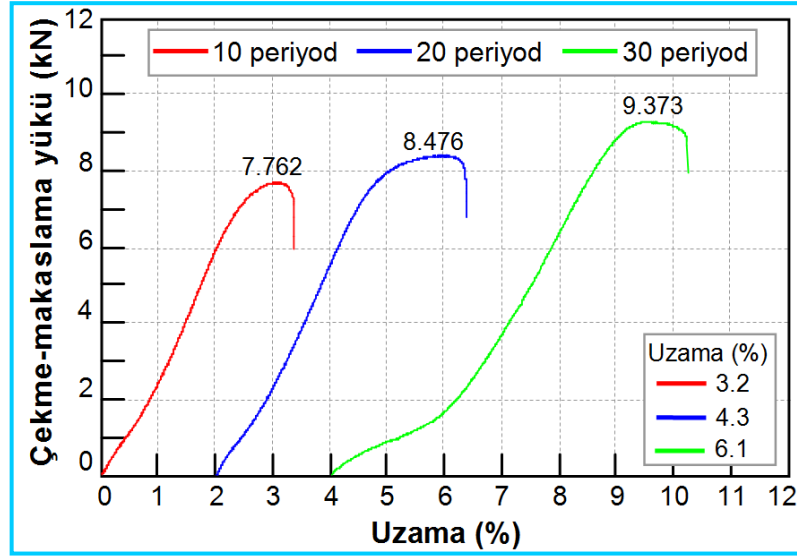
Şekil 8.2. 2 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama deney sonuçları.

Şekil 8.3’de 2 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa elektrod kuvveti ile birleştirilen kaynaklı numunenin deney sonuçları görülmektedir. Deney sonuçları dikkatli bir şekilde incelenip Şekil 8.1 ile karşılaştırıldığında, elektrod baskı kuvvetinin değişiminin, kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini değiştirdiği açıkça görülmektedir. Artan elektrod kuvveti ve kaynak çevrimi çekirdek çapını büyütürken elektrod dalma derinliğini de artırdığı için malzemelerin hem çekme-makaslama dayanımını hem de % uzama miktarını yükseltmiştir.

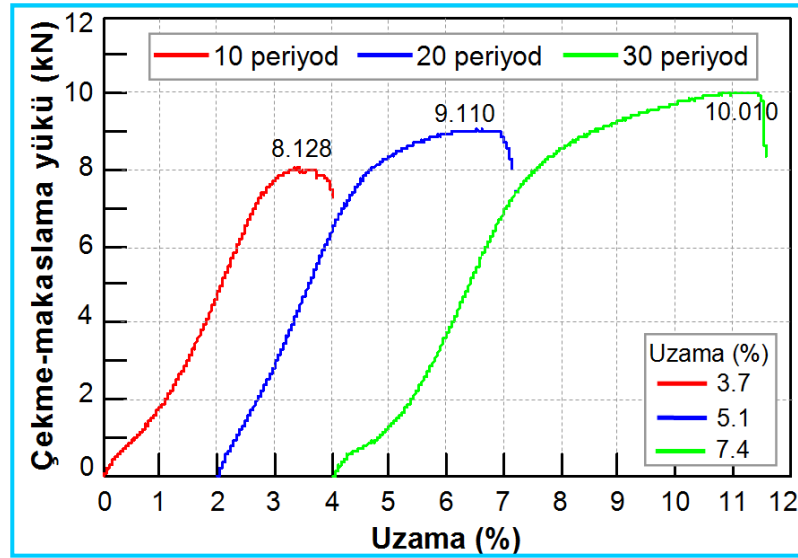


Şekil 8.3. 2 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama deney sonuçları.

Şekil 8.4’de 3 kA kaynak akımı ile 0.6 MPa elektrod kuvveti ile birleştirilen kaynaklı parçaların, Şekil 8.5’de ise 3 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa elektrod kuvveti ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin deney sonuçları görülmektedir. Bu iki şekilden (Şekil 8.4 ve Şekil 8.5) elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu sonuçların Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’deki sonuçları desteklediği gerçeğinin yanında, burada bir de kaynak akımının deney parçalarının mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kaynak akımının artırılması ile kaynak bölgesine ısı girdisinde artışlar meydana gelmiştir. Bu ısı girdisi artışına paralel olarak elektrod baskı kuvvetinin ve kaynak çevrimi sürelerinin etkisi ile birlikte nokta direnç kaynağı çekirdek çapları ve elektrod dalma derinliklerinde artışlar olmuştur. Çekirdek çaplarındaki ve elektrod dalma derinliklerindeki büyüme, deney parçalarının çekme-makaslama dayanımı ile % uzama miktarlarında artışlara sebep olmuştur.

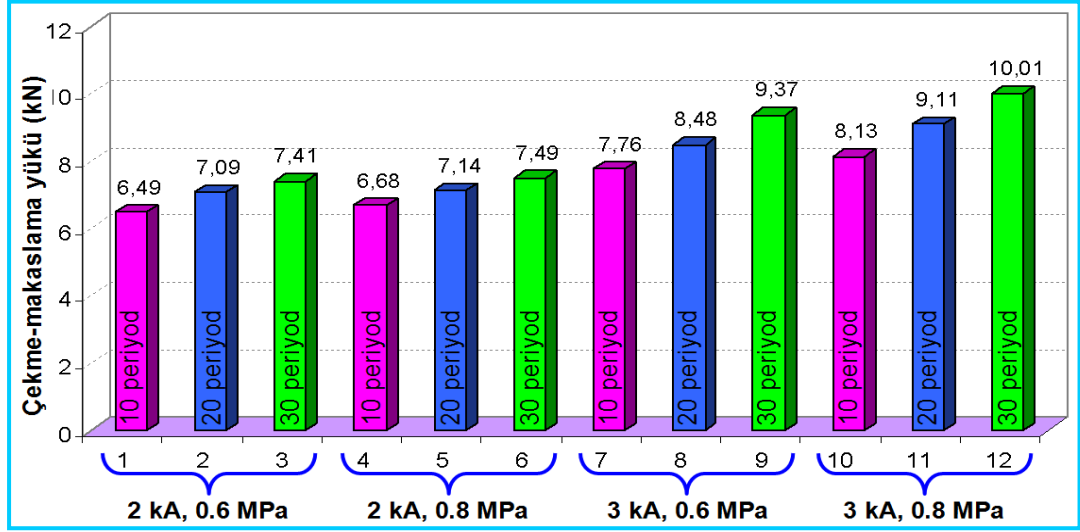


Şekil 8.4. 3 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama deney sonuçları.



Şekil 8.5. 3 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa kaynak basıncında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama deney sonuçları.

Şekil 8.6'da tüm kaynak parametrelerinde birleştirilmiş numunelerin çekme-makaslama deney sonuçlarından elde edilen veriler, kolay anlaşılabilmesi açısından tek bir grafik haline dönüştürülerek verilmiştir.



Şekil 8.6. Çekme-makaslama deney sonuçları.

Şekil 8.6 incelendiğinde en düşük çekme-makaslama dayanımı 6,498 N olarak 2 kA kaynak akımı, 0.6 MPa elektrod baskı kuvveti ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen kaynaklı numuneden ölçülürken, en yüksek çekme-makaslama dayanımı ise 10,010 N olarak, 3 kA kaynak akımı 0.8 MPa elektrod baskı kuvveti ve 30 kaynak çevriminde gerçekleşmiştir.

Çekme-makaslama çalışmaları sonucunda kaynak çevriminin, elektrod baskı kuvvetinin ve kaynak akımının kaynak bölgesine giren ısı miktarının artmasına, çekirdek çapının büyümesine ve elektrod dalma derinliğinin artmasına neden olmaları sebebiyle deney parçalarının mekanik özelliklerini etkilediği görülmüştür. Benzer çalışmalarında Kaya [3] ve Hayat [17] kaynak parametrelerinin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş kaynak numunelerinin çekme-makaslama dayanımını değiştirdiğini bildirmişlerdir.

Kaynak işlemleri, kaynak zamanı açısından genel olarak değerlendirildiğinde, kaynak çevriminin artması kaynak bölgesine giren ısı miktarını arttırmakta dolayısıyla bu artış sebebiyle çekirdek çapında da büyüme meydana gelmektedir. Çekirdek çapında meydana gelen büyüme, kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımını ve % uzama miktarı üzerinde etkili olmaktadır. Örneğin 2 kA kaynak akımında, 0,6 MPa elektrod baskı kuvvetinde, kaynak çevrimi 10 olduğunda çekme

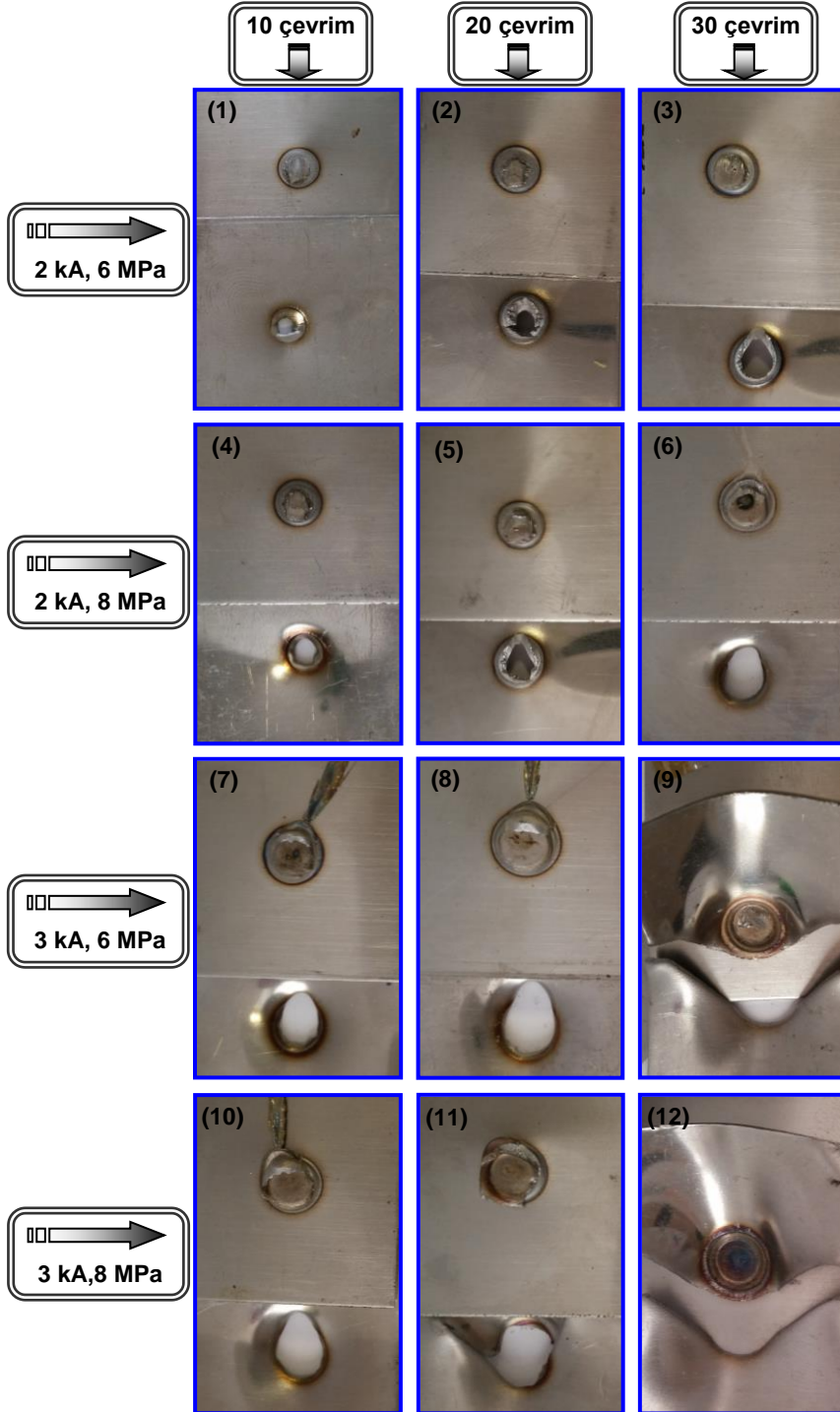
makaslama dayanımı 6.498 N, % uzama miktarı 2,7 mm olurken aynı kaynak akımı ve elektrod baskı kuvvetinde kaynak çevrimi 30 çıkartıldığında çekme makaslama dayanımı 7.414 N, % uzama miktarı 3,3 mm olmuştur. Daha önce nokta direnç kaynağı üzerine yapılan çalışmalarda [3,35] kaynak çevriminin çekirdek çapını etkilediği ve bunun da çekme-makaslama dayanımını değiştirdiği belirtilmiştir.

Benzer şekilde kaynaklı numuneler üzerinde elektrod baskı kuvvetinin artırılması ile kaynak çekirdek çapında ve elektrod dalma derinliğinde artma meydana geldiği görülmüştür. Artan elektrod baskı kuvveti ile kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Çalışmalar sunucunda elde edilen verilerden örnek vermek gerekirse, 2 kA kaynak akımı, 30 kaynak çevrimi ve 0.6 MPa elektrod kuvvetinde 7.414 N çekme-makaslama dayanımı değerine ulaşılırken aynı kaynak akımı ve kaynak çevriminde elektrod baskı kuvveti 0.8 MPa'a çıkarıldığında çekme makaslama değeri 7.795 N olmuştur. Bu da bize elektrod baskı kuvvetinin çekme-makaslama dayanımını değiştirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmadan elde edilen diğer ve en önemli bir sonuçta kaynak akımının çekme-makaslama ve % uzama miktarına etkisidir. Kaynak akımı bağlantı noktasına giren ısı miktarı ile doğrudan bağlantılı olduğu için kaynak akımının artması ile kaynak bölgesine giren ısı miktarı artmakta, bu da kaynak çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliğinin artmasına neden olmuştur. Daha önce bahsedildiği gibi kaynak çekirdek çapının ve elektrod dalma derinliğinin artması numunelerde çekme-makaslama ve % uzama değerlerini de artırmıştır. Şekiller incelendiğinde 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevriminde elde edilen çekme makaslama değeri 7.414 N % uzama miktarı 3,3 mm iken kaynak akımı 3 kA çıkartılıp diğer parametreler sabit tutulduğunda ise çekme makaslama değeri 9.373 N, % uzama miktarı 6.1 mm olmuştur. Aynı şekilde Erik [19] farklı kaynak akımlarının ve kaynak çevrim sürelerinin çekme-makaslama dayanımını etkilediğini belirtmiştir.

Bu çalışma sonucunda ulaşılan ana fikir, kaynak akımının, elektrod baskı kuvvetinin ve kaynak çevriminin çekme makaslama ve % uzama değerleri üzerinde etkili olduğudur. Ayrıca kaynak akımının, elektrod baskı kuvvetinin ve kaynak çevrim

süresinin kaynaklı bağlantıdaki kopma şekilleri üzerine etkilerini araştırmak için kopma türü incelemesi yapılmıştır. Şekil 8.7’de kaynaklı parçaların kopma şekilleri görülmektedir. Kaynak akımı malzemeye giren ısı miktarını etkilemesi, elektrod baskı kuvvetinin de dalma derinliğini etkilemesi, kopma şekillerinde etkili olmuştur.



