

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OSTENİTİK AISI 310-FERRİTİK AISI 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN
ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mustafa BAYTEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet OĞUR

Ocak 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OSTENİTİK AISI 310-FERRİTİK AISI 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN
ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

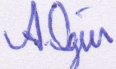
YÜKSEK LİSANS TEZİ

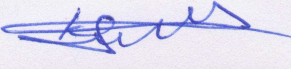
Mak. Müh. Mustafa BAYTEMİR

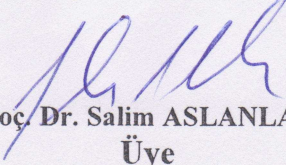
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 28/01/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Ahmet OĞUR
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Kenan GENEL
Üye


Doç. Dr. Salim ASLANLAR
Üye

ÖNSÖZ

Demir esaslı malzemeler arasında paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon dayanımları, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri ve estetik görünümleri gibi özellikleriyle son 25 yılın kullanımı hızla yaygınlaşan çok önemli bir malzeme grubudur. Endüstriyel uygulamalarda çeşitli paslanmaz çelik türlerinin üstün özelliklerinden faydalanma ve maliyeti düşürme gibi amaçlarla farklı kombinasyonlarının bir arada kullanılması günümüzde yaygın şekilde uygulanmaktadır. Bu farklı kombinasyonların birleştirilmesinde çok çeşitli kaynak yöntemleri kullanılmakla birlikte özellikle ince saclardan oluşmuş tasarımların kullanıldığı kimya, gıda ve otomotiv sanayinde en çok kullanılan kaynak yöntemi elektrik direnç nokta kaynağıdır. Bu sebeple bu çalışmada biri ferritik diğeri ostenitik olmak üzere iki farklı paslanmaz çelik türü direnç nokta kaynağı ile birleştirilerek, kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Bu güncel ve önemli konuda yüksek lisans çalışması yapmamı sağlayan değerli hocam tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet OĞUR'a, çalışma esnasında idari ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli mesai arkadaşlarım Suat POLAT, Tuncay KARADUMAN, Özbay YILMAZ, Murat MELEKOĞLU ve sayın müdürüm Fehmi BİNİCİ'ye ayrıca tezimin çeşitli aşamalarında, tesis ve laboratuvar olanaklarını kullandırma konusunda yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm FEDERAL ELEKTRİK A.Ş. yetkililerine ve SAÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim çok değerli aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xviii
SUMMARY.....	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	8
2.1. Paslanmaz Çelikler ve Üstünlükleri.....	8
2.2. Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi.....	12
2.3. Paslanmaz Çeliklerin Üretimi.....	15
2.4. Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapısına Etki Eden Elementler.....	17
2.4.1. Ferrit oluşturan elementler.....	18
2.4.2. Ostenit oluşturan elementler.....	18
2.4.3. Nötr elementler.....	19
2.5. Paslanmaz Çeliklerin Faz Diyagramları.....	19
2.5.1. Fe-Cr sistemi.....	20
2.5.2. Fe-Cr-C sistemi.....	22
2.5.3. Fe-Cr-Ni sistemi.....	25
2.5.4. Schaeffler-Delong ve WRC-1992 Diyagramları.....	26
2.6. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları.....	28

2.6.1. Ferritik paslanmaz çelikler.....	31
2.6.2. Ostenitik paslanmaz çelikler.....	39
2.6.3. Martenzitik paslanmaz çelikler.....	43
2.6.4. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler.....	46
2.6.5. Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler.....	48
2.7. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	49
2.7.1. Fiziksel özellikler.....	50
2.7.2. Mekanik özellikler.....	52
2.8. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti.....	56
2.8.1. Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti.....	56
2.8.2. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti.....	58
2.8.2.1. Krom karbür oluşumu.....	59
2.8.2.2. Sıcak çatlak oluşumu.....	61
2.8.2.3. Sigma (σ) fazı oluşumu... ..	62
2.9. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı.....	64

BÖLÜM 3.

ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	66
3.1. Direnç Nokta Kaynağı Prensibi.....	66
3.2. Direnç Nokta Kaynağı Kabiliyeti.....	70
3.3. Kaynak Sırasında Sıcaklık Dağılımı ve Kaynak Çekirdeği Oluşumu.....	71
3.4. Kaynak Çevrimi.....	73
3.4.1. Yaklaşma ve sıkma zamanı.....	74
3.4.2. Kaynak zamanı.....	74
3.4.3. Tutma zamanı.....	74
3.4.4. Ayrılma zamanı.....	74
3.5. Direnç Nokta Kaynağı Değişkenlerinin İncelenmesi.....	76
3.5.1. Kaynak akımının etkisi.....	76
3.5.2. Kaynak zamanının etkisi.....	79
3.5.3. Elektrot kuvvetinin etkisi.....	81
3.5.4. Elektrot bileşimi ve şeklinin ısınma üzerine etkisi.....	83

3.5.4.1. Elektrot bileşiminin etkisi.....	83
3.5.4.2. Elektrot şeklinin etkisi.....	84
3.5.4.3. Elektrotların malzemesi ve boyutları.....	84
3.5.5. İş parçasının malzemesi.....	86
3.5.6. Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi.....	87
3.5.6.1. Yüzey hazırlama.....	88
3.5.6.2. Yağ tabakasının etkisi.....	88
3.5.6.3. Pas ve oksitlerin tesiri.....	88
3.5.7. Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin etkisi.....	89
3.5.8. Elektrot ve iş parçasının temas durumları.....	89
3.6. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Isıl Denge.....	91
3.7. Yöntemin Uygulanması ve Sınırları.....	92
3.8. Kaynak Noktasının Mukavemeti.....	93
3.9. Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makineleri.....	95
3.9.1. Pres tipi (sabit) kaynak makineleri.....	95
3.9.2. Seyyar makineler (Kaynak penseleri).....	96
3.9.3. Çok nokta kaynak makineleri.....	97

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	98
4.1. Genel.....	98
4.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	98
4.3. Deney Parçalarının Boyutları.....	99
4.4. Deney Parçalarının Kaynağa Hazırlanması.....	100
4.5. Deneyde Kullanılan Kaynak Makinesi.....	100
4.6. Deneyde Kullanılan Elektrotlar.....	101
4.7. Deneylerin Yapılışı.....	102
4.7.1. Elektrik direnç nokta kaynağının yapılışı.....	102
4.7.2. Çekme-makaslama deneyi.....	105
4.7.3. Kaynak bağlantılarının çekirdek çapının ölçülmesi.....	107
4.7.4. Kaynak bağlantılarının sertlik değerlerinin ölçümü.....	108
4.7.5. Kaynak bağlantılarının metalografik incelemesi.....	108

BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ.....	111
5.1. Genel.....	111
5.2. Bağlantıların Çekme-Makaslama Deneyi Sonuçları.....	111
5.2.1. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak akım şiddetinin etkisi.....	116
5.2.2. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak zamanının etkisi.....	120
5.2.3. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarına göre karşılaştırılması.....	123
5.2.4. Bağlantıların çekme-makaslama deneyi sonucu oluşan kopma tipleri.....	125
5.3. Bağlantıların Kaynak Çekirdeği Çapı Ölçüm Sonuçları.....	127
5.3.1. Bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi.....	128
5.4. Bağlantıların Sertlik Değerleri.....	130
5.5. Bağlantıların Mikroyapılarının Optik Mikroskopla İncelenmesi.....	137

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	150
KAYNAKLAR.....	153
ÖZGEÇMİŞ.....	159