Şekil 8.7. Kaynaklı parçalarının kopma şekli.

Şekil 8.7 incelendiğinde kaynaklı numunelerde iki tip kopmanın meydana geldiği görülmektedir. Bunlardan ilki genelde ITAB’da meydana gelen düğme tipi kopma olarak adlandırılan kopma türü, ikincisi ise yüksek kaynak parametreleri ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerde görülen yırtılma tipi kopma türüdür. Literatürde verilen bilgilere göre nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı birleştirmelerde üç tip kopma vardır. Bunlar; düğme, ayrılma ve yırtılma. Nokta direnç kaynağı ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde istenen kopma türü düğme tipi kopmadır. Çünkü düğme tipi kopma kaynak parametrelerinin uygunluğunun bir göstergesidir. Düğme tipi kopma çekme-makaslama dayanımının yüksek olduğu anlamına gelir.

Diğer iki kopma türünden biri olan ayrılma tipi kaynak parametrelerinin yetersiz olduğunun bir göstergesidir ve bu yüzden istenmeyen kopma türlerinden biridir. Bunun sebebi yetersiz kaynak parametrelerinin düşük ısı girdisi oluşturması ve küçük kaynak çekirdeği ve düşük çekme-makaslama dayanımına neden olmasıdır. Son kopma türü olan yırtılma ise kaynak parametrelerinin fazlalığından meydana gelir. Kaynak parametrelerinin aşırı yüksek olması fazla ısı girdisine neden olduğu için kaynak noktasında aşırı ergime ve fişkırmalara sebep olur. Bu nedenle aynı ayrılma türü kopma gibi istenmeyen bir kopma türüdür. Bu da çekme-makaslama dayanımını azaltır [3,17].

Şekil 8.7’de verilen kopma türleri genel olarak değerlendirildiğinde ayrılma tipi kopma türünün olamaması kaynak parametrelerinin doğru seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak 3 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod baskı kuvveti, 30 kaynak çevriminde ve yine 3 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevriminde kopma, yırtılma şekilde olurken diğer bütün birleştirmelerde ITAB’da düğme tipi kopma türü meydana gelmiştir. Bu sonuç kaynak akımının ve elektrod kuvvetinin kopma türleri üzerinde etkili olduğu göstermiştir.

Kopma tipleri ile çekme-makaslama testlerinden elde edilen değerler kıyaslandığında en düşük kaynak parametresi ile birleştirilmiş (2 kA, 0.6 MPa ve 30 çevrim) kaynaklı numunede kopma düğme çapı yaklaşık olarak 2,5-3 mm ölçülürken çekme-

makaslama dayanımı 6.49 kN, aynı elektrod baskı kuvveti ve aynı kaynak çevriminde akım 3 kA'e çıkarıldığında kopma düğme çapı 5-6 mm'ye çekme-makaslama dayanımı ise 7.49 kN'a ulaşmaktadır. Buradan bakıldığında düşük düğme çapına sahip birleştirmelerin düşük yük taşıma kapasitesine sahip olduğu bir gerçektir. Durgut ve Kaçar [28] dubleks paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağı üzerine yaptıkları bir araştırmada düşük kaynak akım şiddetinde, küçük kaynak çekirdek boyutu olduğundan ayrılma tipinde kopma olduğunu ve çok düşük çekme-makaslama yükü değerleri elde edildiğini rapor etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan kaynak akım değerleri, elektrod baskı kuvveti ve kaynak sürelerinin pilot çalışmalar sonucu belirlenmesi ayrılma tipi kopma türüne fırsat vermemiştir.

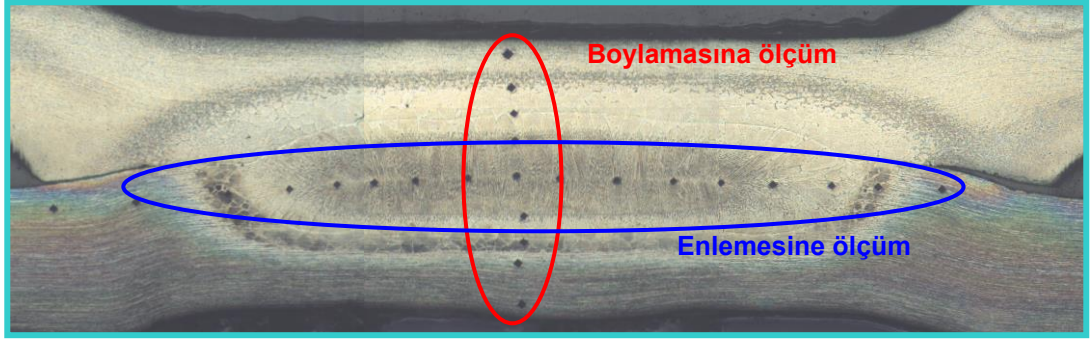
Burada ortaya çıkan en ilginç sonuç; bazı numunelerde kopma tipinin düğme tipinden yırtılma tipine geçmesine rağmen çekme-makaslama dayanımının düşmemesidir. Bunun sebebi olarak, ITAB'da meydana gelen morfolojik değişimlerin bağlantının dayanımına etki edebilecek bir seviyeye ulaşmamış olması olarak gösterilebilir.

8.4. SERTLİK TESTİ

Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı elektrod kuvveti (0.6 ve 0.8 MPa), kaynak akımı (2 ve 3 kA) ve kaynak zamanları,(20 ve 30 çevrim) kullanılarak birleştirilen AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik numunelerin tümüne sertlik testi uygulanmıştır.

Sertlik testleri kaynaklı numunelere hem boylamasına, hem de enlemesine uygulanmıştır (Şekil 8.8). Enlemesine yapılan ölçümler sonucunda kaynak merkezinden her iki yöne de alınan sonuçlar birbirlerine yakın değerler olduğundan enlemesine ölçümlerin tümünde kaynak merkezinden tek yöne doğru ölçüm alınmış ve bu şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca enlemesine sertlik ölçümlerinde, ölçümler sadece kaynak metalinden yapılırken, boylamasına ölçümler hem kaynak metali hem de ITAB'dan yapılmıştır. Burada enlemesine yapılan ölçümlerde kaynak yapılan malzemeler farklı olduğundan (birisi AISI 430, diğeri AISI 2304) her iki malzemenin de ITAB'ları farklı sertlik değerleri vermekte, bu durum sertlik değerlerini grafiğe

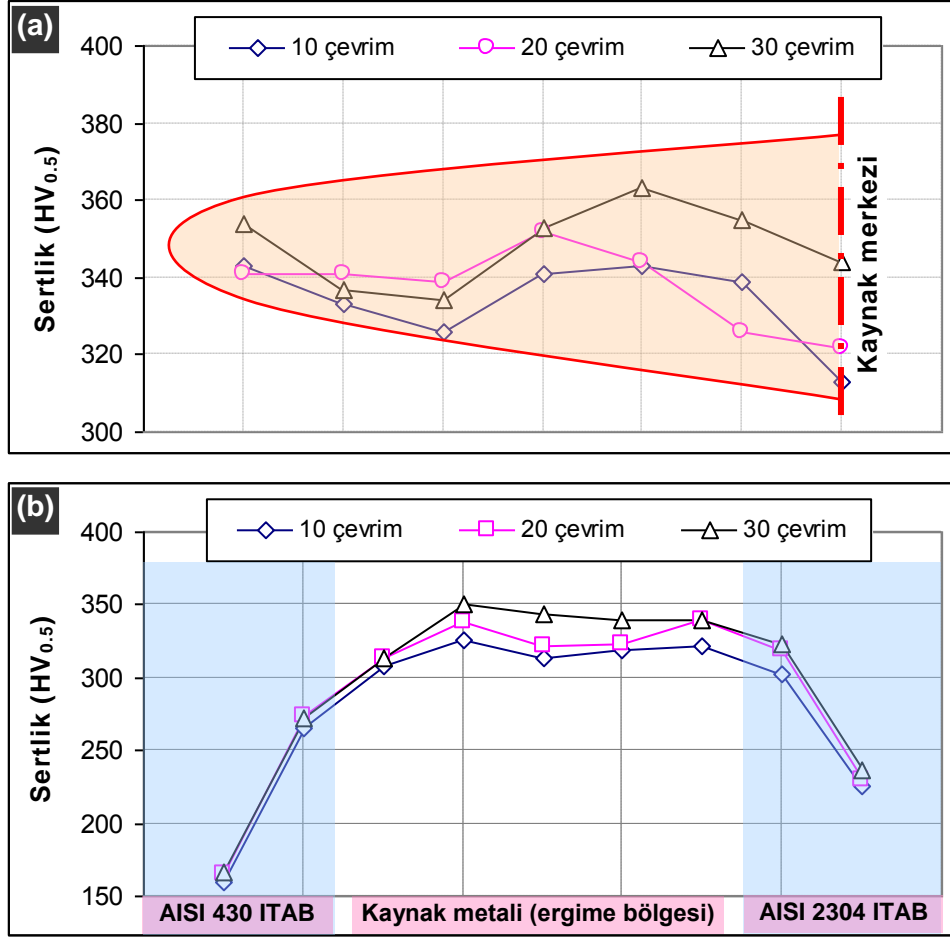
aktarma esnasında sorun oluşturmaktadır. Bu yüzden boylamasına olan kısımda her iki malzemenin de kolaylıkla ITAB'ından sertlik değerleri ölçülebilmüş ve grafiğe aktarılabilmıştır. Şekil 8.8'de kaynaklı numunelere uygulanan sertlik testinin uygulama yöntemi verilmiştir.



Şekil 8.8. Kaynaklı numunelere uygulanan sertlik testinin uygulama yöntemi.

Sertlik ölçüm grafikleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda boylamasına yapılan ölçümlerde her iki taraftan yani AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ana malzemenin ve AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik ana malzemenin kaynak metaline doğru gelindiğinde sertliğin arttığı tespit edilmiştir.

Farklı kaynak parametrelerinde yapılan sertlik ölçümlerinde bütün kaynak parametrelerinde kaynak metalinin her iki ana metalden de daha sert bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Şekil 8.9'da 2 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa elektrod kuvvetinde birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir.



Şekil 8.9. 2 kA-0.6 MPa’da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri a) kaynak metalini (enlemesine), b) kaynak metalini-ITAB (boylamasına).

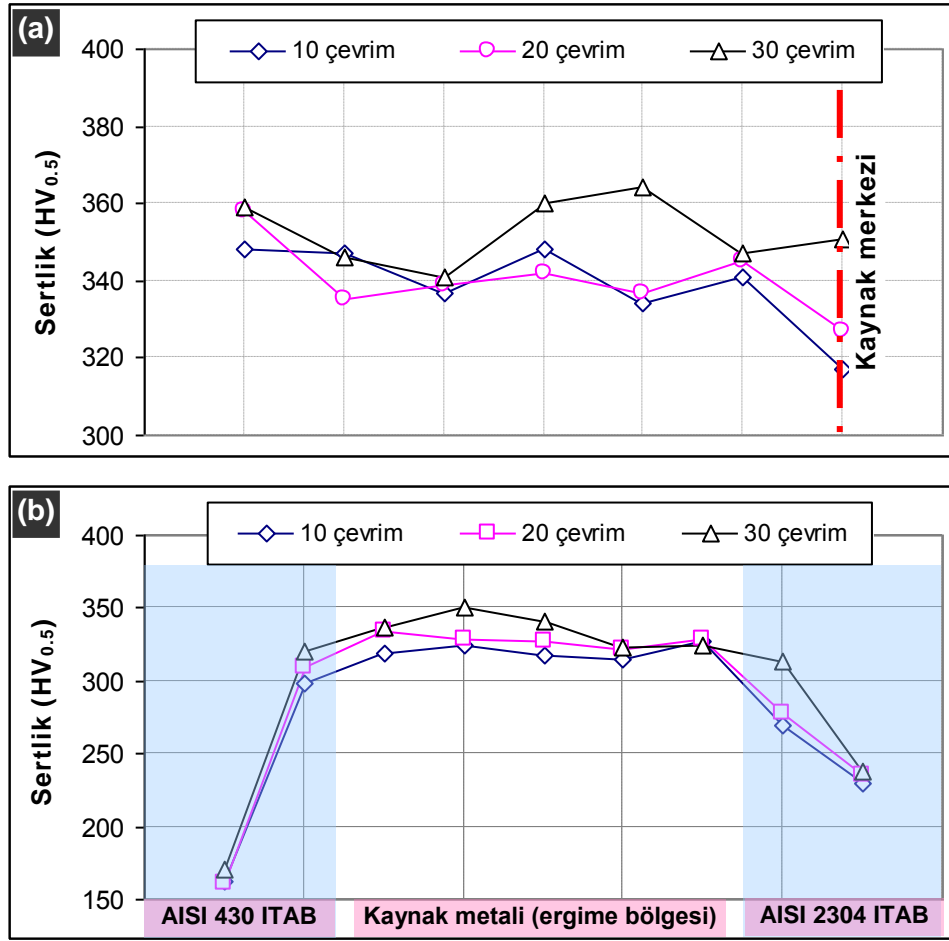
Kaynaklı birleştirmelerde kullanılan malzemelerden AISI 430 ferritik paslanmaz ana malzemenin sertliği 150 ± 3 HV, AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik ana malzemenin sertliği 225 ± 3 HV ölçülmüştür (Çizelge 7.2). Şekil 8.9’deki grafikler incelendiğinde kaynak için kullanılan ana malzemelerden bu değerler ölçülürken kaynak metalinin sertliği 10 kaynak çevriminde 313 HV, 20 kaynak çevriminde 322 HV ve 30 kaynak çevriminde ise 344 HV olarak ölçülmüştür. Buradan çıkan sonuca bakıldığında aynı elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının artmasına bağlı olarak kaynak metalini merkez sertliğinin attığı söylenebilir. Bu durum artan kaynak zamanına bağlı olarak artan ısı girdisi sonucunda ITAB’ın kaynak ısı çevriminden etkilendiğine işaret etmektedir. Şekil 8.9 (a) dikkatli bir biçimde incelendiğinde kaynak merkezinden enlemesine ITAB’a doğru gidildiğinde sertliğin arttığı veya azaldığına dair bir veri elde edilememiştir. Ancak bu bölgede kaynak süresinin artmasına bağlı

olarak sertlik değerlerinde bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8.9 (b) incelendiğinde ise kaynak merkezinden boylamasına ITAB'a doğru (gerek AISI 430, gerekse AISI 2304) gidildiğinde dikkate değer bir değişimin olmadığı, ancak enlemesine artan sertliğin burada da varlığını gösterdiği belirlenmiştir.