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α		: Ferrit
γ		: Ostenit
δ		: Delta ferrit
σ		: Sigma fazı
Q	(Joule)	: Isı
R	(Ω)	: Ohmik direnç
I_k	(kA)	: Kaynak akım şiddeti
t_k	(per.)	: Kaynak süresi
F	(N)	: Elektrot kuvveti
s	(mm)	: Sac kalınlığı
d_e	(mm)	: Elektrot uç çapı
λ	(m/n.mm ²)	: Isı iletkenliği
t_e	(°C)	: Kaynak yapılan malzemenin ergime noktası
S		: Kaynak kabiliyeti faktörü
K		: Malzeme sabiti
MIG		: Metal Inert Gaz
TIG		: Tungsten Inert Gaz
AISI		: Amerikan Demir Çelik Enstitüsü
IF		: Interstitial-Free (Arayer atomu içermeyen)
ITAB		: Isının Tesiri Altında Kalan Bölge
YMK		: Yüzey Merkezli Kübik
HMK		: Hacim Merkezli Kübik
ASME		: Amerikan Makine Mühendisleri Birliği
UNS		: Birleşik Numaralandırma Sistemi
ASTM		: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
AWS		: Amerikan Kaynak Birliği
EN		: Avrupa Birliği Normu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Paslanmaz çeliklerde korozyonun görevi.....	1
Şekil 1.2.	(a) Fe-Cr Alaşımlarında Cr miktarının korozyon direncine etkisi, (b) 1000°C’de 48 saat sonra çeşitli çeliklerin oksidasyon kayıplarının krom miktarına göre değişimi.....	2
Şekil 1.3.	Endüstride elektrik direnç nokta kaynağının robotlarla uygulanması.....	4
Şekil 1.4.	Ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin endüstride çeşitli uygulama alanları.....	5
Şekil 2.1.	Dünya paslanmaz çelik üretimi.....	8
Şekil 2.2.	Paslanmaz çeliklerin genel üretim akışı.....	16
Şekil 2.3.	Bazı paslanmaz çelik türlerinin mikroyapıları.....	17
Şekil 2.4.	Fe-Cr ikili faz denge diyagramı.....	20
Şekil 2.5.	Demirin çeşitli ikili sistemlerinde oluşan ostenit alanı.....	22
Şekil 2.6.	Karbonun γ (ostenit) alanını genişletici etkisi.....	22
Şekil 2.7.	%0.1 C içeren Fe-Cr-C alaşımlarının denge çizgisi.....	23
Şekil 2.8.	Fe-Cr alaşımlarında %C etkisi.....	24
Şekil 2.9.	a) %4 Ni, b) %8 Ni içeren Fe-%18Cr-C alaşımları faz diyagramları.....	25
Şekil 2.10.	Schaeffler ve DeLong diyagramları.....	26
Şekil 2.11.	Katılaşma faz sınırlarını da içeren WRC-1992 diyagramı.....	27
Şekil 2.12.	Paslanmaz çeliklerin nikel ve krom miktarlarına göre sınıflandırılması.....	28
Şekil 2.13.	Paslanmaz çelik alaşım ailesi.....	29
Şekil 2.14.	Ferritik paslanmaz çelikler.....	32
Şekil 2.15.	Ostenitik paslanmaz çelikler.....	39
Şekil 2.16.	Martenzitik paslanmaz çelikler.....	44

Şekil 2.17.	Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler.....	47
Şekil 2.18.	Çökeltme yoluya sertleşebilen paslanmaz çelikler.....	49
Şekil 2.19.	20-100°C'de çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin ısı iletim kabiliyetleri.....	51
Şekil 2.20.	20-800 °C çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin uzama kabiliyeti.....	51
Şekil 2.21.	18 Cr / 8 Ni (0.10 C)'lu paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökeltmesi (x1200).....	60
Şekil 2.22.	Krom karbür çökeltmesi sonucu hassas bölgede oluşan korozyon.....	60
Şekil 3.1.	Direnç nokta kaynak makinesinin temel bileşenleri ve kaynak bölgesi.....	66
Şekil 3.2.	Direnç nokta kaynak makinesinin elektriksel sistemi.....	67
Şekil 3.3.	Direnç nokta kaynağında meydana gelen dirençler.....	68
Şekil 3.4.	Direnç nokta kaynağının boyutları.....	69
Şekil 3.5.	Direnç nokta kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık gradyanı.....	72
Şekil 3.6.	Direnç nokta kaynağının işlem basamakları.....	73
Şekil 3.7.	Nokta kaynak çevrimleri.....	75
Şekil 3.8.	Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliği üzerindeki etkileri.....	78
Şekil 3.9.	Kaynak kabiliyeti diyagramı.....	79
Şekil 3.10.	Elektrot uçlarında mantarlaşıma.....	84
Şekil 3.11.	Standart elektrot uç şekilleri.....	86
Şekil 3.12.	Elektrotların temas durumuna göre oluşan kaynak çekirdekleri; (a) aynı ekseninde olmayan, (b) paralel olmayan elektrotlar.....	90
Şekil 3.13.	Yetersiz bindirme ve kenar mesafesi sonucu oluşan hatalar.....	90
Şekil 3.14.	Farklı metallerin direnç nokta kaynağında ısıl dengeyi sağlamak için uygulanan yöntemler.....	92
Şekil 3.15.	Elektrik direnç nokta kaynağının çeşitli mukavemet deneyleri.....	93
Şekil 3.16.	İmalat sırasında kalite kontrolü amacı ile sıyırma.....	94
Şekil 3.17.	Nokta kaynağında düğmelenme yoluyla hasar.....	94

Şekil 3.18.	Nokta kaynağında makaslama yoluyla hasar.....	94
Şekil 3.19.	Nokta kaynağında sıyırma yoluyla hasar.....	94
Şekil 3.20.	(a) Mekanik elektrik direnç nokta kaynak makinesi, (b) Pnömatik elektrik direnç nokta kaynak makinesi.....	96
Şekil 3.21.	(a) Kaportacı nokta kaynak makinesi, (b) Elde taşınabilir nokta kaynak makinesi	96
Şekil 3.22.	(a) Özel tasarımlı tam otomatik elektrik direnç nokta kaynak makinesi, (b) Elektrik direnç nokta kaynak robotu.....	97
Şekil 4.1.	(a) Sac numune boyutu, (b) Nokta kaynağı yapıldıktan sonraki numune boyutları.....	99
Şekil 4.2.	Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş deney numunesi...	100
Şekil 4.3.	Kaynaklı bağlantıların yapıldığı elektrik direnç nokta kaynak makinesi.....	101
Şekil 4.4.	Elektrik direnç nokta kaynak işleminin gerçekleştirilmesi.....	103
Şekil 4.5.	Ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait kaynaklı bağlantı numuneleri.....	103
Şekil 4.6.	Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftine ait kaynaklı bağlantı numuneleri.....	104
Şekil 4.7.	Ferritik-Ostenitik (430+310) çiftine ait kaynaklı bağlantı numuneleri.....	104
Şekil 4.8.	Çekme test cihazı ve donanımı.....	105
Şekil 4.9.	(a)-(d) Çekme-makaslama deneyinin uygulanması.....	106
Şekil 4.10.	Mikrosertlik ölçümünde kullanılan vickers ölçüm cihazı (Struers).....	108
Şekil 4.11.	Metalografi deneylerinde kullanılan cihazlar; (a) Kesme cihazı, (b) Bakalite alma cihazı, (c) Zımparalama ve parlatma cihazı, (d) Axio Imager A1m optik mikroskop.....	109
Şekil 4.12.	Metalografik incelemeler için kesilen parçaların bakalite alınmadan önceki görüntüsü.....	110
Şekil 5.1.	7.5 kA kaynak akım şiddeti, 25 P kaynak zamanında ferritik-ferritik parçalarda sac arayüzeyinde oluşan fişkırma ve çirkin elektrot izleri.....	113

Şekil 5.2.	7.5 kA kaynak akım şiddeti, 15 P kaynak zamanında ferritik-ostenitik parçalarda çekme-makaslama deneyinde ferritik parçalarda görülen çekirdek dibinden yırtılma.....	115
Şekil 5.3.	Ferritik-ferritik (430+430) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	116
Şekil 5.4.	Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	117
Şekil 5.5.	Ferritik-ostenitik (430+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	118
Şekil 5.6.	Ferritik-ferritik çiftinin (430+430) elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanının bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	120
Şekil 5.7.	Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanının bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	121
Şekil 5.8.	Ferritik-ostenitik (430+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanının bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi.....	122
Şekil 5.9.	5 periyot kaynak süresinde çekme-makaslama dayanımlarına göre bağlantıların karşılaştırılması.....	123
Şekil 5.10.	15 periyot kaynak süresinde çekme-makaslama dayanımlarına göre bağlantıların karşılaştırılması.....	124
Şekil 5.11.	25 periyot kaynak süresinde çekme-makaslama dayanımlarına göre bağlantıların karşılaştırılması.....	124
Şekil 5.12.	Ayrılma tipi kopma görüntüleri.....	125
Şekil 5.13.	Düğme tipi kopma görüntüleri.....	126
Şekil 5.14.	Yırtılma tipi kopma görüntüleri.....	127
Şekil 5.15.	Ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi.....	128

Şekil 5.16.	Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftine ait bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi.....	129
Şekil 5.17.	Ferritik-ostenitik (430+310) çiftine ait bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi.....	129
Şekil 5.18.	Ferritik-ferritik ve ostenitik-ostenitik çiftine ait bağlantılarda enine doğrultuda yapılan mikrosertlik ölçüm noktaları.....	130
Şekil 5.19.	Ferritik-ostenitik çiftine ait bağlantılarda enine doğrultuda yapılan mikrosertlik ölçüm noktaları.....	130
Şekil 5.20.	6.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunelerin sertlik değerleri.....	131
Şekil 5.21.	7.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunelerin sertlik değerleri.....	131
Şekil 5.22.	8.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunelerin sertlik değerleri.....	132
Şekil 5.23.	6.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunelerin sertlik değerleri.....	132
Şekil 5.24.	7.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunelerin sertlik değerleri.....	133
Şekil 5.25.	8.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunelerin sertlik değerleri.....	133
Şekil 5.26.	6.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunelerin sertlik değerleri.....	134
Şekil 5.27.	7.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunelerin sertlik değerleri.....	134
Şekil 5.28.	8.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunelerin sertlik değerleri.....	135
Şekil 5.29.	6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	137
Şekil 5.30.	6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	137

Şekil 5.31.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	138
Şekil 5.32.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	138
Şekil 5.33.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	138
Şekil 5.34.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	139
Şekil 5.35.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	139
Şekil 5.36.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	139
Şekil 5.37.	6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	140
Şekil 5.38.	6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	140
Şekil 5.39.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	140
Şekil 5.40.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	141
Şekil 5.41.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	141

Şekil 5.42.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	141
Şekil 5.43.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	142
Şekil 5.44.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü.....	142
Şekil 5.45.	6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	143
Şekil 5.46.	6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	143
Şekil 5.47.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	143
Şekil 5.48.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	144
Şekil 5.49.	7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	144
Şekil 5.50.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	144
Şekil 5.51.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	145
Şekil 5.52.	8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital).....	145

- Şekil 5.53. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 146
- Şekil 5.54. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 146
- Şekil 5.55. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 146
- Şekil 5.56. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 147
- Şekil 5.57. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 147
- Şekil 5.58. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 147
- Şekil 5.59. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 148
- Şekil 5.60. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling).. 148

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Paslanmaz çelik ürünlerin uygulama alanları.....	31
Tablo 2.2.	Çeşitli ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve kullanım alanları.....	34
Tablo 2.3.	AISI 430 paslanmaz çeliğın; standart numaraları, kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri ile korozyon dayanımı..	37
Tablo 2.4.	AISI 430 paslanmaz çeliğın; imalat özellikleri ve kullanım alanları.....	38
Tablo 2.5.	Çeşitli ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi ve kullanım alanları.....	41
Tablo 2.6.	AISI 310 ostenitik paslanmaz çeliklerin; standart numaraları, kimyasal bileşimi ile fiziksel ve mekanik özellikleri.....	42
Tablo 2.7.	AISI 310 paslanmaz çeliğının; korozyon dayanımı, imalat özellikleri, kullanım alanları.....	43
Tablo 2.8.	Çeşitli martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi ve kullanım alanları.....	45
Tablo 2.9.	Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler.....	50
Tablo 2.10.	Ferritik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.....	52
Tablo 2.11.	Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri..	53
Tablo 2.12.	Martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.....	54
Tablo 2.13.	Dubleks paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.....	55
Tablo 2.14.	Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.....	55
Tablo 3.1.	Kaynak kabiliyetinin değerlendirilmesi.....	71
Tablo 3.2.	Bazı alaşımların fiziksel özellikleri ile kaynak kabiliyeti faktörü ve durumu.....	71
Tablo 3.3.	Değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları.....	73

Tablo 3.4.	Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları.....	85
Tablo 4.1.	Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.....	99
Tablo 4.2.	Kullanılan direnç nokta kaynak makinesinin özellikleri.....	101
Tablo 4.3.	Birleştirme işleminde kullanılan kaynak parametreleri.....	102
Tablo 5.1.	Ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait numunelerin çekme- makaslama deneyi sonuçları.....	112
Tablo 5.2.	Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftine ait numunelerin çekme- makaslama deneyi sonuçları.....	113
Tablo 5.3.	Ferritik-ostenitik (430+310) çiftine ait numunelerin çekme- makaslama deneyi sonuçları.....	114
Tablo 5.4.	Bağlantıların en düşük ve en yüksek sertlik değerlerine göre karşılaştırılması.....	135

ÖZET

Anahtar kelimeler: Paslanmaz çelikler, Direnç nokta kaynağı, Mekanik özellikler

Bu çalışmanın amacı, ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi esnasında değiştirilen, bazı kaynak parametrelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisini araştırmaktır. Çalışmada, 1 mm kalınlıkta, 45x105 mm boyutlarındaki AISI 430 ferritik ve AISI 310 kalite ostenitik paslanmaz çelikler direnç nokta kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak önce kendi aralarında daha sonra birbirleri ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri; 6 kN elektrot kuvveti, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA kaynak akımı ve 5, 15 ve 25 periyot kaynak zamanı olmak üzere 15 farklı parametrede gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin dayanımlarını belirlemek için kaynaklı numunelere çekme-makaslama deneyi uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdeği çapları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinde sertlik ve optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile kaynak çekirdeği çapı ve elektrot dalma derinliği artmış, buna bağlı olarak da çekme-makaslama mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Sertlik deneyleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, kaynak çekirdeğinde oluşan tanelerin ısı girdisinden dolayı irileştiği gözlenmiştir.

Sonuç olarak, ferritik ve ostenitik paslanmaz çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca, değiştirilen kaynak parametrelerinin mekanik özellikleri etkilediği gösterilmiştir.

JOINING OF AUSTENITIC AISI 310-FERRITIC AISI 430 STAINLESS STEELS THROUGH ELECTRIC RESISTANCE SPOT WELDING AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES

SUMMARY

Key Words: Stainless Steel, Resistance Spot Welding, Mechanical Properties

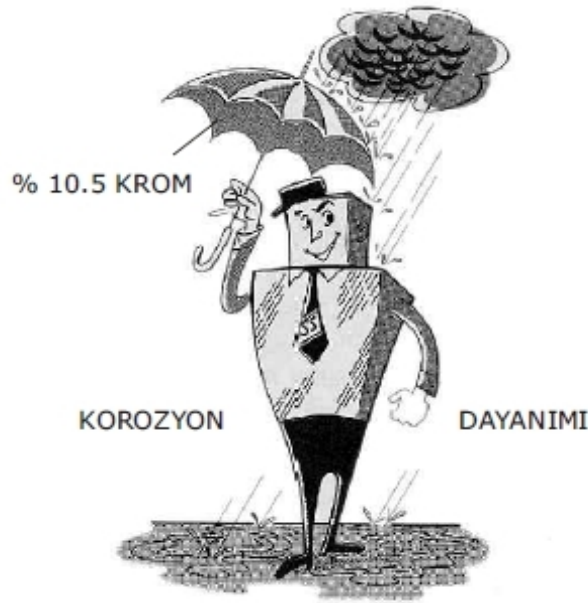
The aim of this study is the investigation of the effect of some welding parameters changed during the joining of ferritic and austenitic stainless steels through electric resistance spot welding method; on the mechanical and microstructural properties. In this study, AISI 430 ferritic and AISI 310 austenitic types of stainless steels, 1 mm in thickness and 45x105 mm in sizes, first among themselves and then with each other were joined by resistance spot welding method by using different parameters. The welding process were carried out at 6 kN electrode force, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA welding currents and 5, 15 and 25 cycle welding times, a total of 15 different parameters. In order to determine the strength of the welded joints, tensile-shearing tests were applied to the welded specimens. The weld nugget diameters of the welded specimens were measured by digital caliper. Also, microhardness and microstructural examinations were done on the welded regions of the welded specimens.

The experimental results showed that increasing of welding current and welding time increased the weld nugget diameter and electrode dept intensity. These, in turn, increased the tensile-shearing of the welded specimens. Hardness measurement results indicated that weld nugget had the highest hardness and the heat effected zone (HAZ) and the base metal followed this. As a result of microstructural examinations, it is observed that the grains existence of welded nugget expanded because of heat input.

As a conclusion, the proper parameters are determined for electric resistance spot welding of ferritic and austenitic stainless steel sheets. Also it was shown that the changed welding parameters affected the mechanical properties.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler; içerisinde en az %10.5 oranında ağırlıkça krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan ince fakat yoğun kromoksit tabakası korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru ilerlemesini engeller [1]. Şekil 1.1'de paslanmaz çeliklerde kromun görevi temsili bir resimle dikkat çekmesi açısından gösterilmiştir.