Burada dikkatle üzerinde durulması gereken konu, kaynak metaline göre her iki malzemenin ITAB'da meydana gelen sertlik düşüşüdür. Bir başka ifade ile kaynak işlemlerinde kullanılan her iki ana malzemenin de ITAB'larında sertlik bir miktar artış göstermiş, ITAB'dan kaynak metaline gelindiğinde ise sertlik zirve yapmıştır. Literatürde verilen bilgilere göre kaynak işlemi esnasında malzemede yaratılan sıcaklık değişimleri kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin içerdikleri ferrit ve östenit oranını değiştirmektedir [2]. Elektrik nokta direnç kaynak esnasında ısı girdisi çok hızlı olmakta dolayısıyla da kaynak bölgesi hızlı bir şekilde soğumaktadır. Bu nedenle kaynak bölgesinde meydana gelen (ITAB ve kaynak metali) farklı ısınma ve soğuma hızları sertlik değişimlerine neden olmaktadır.

Şekil 8.10'da 2 kA-0.8 MPa'da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri görülmektedir. Kaynak akımı sabit tutulup elektrod baskı kuvveti 0,6 MPa'dan 0,8 MPa'a çıkartıldığında (Şekil 8.10) ölçülen sertlik değerleri kaynak çevrimi süresinin artışına paralel olarak artmıştır ve sertlik değerleri 10 kaynak çevriminde 317 HV, 20 kaynak çevriminde 327 HV ve 30 kaynak çevriminde 351 HV olarak okunmuştur.

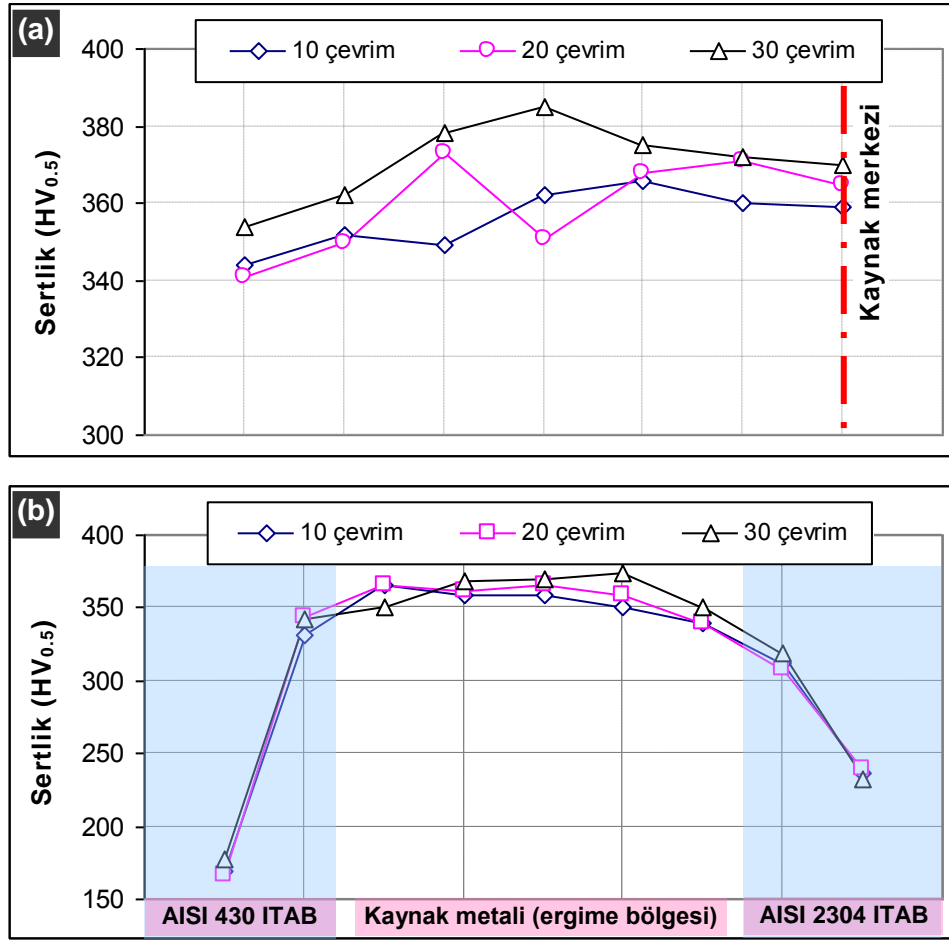
Şekil 8.9 ile Şekil 8.10 kıyaslandığında grafiklerin gerek enlemesine gerekse boylamasına benzeştikleri bir gerçektir. Burada kaynak akım değerinin artması kaynak bölgesine verilen ısı girdisini arttırmakta dolayısıyla da soğuma hızı çok az da olsa yavaşlamaktadır. Bu nedenle ısı girdisinin artmasına bağlı olarak ferrit/östenit dengesi değiştirdiğinden gerek ITAB, gerekse de kaynak metalinde meydana gelen sertlik artışı beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 8.10. 2 kA-0.8 MPa’da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri a) kaynak metalini (enlemesine), b) kaynak metalini-ITAB (boylamasına).

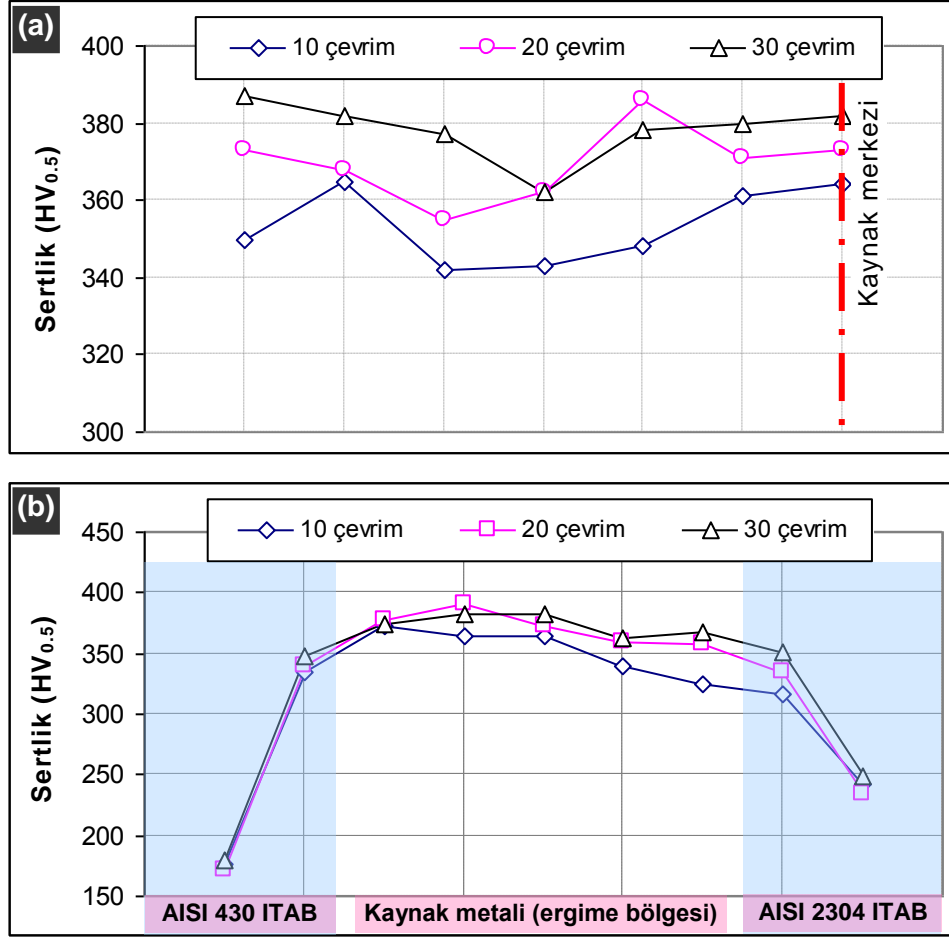
Şekil 8.10 incelendiğinde 2 kA kaynak akımı sabit tutulup sadece elektrod baskı kuvveti değiştirildiğinde gerek enlemesine gerekse boylamasına ölçümlerde sertlik değerlerinin bir miktar arttığı görülmektedir. Örnek vermek gerekirse 10 çevrimde ölçülen kaynak metalini sertliği 313 HV burada az bir artışla 317 HV’ye, 20 çevrimde ölçülen 322 HV, 327 HV’ye ve son olarak 30 çevrimde ölçülen 344 HV, 351 HV değerine yükselmiştir.

Şekil 8.11’de 3 kA kaynak akımı ve 0.6 MPa elektrod baskı kuvvetinde birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri görülmektedir.



Şekil 8.11. 3 kA-0.6 MPa’da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri a) kaynak metali (enlemesine), b) kaynak metali-ITAB (boylamasına).

Şekil 8.11 incelendiğinde 0,6 MPa elektrod baskı kuvvetinde, kaynak akımı 2 kA’den 3 kA çıkartıldığında kaynak metalinin sertliği 10 kaynak çevriminde 359 HV, 20 kaynak çevriminde 365 HV ve 30 kaynak çevriminde 370 HV olarak gerçekleşmiştir. Son olarak Şekil 8.12’de 3 kA kaynak akımı ve 0.8 MPa elektrod baskı kuvvetinde birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri görülmektedir.



Şekil 8.12. 3 kA-0.8 MPa’da birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerleri a) kaynak metali (enlemesine), b) kaynak metali-ITAB (boylamasına).

Şekil 8.12’de verilen grafik incelendiğinde de diğer sonuçlara benzer sonuçlar elde edildiği açıktır. Burada da kaynak parametre değerlerinin artışına bağlı olarak gerek enlemesine ölçüm sonuçlarının gerekse boylamasına ölçüm sonuçlarının bir miktar yüksek bulunduğu gözlenmiştir.

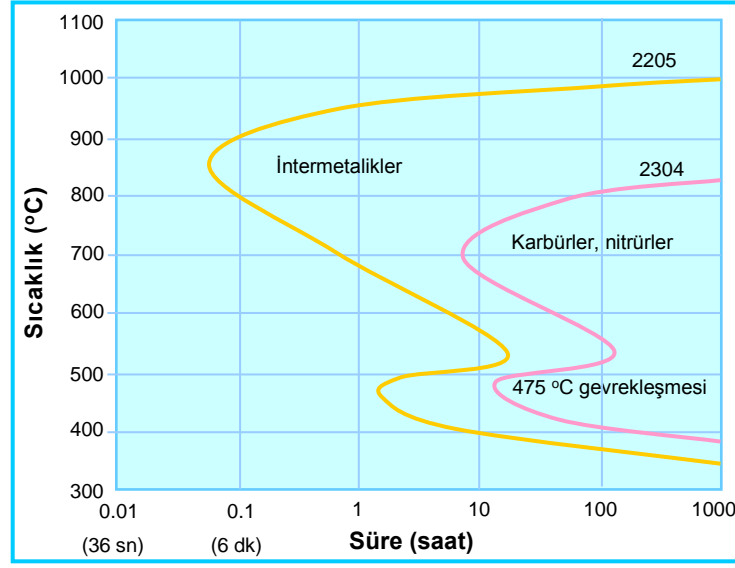
Sertlik ölçümleri bir bütün halde değerlendirildiğinde, enlemesine ölçümlerde kaynak merkezinden uzaklaştıkça sertliğin arttığı veya azaldığına dair bir veri elde edilemez iken, boylamasına yapılan ölçümlerde sertlik kaynak metalinin merkezinden uzaklaştıkça azaldığı verisine ulaşılmıştır. Kaynak merkezinden ana metallere doğru gidildiğinde ise sertlikte düşüşler meydana gelmiştir. Ayrıca yapılan ölçümler sonucunda en düşük sertlik değeri 2 kA kaynak akımı 0,6 MPa elektrod baskı kuvveti ve 10 çevrim kaynak süresinde 313 HV ölçülür iken, en yüksek sertlik

değeri ise 3 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde 382 HV olarak ölçülmüştür.

Ölçüm sonuçları irdelendiğinde kaynak parametrelerindeki artışla birlikte sertlikte artışlar meydana gelmiştir. Oluşan bu artışın sebebi artan kaynak parametreleri ile artan ısı girdisinin, dolayısıyla soğuma hızının kaynak çekirdeğinin ısı çevrimini etkilemiş olması ve bu durumun da kaynak metalindeki östenit-ferrit dengesini ferrit yönünde bozmuş olmasıdır. Kaçar ve Durgut [28] dubleks paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağına akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisi üzerine yaptıkları çalışmada değişen kaynak akımı ve kaynak zamanına bağlı olarak ısı girişinin değiştiği bunun sonucunda da soğuma hızının değiştiğinden dolayı kaynak metalindeki östenit-ferrit dengesinin ferrit lehine değiştiğini ve bununla kaynak metalinin sertliğini artırdığını bildirmişlerdir.

Literatürde kaynak işleminde var olan yoğun ısı girdisinin ve ardından hızlı soğumanın, kaynak dikişinin özelliklerini etkileyen mikroyapısal değişikliklere ve/veya çökelmelere neden olduğu ve normal bir kaynak uygulamasında sigma (σ) faz oluşum sıcaklıkları hızlı geçildiğinden 475°C kırılma sıcaklığının oluşmasının da zor olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca kaynak işleminde malzemede yaratılan sıcaklık değişimleri kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin içerdikleri ferrit ve östenit oranını değiştirir. Bu oranların değişmesi malzemenin mekanik özelliklerinin değişmesine neden olur denilmektedir [2].

Şekil 8.13'de AISI 2304 ve AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliklerin TTT diyagramları verilmiştir. Şekil incelendiğinde kaynak bölgesinin soğuma hızına bağlı olarak intermetalik (sigma fazı gibi) ve 475 °C gevrekleşmesinin oluşabilmesi için uzun sürelerin gerekli olduğu bir gerçektir. Bu nedenle artan parametrelere bağlı olarak sertliğin artmasında bu tür oluşumların etkin olmadığı söylenebilir.



Şekil 8.13. AISI 2304 ve AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliklerin TTT diyagramları [36].

Isı girdisinin, dolayısıyla soğuma hızının malzeme kalınlığına bağlı olarak değiştiği, özellikle yüksek alaşımlı dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında çok yavaş soğuma hızlarında metallararası gevrek fazlar oluştuğu bilinmektedir. Bu malzemelerin kaynağında, çok hızlı soğuma hızlarında yüksek ferrit miktarı, nitrür çökeltmeleri ve bunun sonucunda da düşük tokluk ve düşük korozyon direnci ile karşılaşılır. Dolayısı ile, dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağı alaşım içeriklerine bağlı olarak kontrollü bir ısı girdisi ile gerçekleştirilmelidir [37].