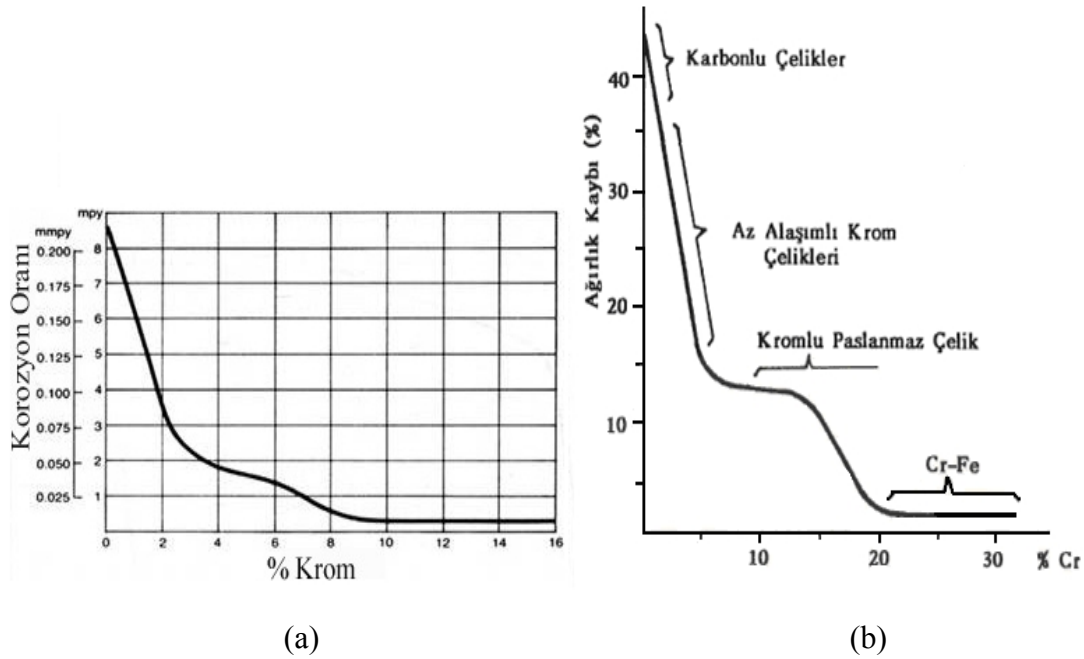


Şekil 1.1. Paslanmaz çeliklerde kromun görevi [1]

Paslanmaz çeliklerin en önemli özelliği paslanmamaları yani oksidasyona ve korozyona karşı dirençleridir. Bu özellik çeliğin içeriğine %10.5'den fazla miktarda krom katılmasıyla elde edilir. Artan krom miktarına bağlı olarak da yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dirençleri artmaktadır. Çeliğin içeriğinde yalnız yüksek miktarlarda nikel bulunması da paslanmayı önler fakat krom ile birlikte bulunması özellikle asidik ortamlarda yüksek bir korozyon direnci sağlar. Nikelin yanı sıra molibden katkısı da çeşitli korozyon türlerine karşı çeliği korur. Elektrokimyasal

gerilim serisine bakıldığında krom, demirden daha az asal bir metaldir. Çeliğin içerisindeki kromun koruyucu etkisi krom ile oksijen arasındaki affiniteden ileri gelmektedir. Krom içeren çelikler bir kromoksit tabakasıyla örtülü olmadıkları sürece korozyon ve özellikle oksidasyona karşı çok hassastırlar. Bu durumda bunlara “aktif” denir; bu karşılık bu tabaka oluşma olanağı bulunduğunda alt tabaka metalini korozif ortamlara karşı korur dolayısı ile de çelikler “pasif” olurlar [2,3].

Demir-krom alaşımlarının oksitleyici ortamlarda korozyon dirençleri, alaşımın bileşimindeki krom artışına paralel olarak arttığı ve krom miktarının azalması ile mevcut alaşımın daha fazla korozyona maruz kaldığı yapılan deneylerle saptanmıştır. Şekil 1.2’de krom miktarının korozyon direncine etkisi ve bunun yanında yüksek sıcaklıklarda çeşitli çeliklerin oksidasyon kayıpları da gösterilmektedir [4].



Şekil 1.2. (a) Fe-Cr Alaşımlarında Cr miktarının korozyon direncine etkisi, (b) 1000°C’de 48 saat sonra çeşitli çeliklerin oksidasyon kayıplarının krom miktarına göre değişimi [4]

Paslanmaz çeliklerin dışındaki diğer malzeme grupları için sınıflandırmalar genellikle kimyasal bileşime bağlı olarak yapılmaktadır, paslanmaz çeliklerde ise baskın olan metalurjik faz(lar)a dayanarak sınıflandırma yapılmaktadır. Paslanmaz çelikler beş ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar sırası ile;

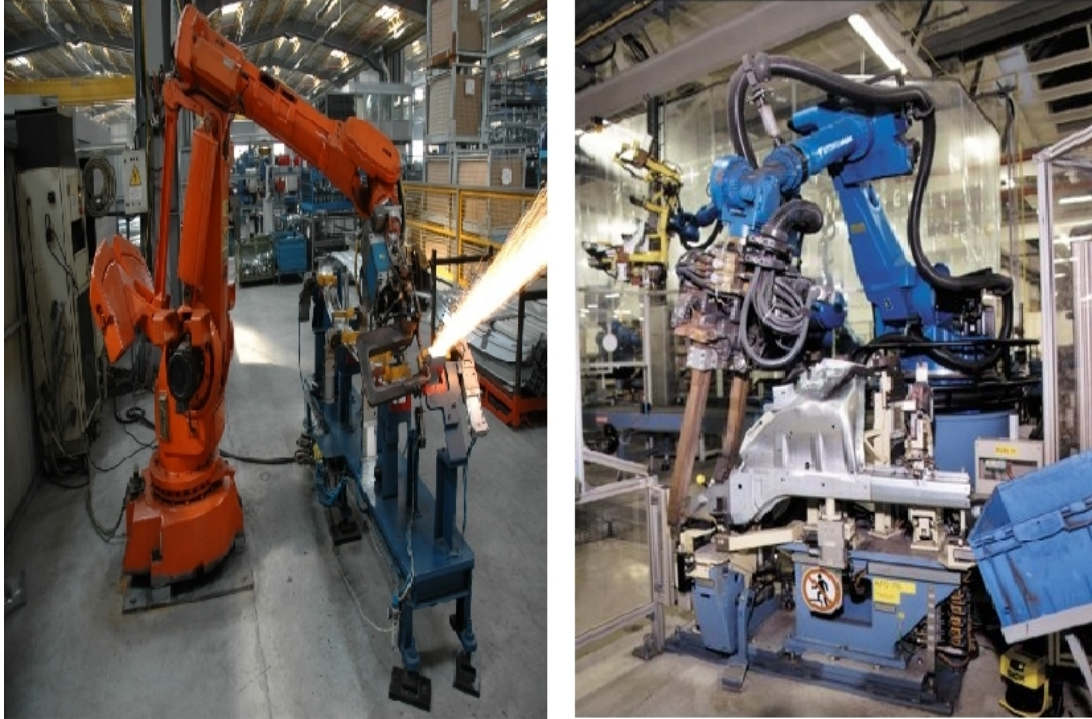
1. Ferritik paslanmaz çelikler
2. Ostenitik paslanmaz çelikler
3. Martenzitik paslanmaz çelikler
4. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler
5. Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler

Bunlardan ilk dört grup alaşımların karakteristik mikroyapılarına dayanmaktadır. Paslanmaz çeliklerde mevcut olabilen fazlar: martenzit, ferrit ve ostenittir. Çift fazlı (dupleks) paslanmaz çelikler yaklaşık olarak %50 ostenit ve %50 ferrit içermektedir. Çökeltme sertleştirmeli kalitelere yapı ise çökeltme sertleştirmesi ve yaşlandırma ısıl işlemi ile oluşturulmasından dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır. Bu türler ise martenzitik, yarı ostenitik ve ostenitik türler olmak üzere kendi içlerinde ayrılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin adlandırılması, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü'nün (AISI) üç rakamlı ve bazen de bu üç rakamı izleyen bir harf kullanılarak, örneğin 304, 309, 310, 316L, 410 ve 430, oluşturduğu sistemle yapılabilmektedir [1,5].