Kaynaklı malzemelerden ölçülen sertlik değerleri ile kaynaklı bölgeden elde edilen mikroyapı görüntüleri beraber değerlendirildiğinde sertlik değerleri yüksek olan numunelerde tane irileşmesinin daha belirgin olduğu söylenebilir. Burada sertlik artışının sebebi tane irileşmesi değil, iri taneler içerisinde oluşan alt tanelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca SEM görüntülerinde tane içerisinde meydana gelen çökeltilerin (krom karbür gibi) parametrelerin artışıyla belirginleştiği görülmektedir. Parametre değerlerinin artışıyla ısı girdisi artmış, dolayısıyla yavaş soğumadan dolayı karbür oluşumu da daha belirgin hale gelerek sertliğin artmasında etkili olmuştur. Literatürde verilenlere göre de [38] çok kristalli bir malzeme, tane boyutu veya ortalama tane çapının mekanik özellikler üzerinde etkisi büyük olduğu, büyük açılı tane sınırlarında dislokasyonların tane sınırlarını geçemediği ve tane

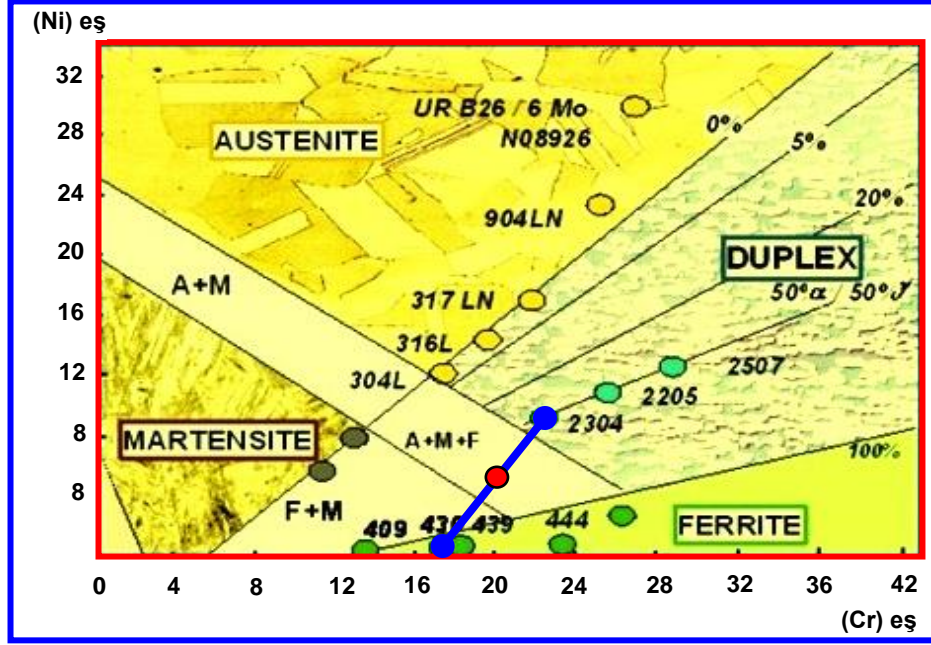
sınırlarında yığıldıkları belirtilmiştir. Ayrıca tane sınırlarında dislokasyonların yığılmasının bitişik tanede yeni dislokasyonlar üretecek olan gerilme yığılmalarına neden oldukları, ince taneli (küçük çaplı) bir malzemenin, dislokasyonları engelleyen toplam tane sınır alanı daha fazla olduğundan, kaba taneli olana göre sertliği ve dayanımı daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilen literatür ile uyum içerisindedir.

Jebaraj ve Ajaykumar AISI 2205 dubleks paslanmaz ER 2209 ilave metal kullanarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve düşük sıcaklıklarda kaynak metalinin tokluk ve mikroyapılarındaki değişiklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kaba ferrit tanelerinin (coarser ferrite grains) ITAB'a daha fazla sertlik verdiğini belirtmişler ancak bunun sebebi hakkında bir bilgi verilmemiştir [39].

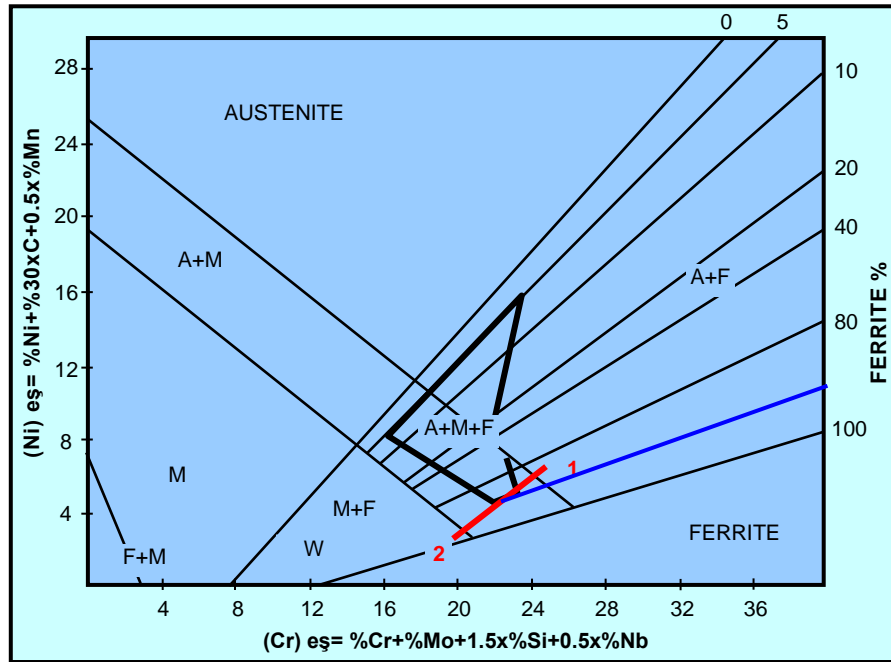
8.5. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik numunelerin kaynatılmadan önce oluşabilecek yapı hakkında bir fikre sahip olmak gerekir. Bu nedenle Schaeffler diyagramı üzerinde çalışma yapılarak nasıl bir yapının oluşabileceğine dair bir fikir edinilmiştir. Şekil 8.14'de kaynak sonrası meydana gelen yapıyı gösteren Schaeffler diyagramı verilmiştir.

Şekil 8.14 incelendiğinde kaynak metalinin ferrit, martanzit ve östenit yapılarının üçünün de bir arada olduğu görülmektedir. Bu yapının oluşmasında ilave dolgu metalinin kullanılmamasından kaynaklanmıştır. Ayrıca Durgut ve Kaçar [28] dubleks paslanmaz çeliklerle yaptıkları çalışmada bu yapının oluşmasında nokta direnç kaynağının çok hızlı ısınması ve ardından da aynı şekilde hızlı soğumasının etkili olduğu belirtmişlerdir.



Şekil 8.14. Kaynak sonrası meydana gelen yapıyı gösteren Schaeffler diyagramı.



Şekil 8.15. Kaynak metalindeki ferrit oranını gösteren Schaeffler diyagramı.

Şekil 8.15'deki diyagram yardımı ile kaynak metalinin yapısındaki ferrit, östenit ve martenzit yüzdeleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kaynak metalinin yaklaşık % 94'ünün ferrit, % 6'sının ise östenit + martenzit bileşiminden oluştuğu

belirlenmiştir. Çizelge 8.2’de Schaeffler diyagramına göre kaynak metalinin analizi verilmiştir.

Çizelge 8.2. Schaeffler diyagramına göre kaynak metalini analizi.

Hesaplama Formülü	Krom Eşdeğeri = %Cr + %Mo + 1,5 x %Si + 0,5 x %Nb + 2 x %Ti		
	Nikel Eşdeğeri = %Ni + 30 x %C + 0,5 x %Mn		
Veri Giriş Alanları :	Hücre Rengi Mavi		
Malzeme Numarası	Malzeme 1	2304	Malzeme 2
			430
Ayırt Edici Özellik	Kaynak Metali		
	Sample 30 x 100 mm		
Bileşim	Malzeme 1	Malzeme 2	Kaynak Metali 50/50
	%	%	%
Karbon - C	0,020	0,070	0,045
Silisyum - Si	1,000	1,000	1,000
Manganez - Mn	2,000	1,000	1,500
Krom - Cr	23,000	17,250	20,125
Molibden - Mo	0,350	0,000	0,175
Nikel - Ni	4,500	0,000	2,250
Niobium - Nb	0,000	0,000	0,000
Titanium - Ti	0,000	0,000	0,000
Hesaplanan Eşdeğer	Malzeme 1	Malzeme 2	Kaynak Metali 50/50
Nikel Eşdeğeri	6,10	2,60	4,35
Krom Eşdeğeri	24,85	18,75	21,80

Yapılan bu analiz sonucunda kaynak sonrasında meydana gelen yapının krom ve nikel eşdeğerlikleri belirlenmiştir. Yapılan bu eşdeğerlik hesaplamaları sonucunda kaynak sonrası krom ve nikel eşdeğerlikleri AISI 2304 dubleks paslanmaz çelikte % 24,85 krom (Cr), % 6,10 nikel (Ni), AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte % 18,75 krom (Cr), % 2,60 nikel (Ni) ve kaynak metalinde ise % 4,35 Nikel (Ni), % 21,80 krom (Cr) olarak hesaplanmıştır.

Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik numunelerin metalografik incelemelerinde kaynaklı bölgelerin karakteristik özelliklerinin daha iyi incelenebilmesi için farklı büyütme oranlarında incelemeler yapılmıştır. İncelemelerde (x) işareti ile gösterilen parametrelerde makro değerlendirme için (mikro fotoğraf/makro değerlendirme) düşük büyütme oranları, (✓) işareti ile gösterilen bölgelerde daha büyük büyütme oranları kullanılmıştır. Ayrıca 0,6 MPa kaynak basıncı ve 30 çevrim kaynak

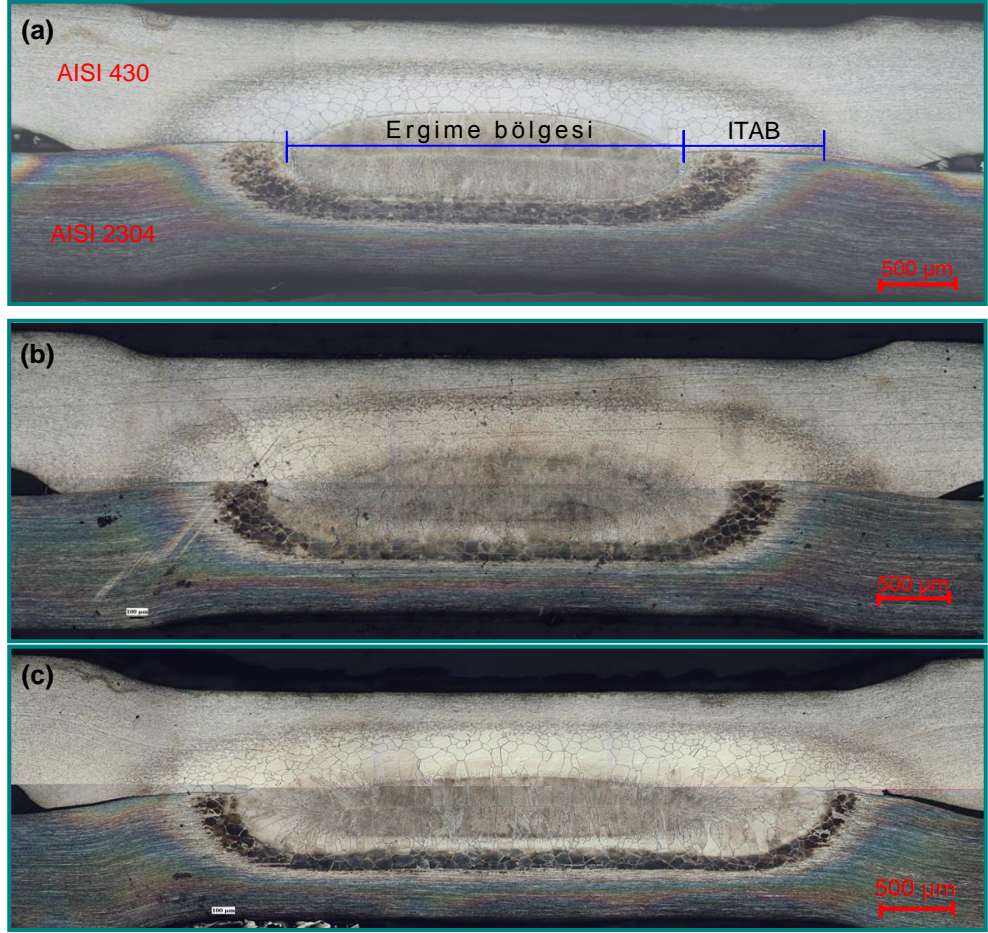
süresinde birleştirilmiş iki numunenin (2 kA ve 3 kA) sadece ITAB ve ergime bölgesi farklı büyütme oranında karakterize edilmiştir.

Çizelge 8.3. Mikroyapı numune tanımlamaları.

Kaynak parametreleri	10 çevrim	20 çevrim	30 çevrim
2 kA akım ve 0.6 MPa basınç	x	x	x
2 kA akım ve 0.8 MPa basınç	✓	✓	x
3 kA akım ve 0.6 MPa basınç	✓	✓	x
3 kA akım ve 0.8 MPa basınç	✓	✓	x

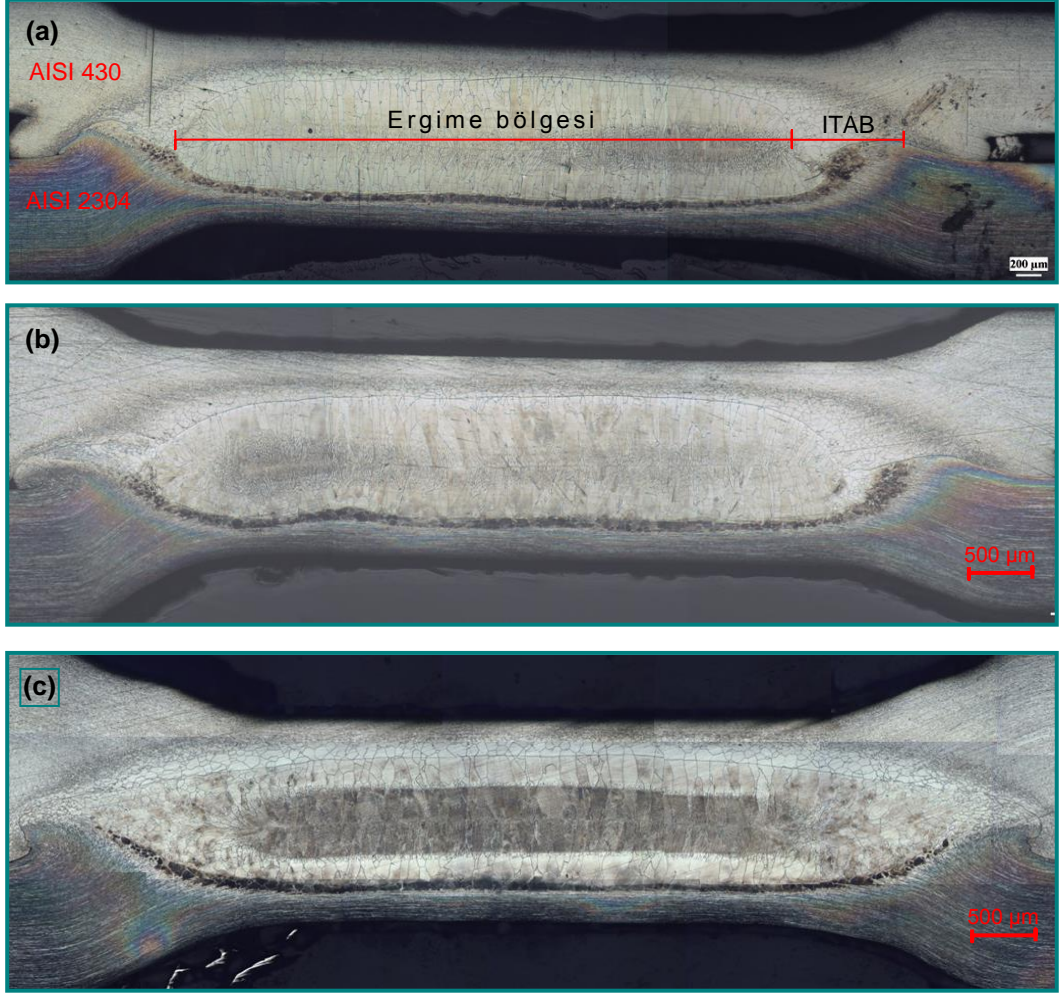
(x): Kaynak süresi (10, 20 ve 30 çevrim), kaynak akımı (2 kA, 3 kA) ve kaynak basıncı (0.6 MPa ve 0.8 MPa)
(o): Farklı kaynak parametrelerinde aynı büyütmede kaynak merkezi görüntüsü.

Karakterize çalışmalarında sabit kaynak akımı ve elektrod kuvveti altında farklı kaynak çevrim sürelerinde meydana gelen ergime bölgesi genişliği ve derinlikleri ölçülmüştür. Şekil 8.16'de en düşük parametrelerde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. Şekil incelemeleri sonucunda 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod baskı kuvveti altında ve 10 kaynak çevrimi süresinde ergime bölgesi genişliği 2,90 mm, derinliği ise 0,65 mm olarak ölçülmüştür. Kaynak çevrimi 20'ye çıkartıldığında ise ergime bölgesinin genişliği 3.15 mm derinliği ise 0,5 mm olarak ölçülmüştür. Son olarak kaynak çevrimi 30'a çıktığında ise 2 kA kaynak akımı ve 0,6 MPa elektrod baskı kuvveti altında en yüksek ergime bölgesi genişliği ve derinliği olan 3.60 mm ve 0.8 mm değerleri ölçümler sonucunda okunmuştur.



Şekil 8.16. En düşük parametrelerde (2 kA ve 0.6 MPa) birleştirilmiş kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri a) 10 çevrim, b) 20 çevrim ve c) 30 çevrim.

Daha sonra kaynak çevrimi süresi sabit tutulup kaynak akımı ve elektrod baskı kuvveti değerlerinin değiştirilmesi sonucunda meydana gelen ergime bölgesinin genişliği ve derinliği ölçülmüştür. Şekil 8.17’de en yüksek sürede (30 çevrim) birleştirilmiş kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapılan ölçümlerden bahsetmek gerekirse 2 kA kaynak akımı ve 0,6 MPa elektrod baskı kuvvetinde ergime bölgesi genişliği 5,40 mm, derinliği ise 1,05 mm olarak ölçülmüştür. Devamında kaynak akımı 3 kA, elektrod baskı kuvveti 0,6 MPa yapıldığında ergime bölgesinin genişliği 6,05 mm derinliği de 1,10 mm, ve son olarak kaynak akımı 3 kA, elektrod baskı kuvveti 0,8 MPa çıkartıldığında ise ergime bölgesinin genişliği 6,70 mm, derinliği 1,15 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.17. En yüksek sürede (30 çevrim) birleştirilmiş kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri a) 2 kA-0.8 MPa, b) 3 kA-0.6 MPa ve c) 3kA-0.8 MPa.

Bu yapılan ölçümler karşılaştırıldığında kaynak parametrelerdeki artış sonucu ergime bölgesi genişliğinin hızlı bir şekilde büyüdüğü, derinliğin ise bir miktar daha yavaş büyüdüğü ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu sonucun nedenlerinin neler olabileceği soruna cevap arandığında varılan düşünce, kaynak parametrelerinin artmasına bağlı olarak kaynak çekirdek derinliğinin artması yani alt ve üst elektrodlar arasında meydana gelen kısmın azalması olmuştur.

Bunun dışında kaynak parametrelerinde yapılan değişiklikler ergime bölgesinin genişliğini ve derinliğini üzerinde etkili olmuştur. Kaynak parametrelerinin meydana getirdiği bu etki, değişen parametrelere paralel değişen ısı girişine bağlanmıştır.

Çünkü gerek kaynak akımı, gerekse kaynak çevrim süreleri arttırıldığında kaynak bölgesine giren ısı miktarında da artış meydana gelmiştir. Ölçüm sonuçları irdelendiğinde ise parametrelerdeki artışın ergime bölgesinin genişliğinde ve derinliğinde artışlara sebep olduğu görülmüştür.

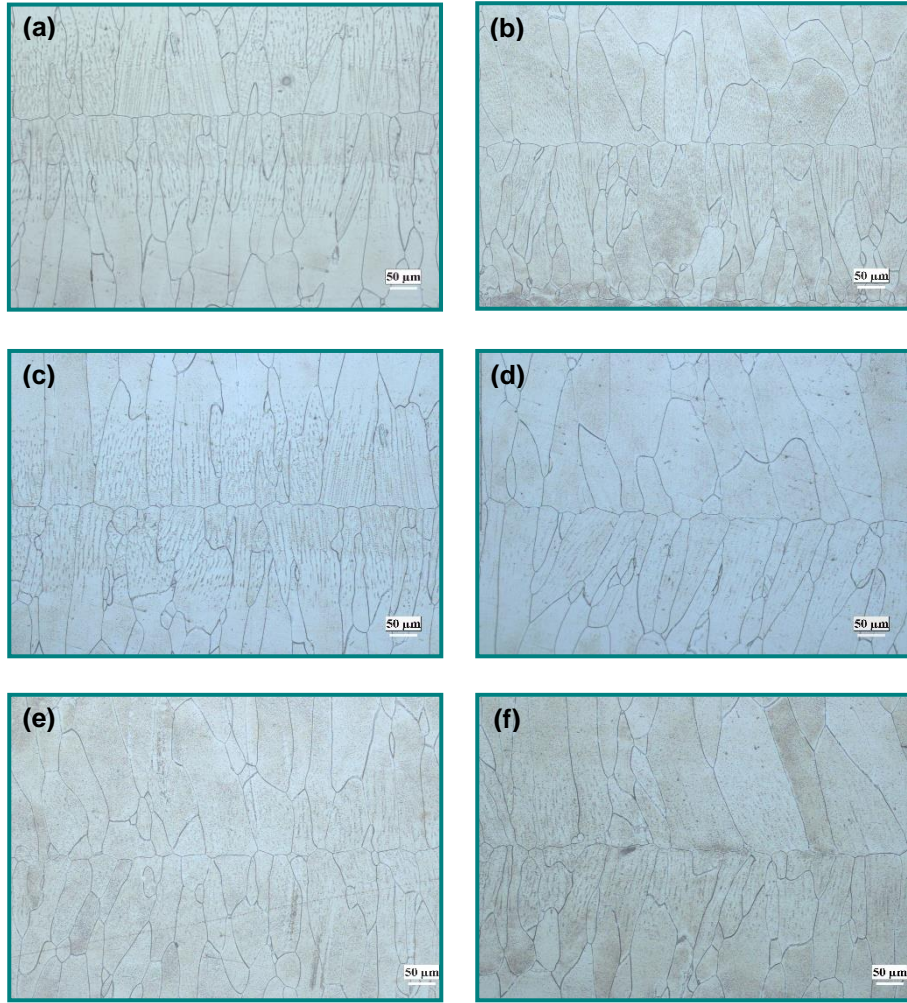
Ayrıca kaynak metalinin ve ITAB'ın tane yapısı incelemesi yapılmıştır. Tane boyutunun ısı girişi ile doğru orantılı olarak arttığı yapılan mikroyapı çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Buna neden olan en büyük etken ise kaynak akımının ve kaynak çevrim süresinin artması olmuştur. Aynı şekilde Hayat [17] çift fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında MHO ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisi üzerine yaptığı çalışmada kaynak çevrim süresinin artışı ile ITAB'ın tane boyutlarının arttığını bildirmiştir. Ayrıca Uygur ve arkadaşları [40] galvanizli saclarla yaptıkları çalışmada ITAB'da tane büyümesi meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Kaynak metalinin her iki tarafının ITAB'ında da (yani hem dubleks tarafında hem de ferrit tarafında) kaynak sırasında tercih edilen kaynak çevrimi süresine ve kaynak akımına bağlı olarak tanelerde büyümeler olmuştur. Zira kaynak çevrim süresi ve kaynak akımı ısı girişi ile doğru orantılı olduğundan parametrelerdeki artış ısı girişinde de artışa sebep olmuştur. Kaçar ve Durgut [28] dubleks paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağına akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisi üzerine yaptıkları çalışmada kaynak çevrim zamanın ve kaynak akımının ferrit tanelerinin büyümesi üzerinde etkili olduğunu bildirmişlerdir. Kaynak çevrim süresi ve kaynak akımının artışı ile büyüyen ferrit taneleri kaynağın tokluğunu ve şekillenebilirliğini olumsuz yönde etkiledikleri bir gerçektir. Bu yüzden bu tür malzemelerin kaynağında tane irileşmesi arzu edilmemektedir.

Şekil 8.18'de farklı parametrelerde birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metallerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil dikkatli bir biçimde incelendiğinde kaynak akımı, elektrod kuvveti ve kaynak zamanının artışına bağlı olarak tane irileşmesinin arttığı görülmektedir. Örneğin kaynak akımı 2 kA sabit tutulup kaynak çevrimi süresi arttırıldığında kaynak bölgesine ısı girişinde artış

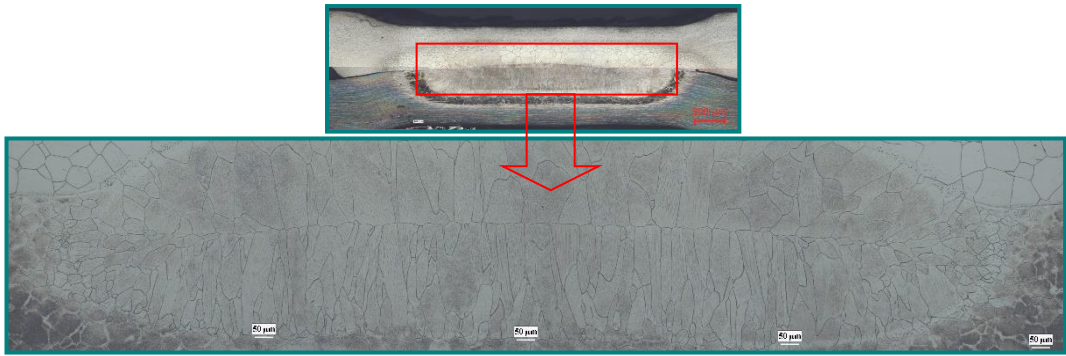
meydana gelmiştir. Bu artışa paralel olarak da kaynak metalinin tane boyutlarındaki artış da fazlalaşmıştır.

2 kA kaynak akımında olduğunda gibi 3 kA kaynak akımı sabit tutulup kaynak çevrimi artırıldığında da 2 kA kaynak akımındakine benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu da kaynak akımı sabit tutulup kaynak çevrimi süresinin artışı sonucu meydana gelen ısı girişi kaynak metalinin tane boyutlarında artışa sebep olmuştur.

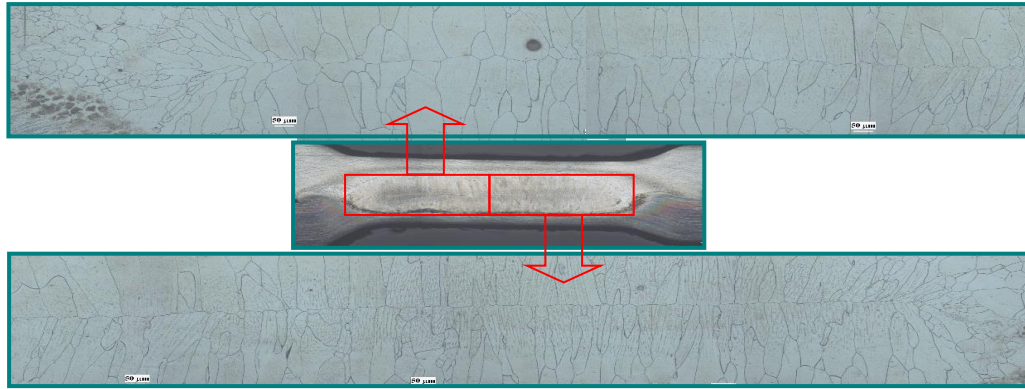


Şekil 8.18. Farklı parametrelerde birleştirilen kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri a) 2 kA-0.8 MPa-10 çevrim, b) 2 kA-0.8 MPa-20 çevrim c) 3kA-0.6 MPa-10 çevrim, d) 3 kA-0.6 MPa-20 çevrim e) 3 kA-0.8 MPa-10 çevrim f) 3 kA-0.8 MPa-20 çevrim.

Tabiki burada kaynak akımının ısı girdisine etkisini de göz ardı edilmemelidir. Zira kaynak akımını 2 kA'den 3 kA'e çıkartıldığında aynı kaynak çevrim sürelerine benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. 3 kA kaynak akımındaki tane büyümesinin 2 kA kaynak akımındaki tane büyümesinden daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 8.19'da 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa basınç ve 30 çevrim süresinde birleştirilmiş kaynaklı numunenin, Şekil 8.20'de ise 3 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim süresinde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi (kaynak metali+ITAB) mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.19. 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim süresinde birleştirilmiş kaynaklı numunenin mikroyapı görüntüsü.



Şekil 8.20. 3 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim süresinde birleştirilmiş kaynaklı numunenin mikroyapı görüntüsü.

Şekil 8.19 ve Şekil 8.20 incelendiğinde kaynak birleşme arayüzlerinin çok düzenli olduğu, herhangi bir gözenek vb kaynak hatası içermediği görülmektedir. Ayrıca

kaynak akımı arttırılıp diğer kaynak parametreleri sabit tutulduğunda (elektrod kuvveti ve zaman) tane irileşmesinin arttığı belirlenmiştir.

Kaçar ve Durgut [28] dubleks paslanmaz çelikler üzerine yaptıkları çalışmada ITAB mikroyapısını artan kaynak zamanı ve kaynak akımı şiddeti açısından incelemişler ve kaynak ısıl çevrimi sonucunda ferrit tanelerinin irileştiğini bununda kaynaklı bağlantının tokluk ve şekillendirilebilirliğini azalttığını rapor etmişlerdir.