Paslanmaz çelik türlerinde katkı elementlerinin farklı olması veya farklı oranlarda bulunması paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin de farklı olmasına sebep olur. Bu olayda paslanmaz çeliklerin kaynak işlemlerinde önemli rol oynamaktadır. Ferritik paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli element krom iken ostenitik paslanmaz çeliklerde krom, nikel, molibden ve mangandır. Özellikle krom ve nikel mikro yapının ferritik ve ostenitik olmasını sağlayan önemli elementlerdir. Ostenitik ve ferritik çeliklerin tüm paslanmaz çelikler içerisinde kullanım alanları % 95 değerlerine ulaşmaktadır [1,6,7].

1900'lü yıllardan günümüze kadar araştırma konusu olan paslanmaz çeliklerin, bugün 170'den fazla türü çeşitli amaçlar için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı sınırlamalar dışında diğer çelikler için kullanılan tüm kaynak yöntemleri (oksi-gaz hariç) paslanmaz çelikler içinde kullanılır. Paslanmaz çelikler, elektrik ark kaynağı, MIG kaynağı, TIG kaynağı, tozaltı ark kaynağı, plazma ark kaynağı ile birleştirilmelerinin yanı sıra elektron ışın ve lazer ışın gibi modern kaynak yöntemleri ile de günümüzde rahatlıkla kaynak edilebilmektedirler [8].

Paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde farklı kaynak yöntemleri kullanılmasına rağmen özellikle ince sac levhaların birleştirilmesinde elektrik direnç kaynak yöntemleri seri üretime uygunluğu, düşük işçilik giderleri, yüksek kaynak mukavemeti, hızlı bir şekilde imalat yapılabilmesi ve diğer yöntemlere nazaran düzgün bir kaynak görünümü elde edilmesi gibi nedenlerle tercih edilmektedir [9].



Şekil 1.3. Endüstride elektrik direnç nokta kaynağının robotlarla uygulanması [10]

Günümüz endüstrisinde yüksek sıcaklıkta servis koşullarında oksidasyona direnç, uygun mekanik özellikler ve yüksek korozyon dirençleri bakımından kimya, petrokimya, gıda endüstrisinde kullanılan depolama tankları, basınçlı kaplar, ısı değiştiricileri ve paslanmaz boruların üretiminde, gemi inşası, otomotiv, mutfak ev eşyaları endüstrisinde, hatta tıp ve mimari dekorasyon işlerinde çok sık kullanılan paslanmaz çeliklerin (Şekil 1.4) elektrik direnç kaynağı yöntemleri ile birleştirilmesi de büyük önem taşımaktadır. ABD’de 1940 yıllarından bu yana vagon yapımı ve otomotiv endüstrisinde kullanılan paslanmaz çelik ince sacların direnç kaynaklı bağlantıları üzerine çalışmalar yapılmıştır. 1960’lı yıllardan itibaren de Avrupa’da bilhassa da Almanya’da deneme serileri şeklinde vagon yapımı ve otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağı bağlantıları üzerine çalışmalar yapılmaktadır [8].



Şekil 1.4. Ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin endüstride çeşitli uygulama alanları [11]

Ülkemizde ise özellikle 1980’li yıllardan itibaren paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmeleriyle ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Kaluç [8], ferritik-ostenitik paslanmaz çelik çiftinin direnç nokta kaynağında kaynak parametrelerinin çekme-makaslama kuvvetine ve tanelerarası korozyona etkisini araştırmıştır. Vural [12], galvanizli çelik saçların karbonlu ve ferritik paslanmaz çelikler ile nokta kaynağında kaynak parametrelerinin kaynak davranışına ve bağlantının dayanımına etkisini incelemiştir. Gülbahar [13], %17 kromlu ferritik paslanmaz çeliklerin nokta kaynağında kaynak parametrelerinin tanelerarası korozyon ve çekme makaslama dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ceyhun [4], ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin karbonlu çelik ile nokta kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına ve tanelerarası

koroziona etkisini incelemiştir. Aslanlar, Oğur, Öz Saraç, İlhan [14], otomobil saclarının elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinde, kaynak süresinin mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Kocabekir, Kaçar, Gündüz, Hayat [15], AISI 316L ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı girdisi, kaynak atmosferi ve kaynak soğuma şartlarının elektrik direnç nokta kaynak kabiliyetine etkileri üzerine çalışmışlardır. Özyürek [16], kaynak akımı ve kaynak atmosferinin, AISI 304L ostenitik paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynak kabiliyetine etkisi üzerine çalışmıştır. Hasanbaşoğlu, Kaçar [17], AISI 316L ostenitik paslanmaz çelikler ile otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılan IF 7114 çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi sonucu mekanik özellikleri, sertlik dağılımı ve mikroyapısını incelemişlerdir.

Günümüzde endüstride bu kadar geniş uygulama alanı olan ferritik paslanmaz çelikler parlak görünümlü olmaları, havanın oksidasyonuna ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı iyi direnç göstermelerinin yanı sıra sadece krom içermeleri bakımından ostenitik türlere nazaran daha ucuzdurlar. Ostenitik paslanmaz çelikler ise kromun yanı sıra nikel ve molibden gibi diğer alaşım elementlerinin ilavesi ile asidik korozyona ve yüksek sıcaklıkta sürünmeye karşı mukavemetli olduklarından çok yaygın kullanılırlar, ancak daha pahalı çeliklerdir. Bu tür paslanmaz çelikler endüstride karşımıza bir türün bir yerde kullanılması veya iki türün birbirine kaynakla birleştirilmesi şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Aslında ferritik paslanmaz çeliklerin dekoratif görünümleri ve ucuz olmaları yapının bir kısmının ferritik, bir kısmının da ostenitik paslanmaz çelik olabileceğini gündeme getirmiştir. Bugün böyle bağlantılara uzun ömürlü taşıtlarda karoser ve diğer parçalarda rastlamak mümkündür [8].

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen ferritik ve ostenitik paslanmaz çelik bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi imalatı yapılan makine, ekipman ya da konstrüksiyonun daha güvenli kullanılması açısından önemlidir. Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesindeki sertlik dağılımı, bağlantının çekme-makaslama dayanımı, kaynak sonrası oluşan çekirdek çapı ve elektrot dalma derinliği gibi özelliklerin bilinmesi önemli olup, kaynak bölgesinin mikroyapısı bu özelliklerin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bundan

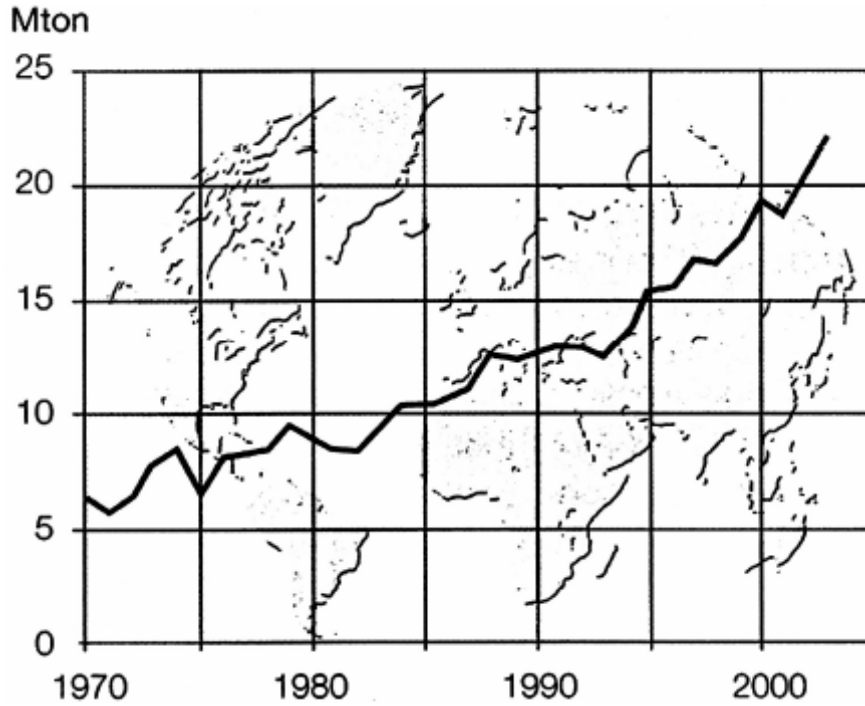
dolayı bu çalışmada, endüstriyel açıdan oldukça önemli ve kullanımı yaygın olan AISI 430 temel ferritik kalite ile yüksek sıcaklık malzemesi olarak bilinen AISI 310 ostenitik paslanmaz çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağıyla kaynaklı bağlantıları yapılmış, birleştirmelerin mekanik özellikleri çeşitli deney koşullarında ve proses parametreleri değiştirilerek araştırılmıştır. Aynı zamanda birleştirilen parçaların mikroyapı karakterizasyonlarına da bakılarak en ideal kaynak parametreleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Böylece elde edilen sonuçların bilimsel ve özellikle ülkemizde otomotiv, kimya, gıda, ulaştırma, bina ve inşaat sanayi gibi endüstriyel çevrelere aktararak üniversite-sanayi işbirliğine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Tez, altı bölüm halinde sunulmaktadır. Bölüm 1, giriş bölümünü oluşturmaktadır. Bölüm 2’de paslanmaz çelikler hakkında genel bilgiler ile çeşitleri, kullanım yerleri, çeşitli mekanik ve fiziksel özellikleri ile kaynak kabiliyeti ve paslanmaz çeliklerin kaynağı hakkında bilgiler bulunmaktadır. Bölüm 3’de ise bu çalışmada paslanmaz çelik sacların birleştirilmesinde kullanılan direnç nokta kaynak yöntemi detaylı bir biçimde tanıtılmıştır. Bölüm 4’de deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, kaynak makinesi, kaynak parametreleri, kaynaklı bağlantılara uygulanan mekanik testler ve testlerin uygulanış parametreleri tanıtılmıştır. Bölüm 5’de kaynaklı numunelere uygulanan mekanik testlerden elde edilen veriler, kolay değerlendirilebilmesi için grafik olarak çizilmiş ve elde edilen grafikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, optik mikroskop çalışmaları sonucu elde edilen görüntüler yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, daha önceden yapılmış benzer çalışmalarla sebep-sonuç ilişkisi ile kıyaslanmıştır. Son olarak Bölüm 6’da ise yapılan deneysel çalışmalar sonunda elde edilen genel sonuçlar ve gelecekte aynı alanda çalışacaklara hitap eden bazı öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1. Paslanmaz Çelikler ve Üstünlükleri

Amerika’da, 2000 yılında korozyon kayıplarının ülke endüstrisi ve kamu kuruluşlarına 276 milyar dolar/ yıl gibi yüklü bir değere mal olduğu belirtilmektedir. Korozyon başlangıcını geciktirmek veya önlemek amacıyla gereken pahalı ölçümler ve ek gereksinimler, ömür maliyet ilişkisi ve çevresel etkenler de dikkate alındığında, paslanmaz çelikler günümüzde birçok uygulamada kullanılan karbonlu çeliklere karşı tek geçerli seçenek olarak karşımıza çıkmaktadırlar [18,19].



Şekil 2.1. Dünya paslanmaz çelik üretimi [19]

Dünya çapında üretilen çeliklerin ağırlıkça yaklaşık %2’si paslanmaz çelik ürünleri olmasına karşın, bunlar da yıllık %5-8’lik büyüme göstermektedirler (Şekil 2.1).

Çevresel konular, kolaylıkla geri dönüşebilen malzemelere gereksinim duyulması ve ömür maliyet ilişkisi de göz önüne alındığında, paslanmaz çeliklerin kullanım alanlarının artması olanağının arttığı görülmektedir [19,20].

Paslanmaz çelikler, öncelikle korozyona karşı direnç amacıyla geliştirilen ve Fe-Cr, Fe-Cr-C ve Fe-Cr-Ni sistemine dayanan yüksek alaşımlı, önemli ve geniş bir mühendislik malzemesi grubudur. Bu çelik ailesi, yaygın olarak kimya ve güç mühendisliği, gıda endüstrisi, sağlık uygulamaları, petrol ve petrokimya alanlarında, tekstil alanında, taşımacılıkta, yüksek veya sıfırlı sıcaklık uygulamalarında ve mimari uygulamalar gibi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır [18,20,22]. Paslanmaz terimi kesici takımların geliştirildiği ilk dönemlerde ortaya çıkan genel bir terim iken günümüzde korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılan geniş bir çelik grubunu kapsamaktadır [19].

Krom, ferrit yapıcıdır ve yeterli miktarda kromun demir içinde çözünmesi ile alaşım yaptığı metallere yüzeyinde yüzeye bağdaşık, yapışkan ve yeniden oluşabilen ve korozyona direnç sağlayan pasif oksit tabakası oluşturur. Paslanmazlık özeliği, krom miktarının %10.5'i aşması durumunda alaşımın yüzeyinde korozyon ve oksidasyonu önleyen ince, görünmez, sürekli pasif bir oksit filminin oluşması ile sağlanır. Ancak, alaşımların bu oranda krom içermesi HCl veya H₂SO₄ gibi asitlerin bulunduğu ortamlarda korozyona yeterince dirençli olmasını sağlayamaz, bu nedenle, mikroyapıyı modifiye etmek, dayanım ve sıfırlı sıcaklıklarda tokluk gibi özellikleri iyileştirmek, diğer fazları kararlı duruma getirmek için daha yüksek krom miktarlarıyla birlikte, molibden, nikel ve azot içeren alaşımlar kullanılmalıdır [18,21,22].

1 ile 5 nanometre düzeyinde, oldukça ince ve görünmez olmasına karşın bu koruyucu film yüzeye sıkıca yapışır ve yüzeye yeterli oksijen sağlayan koşullar altında kimyasal olarak kararlıdır. Oksit filmi, çelik yüzeyinde hızlı korozyon ile oluşur ancak bir kez oluşunca da metal ve korozif ortam arasında metali daha ileri oksidasyondan koruyacak biçimde bariyer görevi görerek çeliğin pasif durumda olmasını sağlar. Bu koruyucu oksit filmi ortamda yeterli oksijen olması durumunda kendiliğinden oluşur, dolayısıyla çelik çizildiğinde veya kesildiğinde, havadan gelen

oksijen kromla birleşerek koruyucu tabakayı yeniden oluşturur. Dolayısı ile, paslanmaz çelikler tahrip edilemez olarak değerlendirilmemelidir. Pasiflik belli koşullar altında kırılabilir ve korozyon oluşabilir. Paslanmaz çeliğin ne derece pasif film oluşturabileceği de içerdiği krom miktarına bağlıdır [19,20,21]. Birçok paslanmaz çelik türü belli koşullar altında paslanabilir, zira Cr'un bir kısmı karbür ya da diğer bileşiklere bağlanır ve sürekli koruyucu oksidi oluşturan Cr içeriği azalır [22].

Pasif oksit tabakanın giderilmesine yol açan korozif ortam paslanmaz çeliklerin korozyona uğramasına neden olabilir. Korozyon çukurcuk korozyonu, aralık ve tanelerarası korozyon şeklinde olabilir. Bu korozyon türleri, korozif ortam, malzemenin metalurjik koşulları ve mevcut yerel gerilmelerden etkilenir. Bu nedenle özel bir uygulama için uygun kalitenin seçilmesi gerekmektedir. Mühendis ve tasarımcılar işletme koşulları ve metalurjik davranış üzerinde üretimin etkisini dikkate almalıdır [19,22].

Paslanmaz çeliklerin seçimi korozyon direnci, üretim koşulları, spesifik sıcaklık aralıklarındaki mekanik özellikleri ve maliyetlerine dayanarak yapılmalıdır. Ancak genellikle korozyon direnci ve mekanik özellikler en önemli seçim kriterlerini oluşturmaktadır. Korozyon direnci, paslanmaz çelikler için en önemli karakteristiği olmasına karşın genelde özel bir uygulama için belirlenmesi de en zor özelliğidir. Saf kimyasal çözeltilere karşı genel korozyon direncinin belirlenmesi daha kolaydır ancak gerçek ortam koşulları çoğunlukla daha karmaşıktır. Özel bir uygulama için uygun paslanmaz çelik türünün seçiminde göz önüne alınması gereken unsurlar: korozyon direnci, yüksek sıcaklık ve işletme sıcaklıklarında dayanım ve sünenlik, kaynak kabiliyeti, işletme koşullarında özelliklerin kararlı olması, tokluk, manyetik özellikler, ısı iletkenlik ve elektrik direnci gibi fiziksel özellikler, abrazyon direnci ve rijitliktir [18].

Paslanmaz çelikler ayrıca, yüksek sıcaklıkta da oksidasyon direncine sahip olan ve bu nedenle de ısı dirençli alaşımlar olarak da adlandırılmaktadırlar. Yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı direnç, öncelikle krom miktarının bir fonksiyonudur ve örneğin %25-30 krom içeren bazı yüksek kromlu alaşımlar 1000°C'ye kadar olan

sıcaklıklarda kullanılabilir. Bir diğer ısıya direnç biçimi de karbürizasyona dirençtir ve bunun için yaklaşık %16 kromlu ve %35 nikelli paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Paslanmaz çelik ailesi, türüne göre değişen alaşım elementleri ile oldukça geniş kimyasal bileşim aralığına sahiptir [22].