Danial ve arkadaşları [23], Hessamoddin ve Iradj [27] östenitik paslanmaz çeliklerle yaptıkları çalışmada kaynak zamanı ve kaynak akımının artması ile tane boyutlarının da arttığını bununda temel sebebinin yüksek ısı girişi olduğunu ve yüksek ısı girişine ise kaynak zamanının ve kaynak akımının artışının neden olduğunu rapor etmişlerdir.

Mikroyapı çalışmaları sonucunda ise dubleks paslanmaz çelikler ile ferritik paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağında ferrit tanelerindeki büyümelerin kaynak sırasında tercih edilen kaynak akımı ve kaynak çevrimi ile doğrudan bağlantılı olduğu ana fikrine ulaşılmıştır. Ayrıca nokta direnç kaynağında kaynak metalinde ani ısınma ve ardında ani bir şekilde soğuma gerçekleştiğinden yapısında ferrit, östenit ve martenzitin bir arada görülmüştür. Bu oluşan yapı kaynak metalinin mekanik özelliklerini de etkilemiştir. Burada önemli olan konu dubleks paslanmaz çelikler ile ferritik paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağında ferrit ve östenit arasındaki dengenin bozulmamasıdır. Bu yüzden bu tür çeliklerin kaynağında ferritin ve östenit arasındaki dengenin korunması kaynaklı birleştirmenin mekanik özellikleri açısından önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

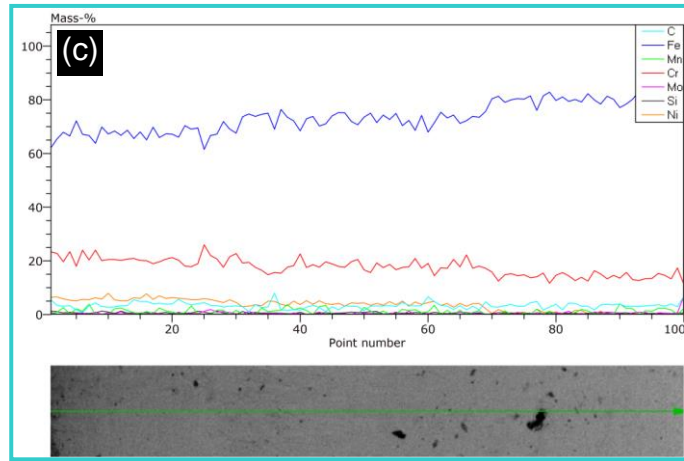
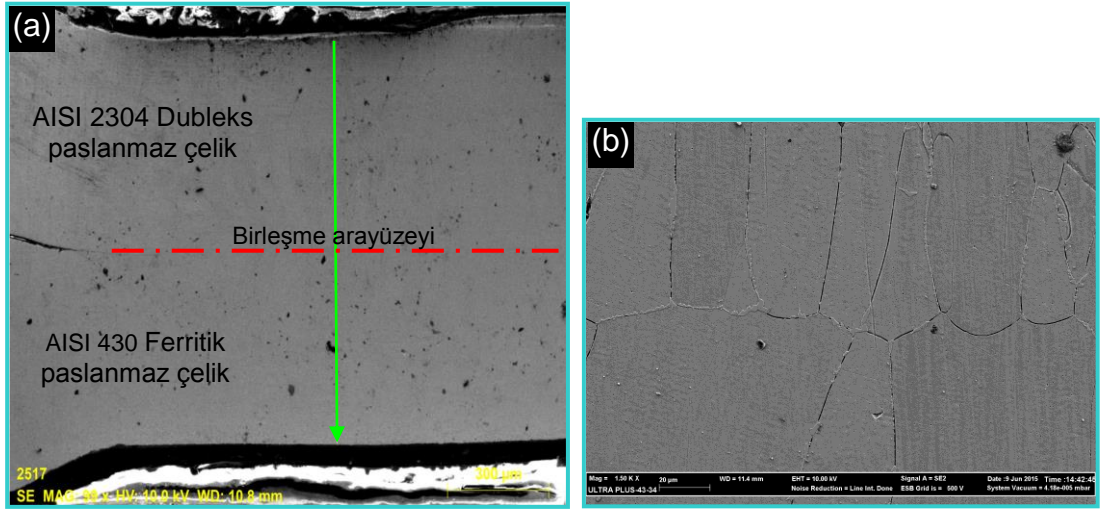
Çalışmanın ortaya koyduğu diğer bir sonuç ise değişen kaynak parametrelerinin ergime bölgesinin genişliğini ve derinliğini değiştirmesi olmuştur. Daha öncede belirtildiği gibi bu değişikliğin oluşmasında en büyük etken ısı girişi olmuştur. Dikkat çeken bir diğer oluşum ise ergime bölgesinin genişliğindeki büyümenin hızlı derinliğindeki büyümenin ise oldukça yavaş meydana gelmesi olmuştur.

8.6. SEM (TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU) ÇALIŞMALARI

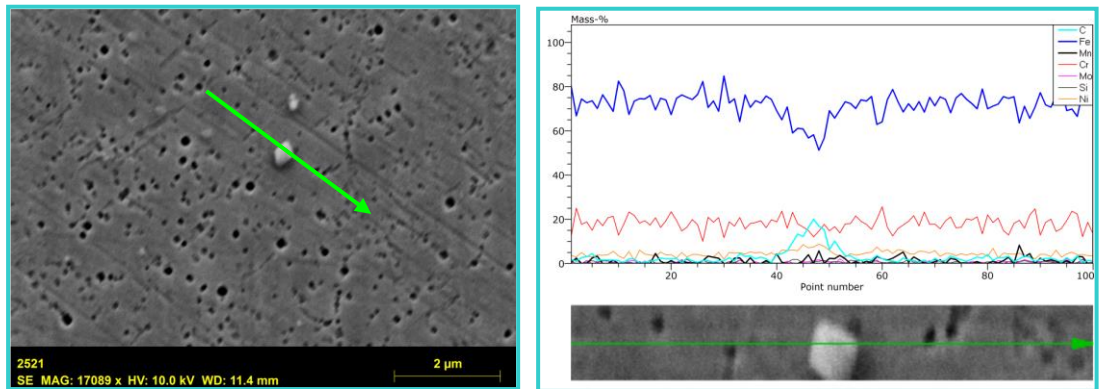
Nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik numunelere SEM çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada fazla miktarda farklı kaynak parametreleri kullanıldığı için SEM çalışmaları kaynaklı numunelerin tamamına uygulanması yerine sadece çevrimlik bir seriye uygulanmıştır. Bu amaçla sadece 30 çevrim kaynak zamanlarında birleştirilen kaynaklı numunelere (toplam 4 adet) SEM çalışmaları yapılmıştır. Bu şekilde kaynak parametrelerinden kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin etkilerini görebilmek mümkün olmaktadır.

Şekil 8.21'de 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod baskı kuvveti ve 30 kaynak çevrim süresinde birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, arayüzeyin SEM görüntüsü ve çizgisel analiz grafiği sırasıyla verilmiştir.

SEM taramaları AISI 2304 dubleks paslanmaz çelikten AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğe doğru yapılmıştır. 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevrim süresinde birleştirilen deney parçasına yapılan kaynak çekirdeği çizgisel tarama sonucunda dubleks paslanmaz çelikten ferritik paslanmaz çeliğe doğru gidildikçe %'de demir (Fe) miktarının arttığı buna karşılık %'de krom (Cr) miktarının ise azaldığı görülmüştür. Nikel (Ni) hariç diğer alaşım elementlerinde ise dikkate değer bir değişim meydana gelmediği görülmüştür. Nikel; birleşmenin AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik tarafında ITAB ve kaynak metalinde varlığını korumakta ancak birleşmenin AISI 430 ferritik paslanmaz çelik tarafında görülememektedir. Bunun sebebi nikelin ana malzemelerden birisinde var diğerinde ise yok olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.21. 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin a) kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, b) arayüzeyin SEM görüntüsü ve c) çizgisel analiz grafiği.



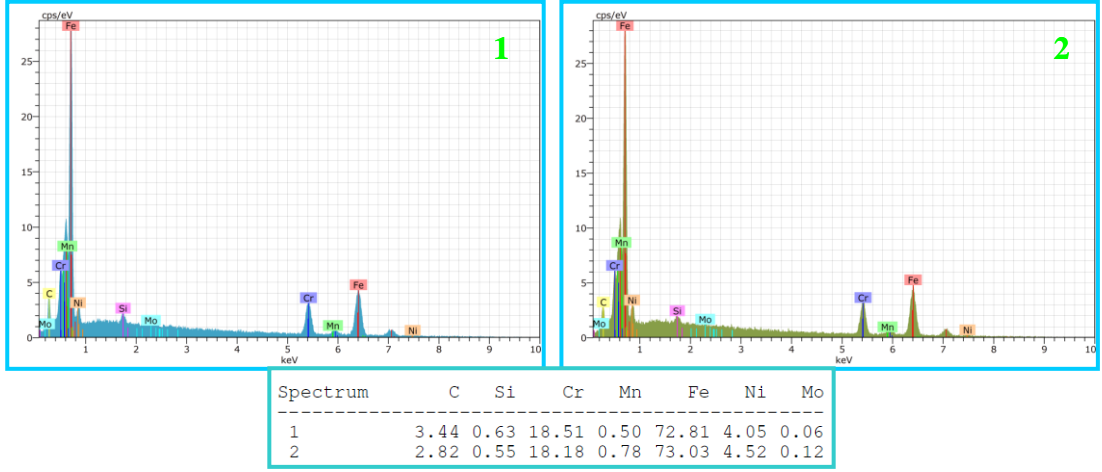
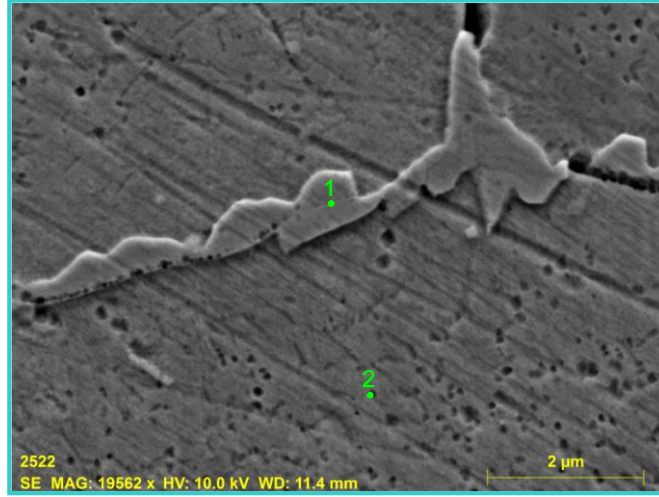
Şekil 8.22. 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunedan alınan çizgisel analiz grafiği.

Şekil 8.22’de 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevrim süresinde birleştirilen numuneden alınan çizgisel analiz grafiği görülmektedir. Şekilde görülen nokta üzerinde yapılan çizgisel tarama sonucunda kaynak metalinde karbon (C) miktarında bir miktar artış olduğu görülmüş ve bu noktanın karbür çökmesi olduğu saptanmıştır. Diğer alaşım elementlerinde ise bir değişiklik meydana gelmediği görülmüştür.

Şekil 8.23’de 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin tane sınırı ve tane içinden alınan noktasal analiz grafiği verilmiştir. Tane sınırında çökme gibi oluşum meydana getiren yapının çizgisel taraması yapıldığında oluşan bu yapının kimyasal bileşim olarak tane ile aynı yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu yapının ilave difüzyon sonucu oluşan ikincil östenit fazı olduğu düşünülmüştür. Lippold ve Kotecki [37] paslanmaz çeliklerin kaynak metalurjisi ve kaynak kabiliyeti üzerine yaptıkları çalışmada; hızlı soğuma koşullarında kaynak metalinde ve ITAB’da ferrit-östenit dengesiden daha çok kararlı bir bileşim verme eğiminde olduğunu, tekrar kaynak metali ısındığında ilave difüzyon meydana geldiğini ve bunun sonucunda mevcut östenit taneleri daha da büyüdüğünü ya da yeni östenit taneleri oluştuğunu, oluşan bu östenit tanelerine ikincil östenit denildiğini belirtmiştir.

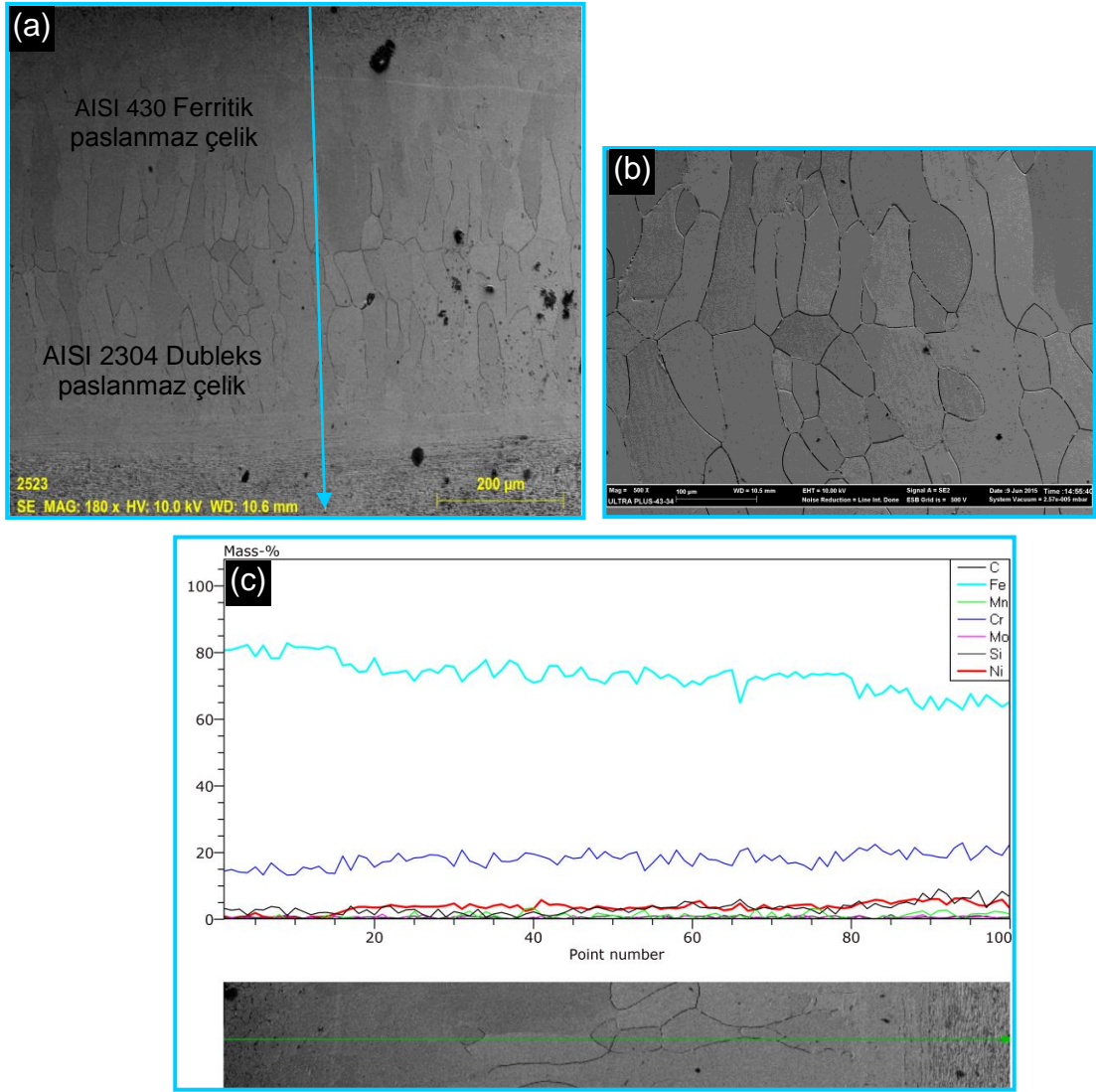
Tolungüç ve arkadaşları [41] 2205 dublesk paslanmaz çeliklerinin hibrit plazma ark kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı dönüşümleri üzerine yaptıkları çalışmada gaz metal ark kaynaklarında ısıl döngünün etkisiyle ferrit fazında asiküler formda östenit tanelerinin çekirdeklendiklerini bildirmişlerdir.