Normal alaşımsız ve az alaşımlı çelikler korozyon etkilerine karşı dayanıklı olmadıklarından, bu tür uygulamalar için genellikle paslanmaz çeliklerin kullanılması gerekir. Paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımları yanında, değişik mekanik özelliklere sahip türlerinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirliği, şekil verme kolaylığı, estetik görünümleri gibi özelliklere sahiptirler. Kullanımları giderek yaygınlaşan paslanmaz çeliklerin tüketimi, artık toplumlarda refah seviyesinin bir göstergesi sayılmaktadır. Dünyada yılda 20 milyon ton civarında paslanmaz çelik tüketilmektedir. Bunların büyük çoğunluğu yassı mamul biçimindedir. Daha az miktarlarda ise; çubuk, tel, boru, dövme parça ve döküm parça olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikler diğer çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır, ancak bakımlarının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanabilmeleri ve çevre dostu bir malzeme olmaları çok büyük üstünlükler sağlar. Dolayısıyla parçanın tüm ömrü dikkate alınarak yapılacak fiyat analizlerinde, tasarımlarda paslanmaz çelik kullanımının daha ekonomik olduğu görülür [23].

Genel itibarıyla bütün paslanmaz çeliklerin üstünlüklerini şu şekilde sıralayabiliriz;

1. Korozyon dayanımı

Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltileri ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Bu çelikler ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir. Paslanmaz çeliğin korozyona ve lekelenmeye karşı olan direnci, onu ticari olarak geniş bir uygulama alanında, düşük bakım maliyeti, diğerleriyle karşılaştırıldığında daha ucuz olması ve göz alıcı bir görünüme sahip olması nedeniyle ideal ve vazgeçilmez bir malzeme kılar. Bu nedenle bugün endüstride korozyon denince ilk akla paslanmaz çelikler gelmektedir.

2. Yüksek ve düşük sıcaklıklar

Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi tufallanma ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar.

3. İmalat kolaylığı

Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilirler.

4. Mekanik dayanım

Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısıl işlemler ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür.

5. Görünüm

Paslanmaz çelikler çok farklı yüzey kalitelerinde temin edilebilirler. Bu yüzeylerin görünümü ve kalitesi, bakımı kolay olduğundan kolaylıkla uzun süreler korunabilir.

6. Hijyenik özellik

Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar.

7. Uzun ömür

Paslanmaz çelikler dayanıklı ve bakımı kolay malzemeler olduklarından, üretilen parçanın tüm kullanım ömrü dikkate alındığında ekonomik malzemelerdir [23].

2.2. Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi

Paslanmaz çeliklerin geliştirilme tarihi örtülü elektrotun bulunduğu geçen yüzyılın ilk yıllarına kadar uzanmaktadır. Kromun çeliklere eklenmesi ve korozyon direnci üzerine iyi etkileri, 1821'de kesici takım uygulamaları için önerilen %1.5 Cr'lu alaşımı geliştiren Fransız Berthier'e dayandırılmaktadır. Bu çelikler üzerine yapılan ilk deneyler, artan Cr miktarının çeliğin biçimlendirilmesini kötü yönde etkilediğini göstermiş ve bu çelikler üzerindeki ilginin azalmasına neden olmuştur [19,22].

Korozyona dirençli alaşımlara olan ilgi 1900 ve 1915 yılları arasında artmıştır. Almanya'da 1897 yılında Goldschmidt tarafından düşük C'lu Cr alaşımlarının üretilmesi üzerine geliştirdiği teknik bu yenilenen ilgiyi artırmıştır. Guillet, Portevin ve Giesen sırasıyla 1904 ve 1909 yıllarında %13 Cr'lu martenzitik ve %17 Cr'lu ferritik çelikleri açıklayan makaleler yayımlamışlardır. 1909'da Guillet, ostenitik paslanmaz çeliklerin işareti olan Cr-Ni çelikleri hakkında bir makale yayımlamıştır. 1899'da Heroult'un elektrik ergitme fırınlarını geliştirmesi de paslanmaz çeliklerin yaygın biçimde üretimini olanaklı duruma getirmiştir [22].

Laboratuvar çalışmaları endüstriyel uygulamalar için korozyona dirençli çelikler üzerindeki ilginin artmasını sağlamıştır. Bu alaşımların ticarileştirilmesi için 1910 ve 1915 arasında oldukça çaba gösterilmiştir. Rapor edilen ilk ticari paslanmaz çelik alaşımı İngiltere'de, Thomas Firth and Sons'da metalurjist olan Harry Brearly'ye dayandırılmaktadır. Brearly, fakir bir aileden gelmekteydi ve 12 yaşında Firth şirketinde, kimya laboratuvarında şişeleri yıkamaktaydı. 1907'de 36 yaşındayken araştırma laboratuvarlarının şefi oldu. %5 Cr'lu çeliklerde korozyona bağlı olarak oluşan hasarların belirlenmesi için Mayıs 1912'de Enfield'deki Royal Small Arms fabrikasını ziyaret etti. Hasarların önlenmesi için daha yüksek krom miktarlarının olası bir çözüm olabileceği sonucuna vardı. %10 ve %15 Cr'lu ve %0.30 C içeren iki döküm çelik üretti. Bu iki çelik te yüksek karbon içermesinden dolayı başarısız oldu. %12.86 Cr, %0.24 C, %0.20 Si, ve %0.44 Mn'lı daha kabul edilebilir bir çelik olarak ilk paslanmaz çelik Harry Brearly tarafından 13 Ağustos 1913'de Sheffield'de üretildi. Bu çelik 12 deney amaçlı tüfek namlusunda kullanılmakla birlikte yeni namlular beklenen gelişmeyi göstermedi. Bu malzemenin bir kısmı kesici aletlerde kullanılmaya başladı ve böylece paslanmaz çelik çağı başlamış oldu [19,22].

İlk paslanmaz çelik ingotu 3 Mart 1915'de Pittsburgh'da Firth Sterling Ltd'de döküldü. Bu da <math><0.7\%</math> C ve %9-16 Cr bileşim aralığında çelikleri içeren ve Amerika'da kesici tür çelikler için Brearly'ye verilen 1.197.256 no.lu patentin alınmasını sağladı [22]. Brearly'nin 1915'deki patentine bağlı olarak genelde paslanmaz çeliklerin mucidi olarak bilinmesine karşın, Fransa ve Almanya'daki ön çalışmalar olmadan bu icadın da olamayacağı açıktır. Ayrıca, Amerikalı Dansitzen ve Becket'in ferritik ve Alman Maurer ve Strauss'un ostenitik paslanmaz çelik

alaşımları geliştirdiği belirtilmelidir. I. Dünya Savası'ndan hemen önceki bu icatlardan martenzitik, ferritik ve ostenitik paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Amerika'da paslanmaz çeliklerin üretimi ve kullanımı 1920'lerde ilk üreticiler olan Allegheny, Armco, Carpenter, Crucible, Firth-Sterling, Jessop, Ludlum, Republic, Rustless ve U.S. Steel ile başlamıştır [18,19,22].

Hammadde eldesi, özellikle 1950'lerde Afrika ve Asya'daki sivil savaşlar zamanında Ni'in elde edilmesinin zor olduğu dönemlerde nikel ve kromun zor bulunması, Doğu Bloku ülkelerini etkilemiş ve bu da Mn ve N'un özellikle Ni'in yerini aldığı 200 serisi alaşımların geliştirilmesine yol açmıştır. Günümüzde de bu çelikler artan miktarlarda kullanılmaktadır [18].

İlk dupleks tür paslanmaz çelik, İsviçre'de kağıt endüstrisindeki uygulamalar için 1930'larda geliştirilmiştir. Ancak, çökeltme sertleştirmeli türler 2. Dünya Savası'ndan sonra ticari olarak üretilmiştir [19].