Ayrıca bu tarama sonucunda tane sınırında, tane içine göre % karbon (C) % silisyum (Si) ve % krom (Cr) miktarlarında çok az bir artış görülürken diğer alaşım elementlerinin % miktarlarında ise çok az bir azalma olduğu saptanmıştır.



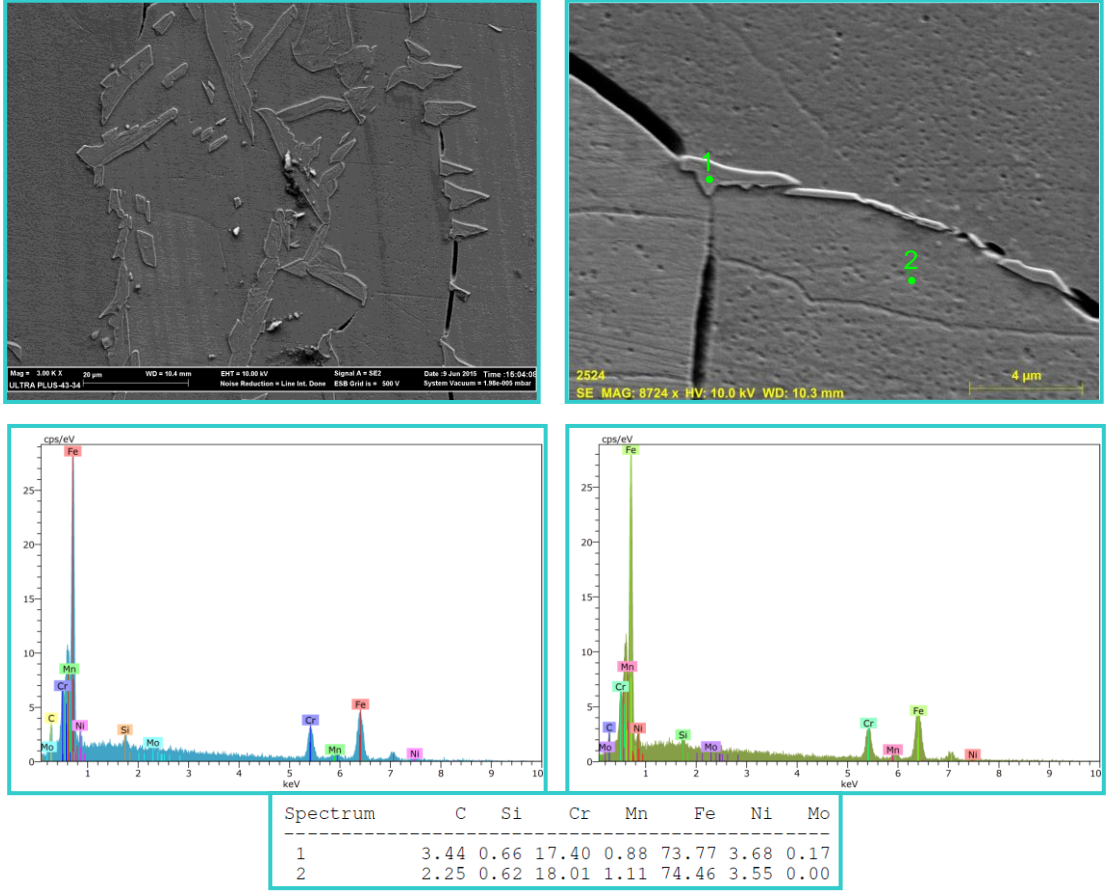
Şekil 8.23. 2 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin tane sınırı ve tane içinden alınan noktasal analiz grafiği.

Şekil 8.24'de 2 kA kaynak akımı 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevriminde numunelerin kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, arayüzeyin SEM görüntüsü ve çizgisel analiz grafiği sırasıyla görülmektedir. Malzemelerden AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemedan AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik tarafına doğru yapılan analizlerde, demir (Fe) miktarı azalırken, krom (Cr) miktarının arttığı görülmüştür. Ayrıca birleştirmenin AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik tarafına doru gidildikçe eser miktarda var olan nikel (Ni) artmış ve kaynak metalinin devamındaki ITAB'da normal değerlerinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8.24. 2 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin a) kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, b) arayüzeyin SEM görüntüsü ve c) çizgisel analiz grafiği.

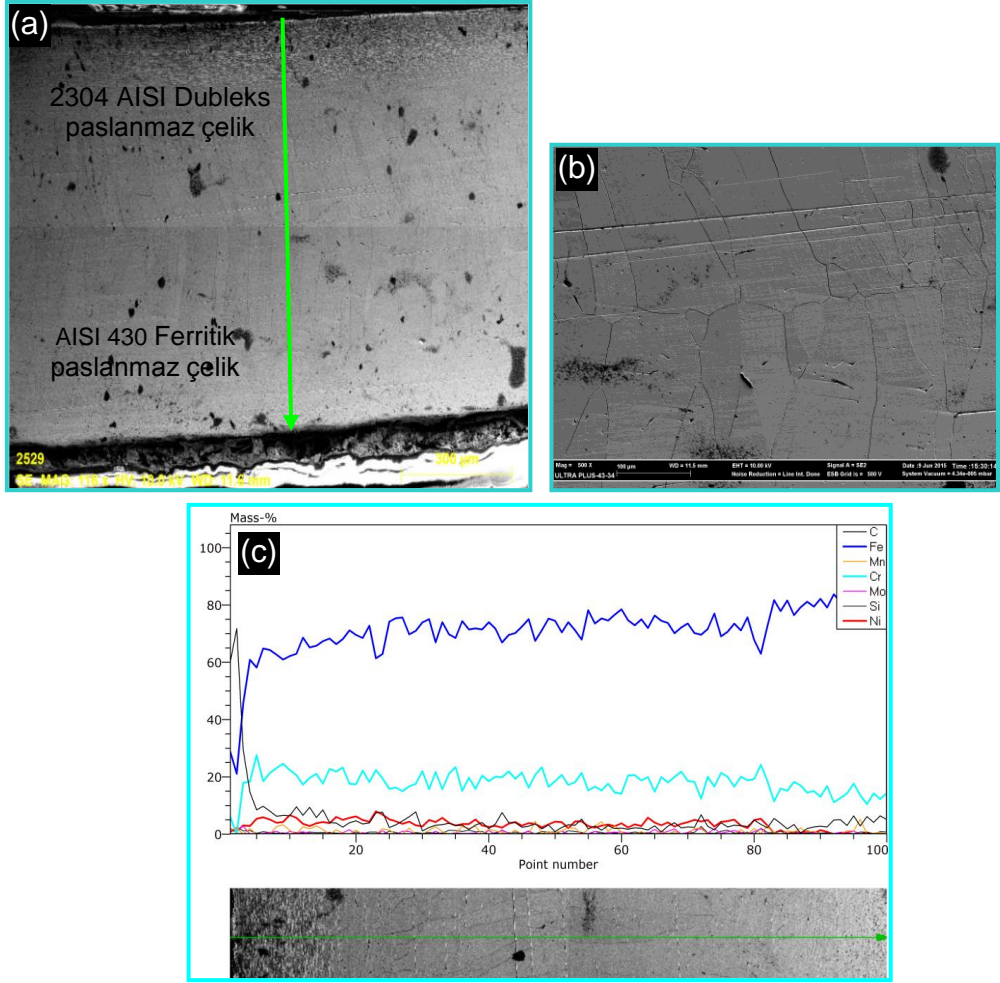
Şekil 8.25’de 2 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevrim zamanında birleştirilen numunelerin tane sınırı ve tane içinden alınan noktasal analiz grafiği verilmiştir. Tarama işlemi birleştirmenin AISI 430 ferritik paslanmaz çelik tarafından, birleştirmenin AISI 2304 dupleks paslanmaz çelik tarafına doğru yapılmış olup, yapılan incelemeler sonucunda ferritik paslanmaz çelikten dupleks paslanmaz çeliğe doğru gidildikçe tane içine oranla çok az miktarlarda da olsa tane sınırında silisyum (Si), nikel (Ni) ve nolibden (Mo) miktarlarında artış, demir (Fe), krom (Cr) ve mangan (Mn) miktarlarında azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 8.25. 2 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin tane sınırı ve tane içinden alınan noktasal analiz grafiği.

Şekil 8.26’te 3 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevrim zamanında birleştirilen numunelerin a) kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, b) arayüzeyin SEM görüntüsü ve c) çizgisel analiz grafiği görülmektedir.

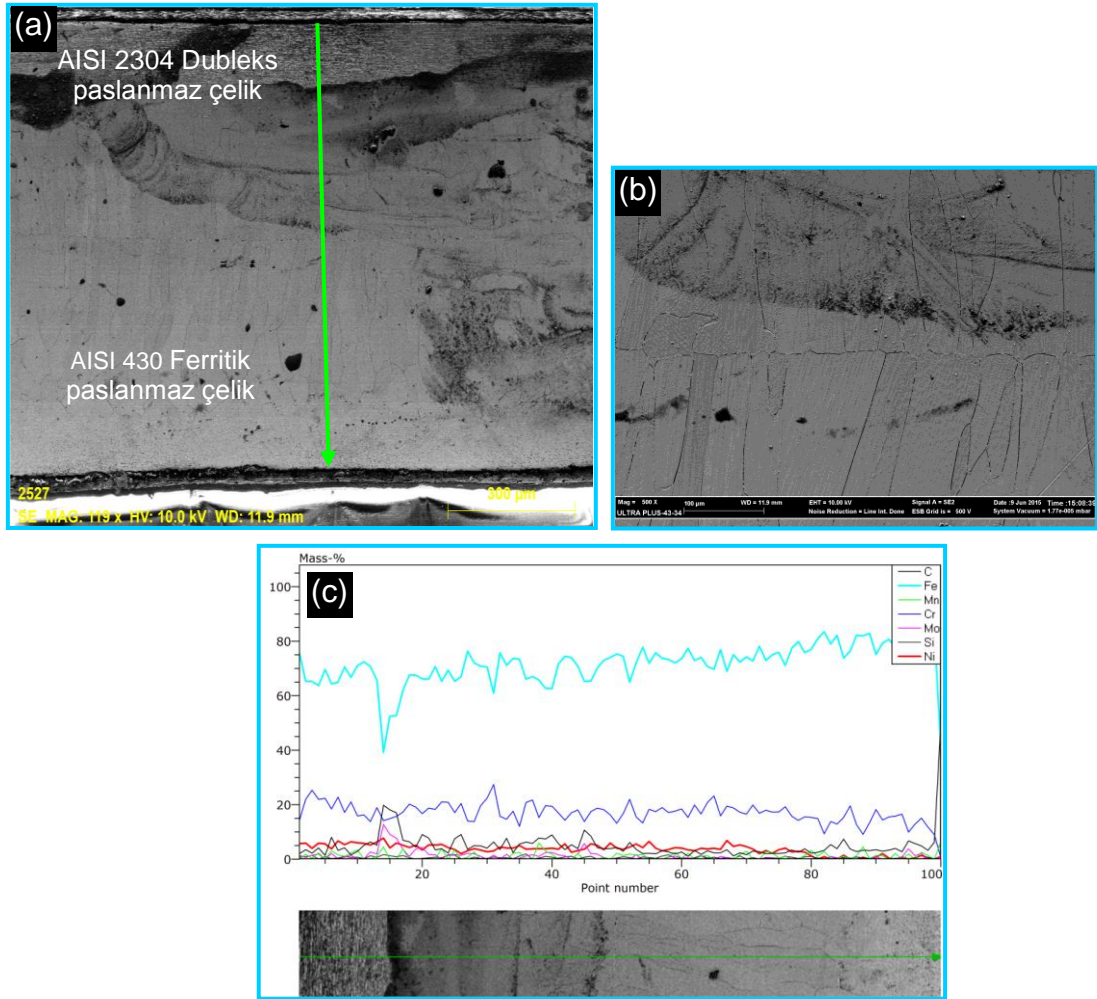
Tarama işlemi birleştirmenin AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik tarafından başlanarak birleştirmenin AISI 430 ferritik paslanmaz çelik tarafına doğru yapılmış olup, çalışma sonucunda dubleks paslanmaz çelikten ferritik paslanmaz çeliğe doğru gidildikçe % demir (Fe) miktarı artarken, % krom (Cr) miktarı düştüğü görülmüştür. Nikel ise diğer birleştirmede olduğu gibi davranarak birleştirmenin ferritik tarafında ITAB ve ana malzemede yok denecek kadar görülebilmektedir.



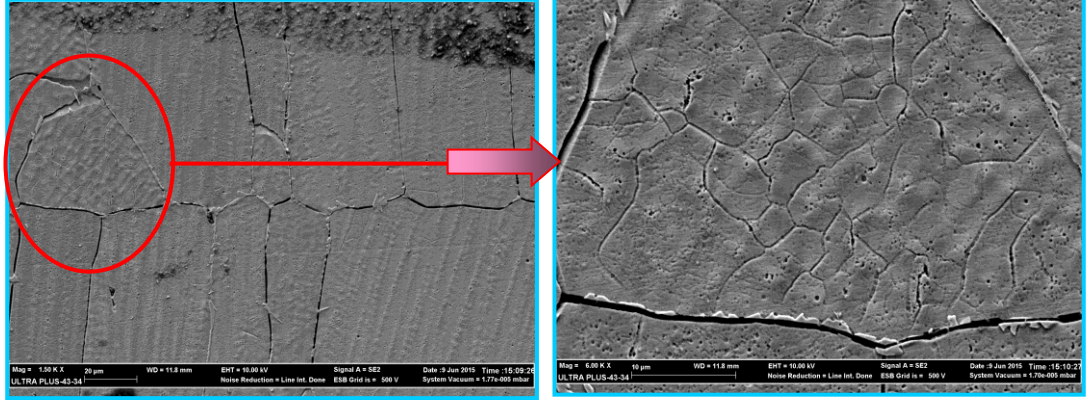
Şekil 8.26. 3 kA kaynak akımı, 0,6 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin a) kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, b) arayüzeyin SEM görüntüsü ve c) çizgisel analiz grafiği.

Şekil 8.27’de 3 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevrim zamanında birleştirilmiş deney parçalarının kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, arayüzeyin SEM görüntüsü ve çizgisel analiz grafiği verilmiştir. Tarama işlemi AISI 2304 dupleks paslanmaz çelikten, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğe doğru yapılmıştır. Tarama çalışmaları sonucunda dupleks paslanmaz çelikten ferritik paslanmaz çeliğe doğru gidildikçe % demir (Fe) miktarında artma meydana gelirken %’de krom (Cr) miktarında ise azalma olduğu görülmüştür. Nikel (Ni) ve karbon (C) hariç diğer alaşım elementlerinin miktarlarında ise herhangi bir değişme olmadığı görülmüştür. Burada nikel elementindeki değişme diğer birleştirmelerdekine benzer davranış sergilemiş bulunmaktadır. Yani birleştirmenin AISI 2304 ana malzeme,

ITAB ve kaynak metalinde görülebilmektedir. Karbon ise özellikle birleşmenin AISI 2304 tarafında belirgin olmak üzere bölgesel olarak yükselmeler görülmüştür. Buradan hareketle bu bölge daha detaylı inceleme gereği duyularak Şekil 8.27 (b)'de verilen arayüzey büyütülerek Şekil 8.28 (a) elde edilmiştir. Bu büyütmede mevcut taneler net bir biçimde görülmüş ayrıca tane içerisinde yeni oluşumların var olabileceği düşünülerek Şekil 8.28 (a) büyütülmüş ve Şekil 8.28 (b) elde edilmiştir.



Şekil 8.27. 3 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin a) kaynak çekirdeği çizgisel tarama bölgesi, b) arayüzeyin SEM görüntüsü ve c) çizgisel analiz grafiği.



Şekil 8.28. 3 kA kaynak akımı, 0,8 MPa elektrod kuvveti ve 30 kaynak çevrim süresinde birleştirilen numunede oluşan alt tanelerin SEM görüntüsü.

Şekil 8.28’de yapılan SEM çalışmasında iri tanelerin içerisinde alt tanelerin oluştuğu görülmüştür. İri tane içerisinde çatlak gibi görünen yerlerin yüksek açılı ve uyumsuz tane sınırları olduğu diğerlerinin ise alt tane sınırı olduğu düşünülmüştür. Zira alt tane sınırları yüksek açılı tane sınırlarına göre daha uyumlu ve düşük açıdır. Ayrıca oluşan bu alt tanelerin malzemenin sertliğinin artışında önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Literatürde [38] çok kristalli bir malzemede, tane boyutu veya ortalama tane çapının mekanik özellikler üzerinde etkisinin büyük olduğu bildirilmiştir.

Tolungüç ve arkadaşları [41] 2205 dubleks paslanmaz çeliklerin hibrit plazma ark kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı dönüşümleri üzerine yaptıkları çalışmada GMA kaynak yönteminde çok pasolu kaynak yapısı sebebiyle ferrit taneleri içinde östenit alt tanelerinin de çekirdeklenmeye başladığının gözlemlendiğini bildirmişlerdir.

BÖLÜM 9

SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrik nokta direnç kaynak parametrelerinin farklı metallerin kaynağı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, yüksek akma dayanımına sahip AISI 2304 dubleks paslanmaz çelikler ile yüksek korozyon direncine sahip olan AISI 430 ferritik paslanmaz çelikler farklı kaynak parametreleri ile birleştirilmiştir. Kaynaklı parçalara çekirdek çapı genişliği, elektrod dalma derinliği, çekme-makaslama deneyi, sertlik ölçümü, mikroyapı ve SEM çizgisel tarama çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan bu çalışma sonucunda nokta direnç kaynak parametrelerinin AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik ile AIS I430 ferritik paslanmaz çelik birleştirmeleri üzerindeki etkileri hakkında ulaşılan veriler;

- ✓ Öncelikle tercih edilen kaynak parametrelerinin tümünde olumlu sonuçlar alınmış ve gerçekleşmeyen birleşmeler meydana gelmemiştir. Bu olumlu sonuçtaki en büyük etken, deneysel çalışmalar öncesi yapılan pilot deneylerdir.
- ✓ Kaynak çekirdek boyutu ve elektrod dalma derinliklerinin oluşumunda kaynak parametrelerin yadsınamaz bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak da artan kaynak parametrelerinin ısı girdisini yükseltmesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak artan kaynak parametreleri ile çekirdek çaplarında ve elektrod dalma derinliklerinde artmalar meydana geldiği bulunmuştur.
- ✓ Kaynak parametrelerindeki değişikliklerin kaynağın çekme-makaslama dayanımı üzerinde mutlak etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma dahilinde gerek artan kaynak akımı, gerekse kaynak çevrimi birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımının yükselmesine neden olmuştur.

- ✓ Kaynaklı bağlantılar üzerindeki kopma şekilleri incelendiğinde yalnızca iki numunede (3 kA-0.6 MPa-30 çevrim ve 3 kA-0.8 MPa-30 çevrim) yırtılma şeklinde kopma türü meydana gelirken, diğer numunelerin tümünde kopma ITAB'da düğme şeklinde meydana gelmiştir.
- ✓ Yapılan sertlik çalışmaları sonucunda, en yüksek sertlik değerleri ergime bölgesinden (kaynak metali) ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca artan kaynak akımı, elektrod kuvveti ve kaynak çevrimi ile birlikte sertlikte artışlar meydana gelmiştir.
- ✓ Isı girdinin artışı ile birlikte soğuma hızının da değiştiği, bunun sonucunda da ferrit ve östenit arasındaki dengenin ferrit yönünde bozulduğu, artan ferrit miktarının da sertliği artırdığı ortaya çıkmıştır.
- ✓ Makroyapı çalışmaları sonucunda değişen kaynak parametrelerinin ergime bölgesinin genişliği ve derinliği üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- ✓ Yapılan mikroyapı çalışmalarında, kaynak metalinin; ferrit, östenit ve martizitten oluşan bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.
- ✓ Kaynaklı numunelerin gerek AISI 430 ferritik paslanmaz çelik, gerekse AISI 2304 dubleks paslanmaz çelik ITAB'larında ısının etkisiyle tanelerin irileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı girdisinin artışına bağlı olarak da hem kaynak metalinde, hem de ITAB'da tane irileşmesinin arttığı belirlenmiştir.
- ✓ SEM'de yapılan çizgisel EDS çalışmaları sonucunda, ergime bölgesinde kimyasal içeriğin birleştirilen her iki malzemenin de kimyasal içeriğinde var olan elementlerden meydana geldiği, ancak ITAB'ların sadece kendi kimyasal kompozisyonlarını yansıttığı görülmüştür.
- ✓ Artan kaynak parametrelerinin kaynak bölgesindeki tanelerinin büyümesine neden olduğu hem optik mikroskop hem de SEM çalışmalarından tespit edilmiştir. Ayrıca SEM çalışmalarından yüksek açılı ve uyumsuz tane sınırları ile iri taneler içerisinde oluşmuş uyumlu ve küçük açılı tane sınırlarının mevcudiyeti tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Türkyılmazoğlu, A., “Dubleks, martezyitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya,16-55 (2006).
2. Dolutaş, H., Cavcar, M., “Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağı”, *Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş.*, İstanbul, 2-14 (2001).
3. Kaya, Y., “Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 2-41, 80-86 (2010).
4. Osmanoğlu, T., “AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikro yapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7-27 (2012).
5. Gözütok, E., “Paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında argon-hidrojen gaz karışımının birleştirmelerin mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 4-8 (2009).
6. Şenyüz, G., “304 kalite paslanmaz çelik ve galvanizli sacların şekillendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönlerden incelenerek karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-22 (2008).
7. Kaluç, E., “Ferritik-ostenitik paslanmaz çelik çiftinin nokta kaynağında kaynak parametrelerinin çekme-makaslama mukavemetine ve tanelerarası korozyona etkisi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-24, 137-139, (1998).
8. Yorulmazel, S. C., “Paslanmaz çelik konstrüksiyonlarda oluşan distorsiyonların etüdü”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 8-15 (2007).
9. Çelik, E., “Martenzitik paslanmaz çelik ve ferritik paslanmaz çeliğin kendileriyle ve birbirleriyle sürtünme karıştırma yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ, 4-18 (2006).
10. Teker, T., “AISI 430/AISI 1040 çelik çiftinin anahtar deliği plazma kaynak yöntemi ile birleştirilmesi, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ, 61-64 (2010).

11. Kah, D. H., Dickinson, D. W., “Weldability of ferritic stainless steels”, *Supplement to the Welding Journal*, August, 135-142 (1981).
12. Esindir, E., “Farklı metallerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-9 (2009).
13. Coşkun, M. H., “Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF 7114 ve DP600 çelik sacların nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 13-22 (2009).
14. Keleş, S., “Tasarım ve imalatı yapılan punta kaynak makinasında nesne yönelimli işlem planlama sisteminin uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi*, Kütahya, 2-5 (2008).
15. Anık, S., “Kaynak teknolojisi el kitabı”, *Güriş Makine ve Montaj Sanayi A.Ş.*, 175-193 (1983).
16. Kahraman, N., Güleç, B., “Modern kaynak teknolojisi”, *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Sti.*, 2. Baskı, Ankara, 148-165 (2013).
17. Hayat, F., “Çift- fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında MHO ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 35-83 (2005).
18. Kocabekir, B., “Isı girdisi ve kaynak atmosferinin 316 L paslanmaz çeliklerin direnç kaynak birleştirmelerine etkileri”, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 45-48 (2006).
19. Erik, M., “Farklı kalınlıklarda galvaniz kaplanmış çelik sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 37-70 (2010).
20. Güngör, O., “Elektrik nokta direnç kaynağının sonlu elemanlar yöntemi ile parametrik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-12 (2010).
21. Yıldırım, O., “Otomotiv endüstrisinde kullanılan nokta direnç kaynağı uygulamalarında işlem parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 53-55 (2010).
22. Gündüz, S., Hayat, F., Kaçar, R., Kocabekir, B., “An effect of heat input, weld atmosphere and weld cooling conditions on the resistance spot weldability of 316L austenitic stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 195: 327–335 (2008).
23. Amadeh, A. A., Kianersi, D., Mostafaei, A., “Resistance spot welding joints of AISI 316 L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations”, *Materials and Design*, 61: 251-263 (2014).

24. Hasanbaşıoğlu, A., Kaçar, R., “Resistance spot weldability of dissimilar materials (AISI 316 L-DIN EN 10130-99 Steels)”, *Materials and Design*, 28 (6): 1794-1800 (2007).
25. Özyürek, D., “An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 316 L austenitic stainless steel”, *Materials and Design*, 29: 597–603 (2008).
26. Gündüz, S., Kaçar, R., Karcı, F., “The effect of process parameter on the properties of spot welded cold deformed AISI 304 grade austenitic stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (8): 4011-4019 (2009).
27. Moshayedi, H., Sattari-Far, I., “Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (2): 347-354 (2012).
28. Durgut, E., Kaçar, R., “Dubleks paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağına akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisi”, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ*, 26 (2): 341-348 (2011).
29. Khourshid, A., Mourad, A. H., I., Sharef, T., “Gas tungsten arc and laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties”, *Materials Science and Engineering A*, 549: 105– 113 (2012).
30. Capello, E., Chiarello, P., Previtali, B., Vedani, M. “Laser welding and surface treatment of a 22Cr-5Ni-3Mo duplex stainless steel”, *Materials Science and Engineering A*, 351: 334- 346 (2003).
31. Alizadeh-Sh., M., Marashi, S. P. H., Pouranvari, M., “Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel phase transformations and mechanical properties”, *Materials and Design*, 56: 258–263 (2014).
32. Bina, M. H., Jamali, M., Sabet, H., Shamanian, M., “Investigation on the resistance spot-welded austenitic/ferritic stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75 (9-12): 1371-1379 (2014).
33. Kaya, Y., “AISI 304 ve AISI 430 Paslanmaz çeliklerin TIG, MIG ve Örtülü elektrod ark kaynağıyla birleştirilmesinin araştırılması”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25 (3): 549-557 (2010).
34. Gündüz, S., Kaçar, R., “AISI 304-AISI 430 paslanmaz çeliklerin direnç kaynak kalitesine soğuk deformasyonun etkisi”, *TMMOB makine mühendisleri odası, IV. Demir Çelik Sempozyumu*, Karabük, 1-6 (2007).
35. Yakup K., Kahraman, N., “The effects of electrode force, welding current and welding time on the resistance spot weldability of pure Titanium”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60: 127-134, (2012).

36. Seitovirta M., “Handbook of Stainless Steel”, *Outokumpu Oyj*, Espoo,Finland, 21-25, (2013).
37. Lippold, J., C., Kotecki, D., J., “Welding metallurgy and weldability of stainless steels”, *Willey Interscience*, 230-259 (2005).
38. Callister, W. D., Rethwisch, D. G., “Materials Science and Engineering”, Çeviri Editörü Kenan GENEL, 8. Baskıdan çeviri, *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara, 211-214 (2013).
39. Ajaykumar, L., Vinoth, J. A., “Influence of microstructural changes on impact toughness of weldment and base metal of duplex stainless steel AISI 2205 for low temperature”, *Procedia Engineering*, 64: 456-466 (2013).
40. Uygur I, Gülenç B, Ozyılmaz A. “The effect of process parameters on the mechanical properties of steel sheets”, *Metallofizika I Noveishie Tekhnologii*, 3: 273-282 (2007).
41. Tolungüç, B., Yurtışık, K., Tirkeş, S., Gür, C. H., Ertürk, M. T., Batıgün, C., Gürbüz, R., “2205 Dublesk paslanmaz çeliklerinin hibrit plazma ark kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı dönüşümleri”, *Mühendis ve Makine*, 53: 77-82 (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Ali YÜRÜK 1970 yılında Bilecik İlinin Bozüyük ilçesinde doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini Eskişehir’de tamamladı. 1990 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’nde öğrenime başlayıp 1994 yılında iyi derece ile mezun oldu. 1994 yılında Çankırı Merkez Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi’nde öğretmen olarak göreve başladı. 1998 yılında Çankırı Orta İlçesi Yıldırım Beyazıt Çok Programlı Lisesine atandı. 2004 yılında Düzce Merkez Mesleki Eğitim Merkezine metal işleri öğretmeni olarak atandı. 2010 yılı Kasım ayında Düzce Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesine Müdür yardımcısı olarak atandı ve halen aynı okulda görevine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Düzce Fatih Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi
Fevzi Çakmak Mah. 173. Sok. No:2, 81100
Merkez/ DÜZCE

Tel : (532) 5648099

E-posta : aliyuruk@hotmail.com