Fe-Cr ve Fe-Cr-Ni sistemlerinin metalurjisi 1940 ve 1950'lerde anlaşılmıştır ve standartlaştırılması da bu yıllarda olmuştur ve o günden bugüne kadar çok az değişmiştir. 1970'li yıllardan itibaren N eklenmesi ve C'nun azaltılması dupleks kalitelerin kaynak edilebilir malzemeler olacak biçimde üretilebilmesini sağlamıştır. "Süper" paslanmaz çelikler de geçen yirmi yılda geliştirilmiştir. Oldukça düşük arayer seviyeleri ve yüksek Cr ve Mo içeren süper ferritik kaliteler standart ferritik türlere göre daha iyi korozyon direnci göstermektedir. Bu çelikler bazı uygulama alanları bulmasına karşın kullanımları sınırlı kalmıştır. Süpermartenzitik paslanmaz çelikler ise paslanmaz çelik ailesine en yeni katılan çelik kalitelerden biridir. Bu çelikler oldukça düşük C ($< 0.01\%$) içermeleri sayesinde yüksek mukavemet ve yeterli korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti özelliklerinin bileşimini uygun fiyatlarla sunabilmektedir [19].

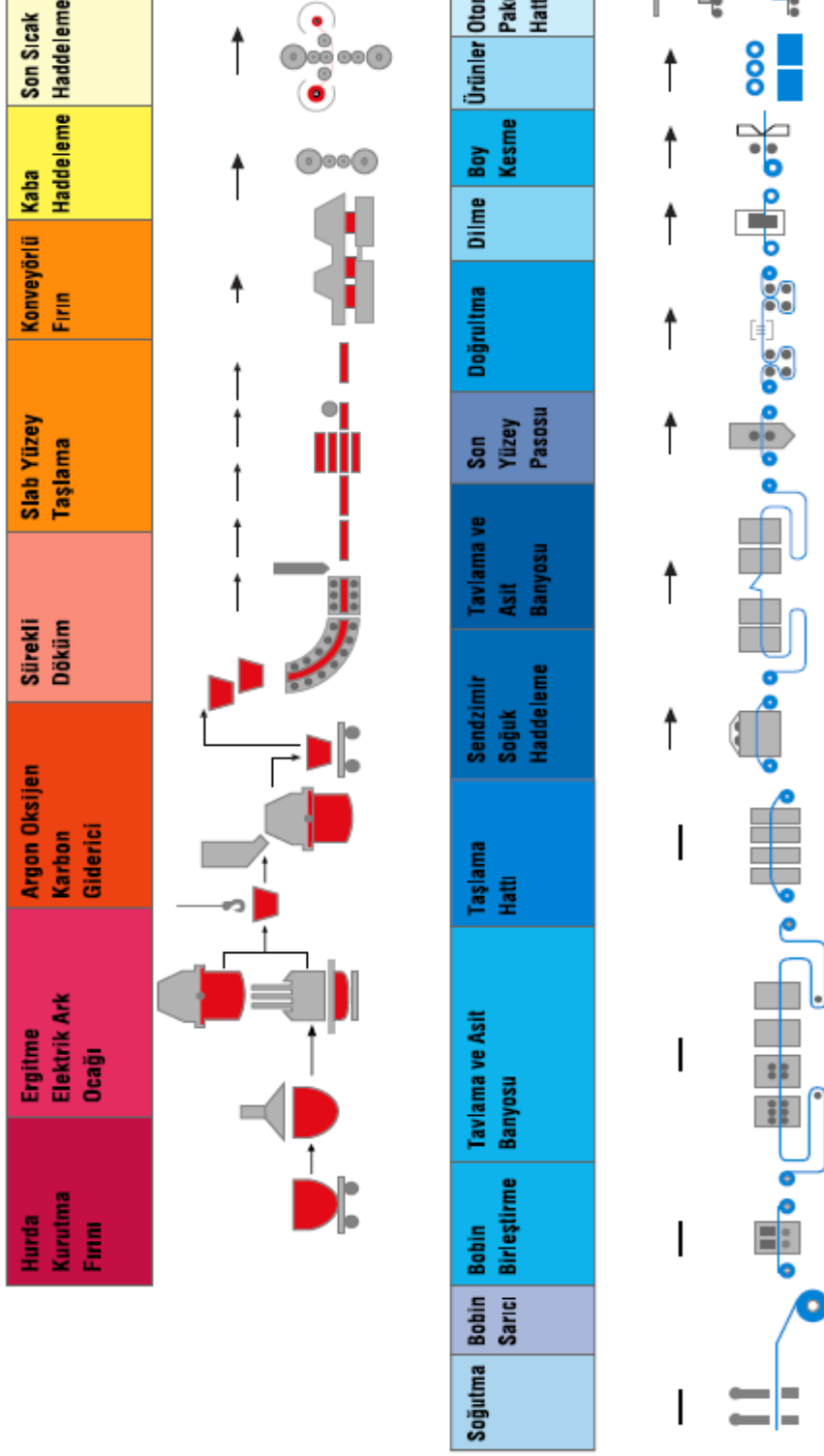
Kaynak teknolojisi paslanmaz çelikler için önemli bir üretim yöntemidir ve geçen 75 yıl boyunca bu tür malzemelerin kaynağının yapılması ve gerektiği durumlarda önlemlerin alınabilmesi gibi bilgileri içeren birçok spesifikasyon, makale, el kitabı vb. yayınlar yayımlanmıştır. Paslanmaz çelikler genel olarak kaynak edilebilir

çelikler olarak göz önüne alınmaktadır, ancak hatasız kaynak edilebilmeleri ve işletme koşullarında yeterli özellikleri sağlamaları bu tür çeliklerin kaynağında izlenmesi gereken birçok kural bulunmaktadır. Çoğu durumda, kaynak mikroyapısının yeterince kontrol edilememesi ya da malzeme veya mikroyapı için uygun olmayan kaynak yöntemlerinin kullanımı gibi bazı problemlerle karşılaşmaktadır [22].

Paslanmaz çelikler kaynak edilebilir olmasına karşın çoğu türü özel prosedürler kullanılarak kaynak edilebilir. Yeni tür çeliklerin geliştirilmesi kaçınılmaz olarak üretim ve birleştirmede yeni problemleri de beraberinde getirmektedir. Verimin artırılabilmesi için esas metal özelliklerinin iyileştirilmesi ve kaynaklı üretime olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Çoğu durumda kaynak, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve kaynak metali mikroyapısının esas metale göre önemli miktarda değişmesine neden olmaktadır. Bu da istenen faz dengesinde değişikliklerin, metallerearası elementlerin, tane büyümesinin, alaşım veya katıksı elementlerinin ayrışması veya diğer bazı reaksiyonların oluşmasına yol açmaktadır [19,22].

2.3. Paslanmaz Çeliklerin Üretimi

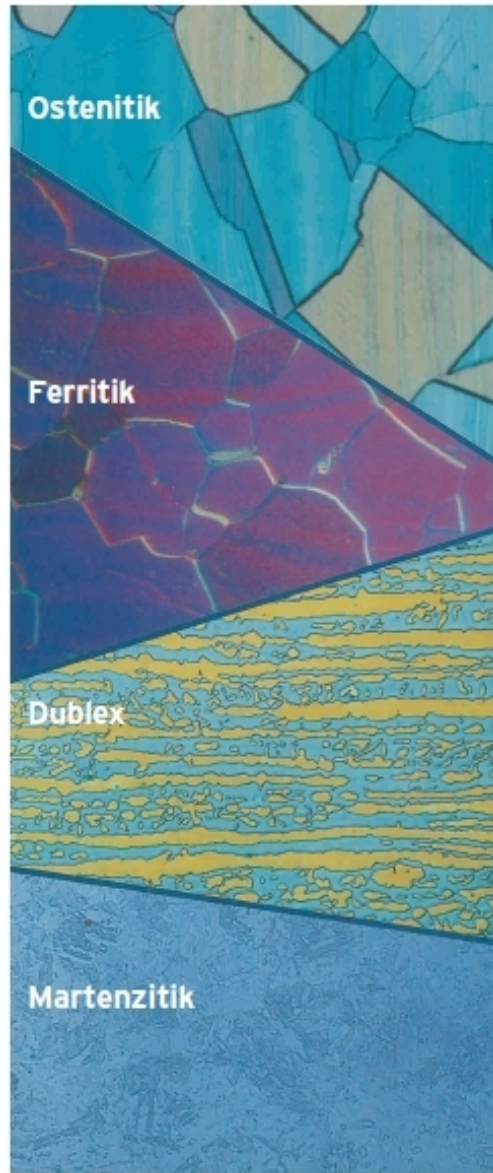
Paslanmaz çelik üretimi büyük yatırım ve uzmanlık gerektiren bir teknolojidir. Paslanmaz çelikler birçok boyut ve biçimde üretilmektedir ve bu alaşımlar ticari olarak neredeyse sınırsız biçimde bulunabilmektedir. Paslanmaz çeliklerin ergitme ve arıtma işlemleri argon oksijen dekarburizasyon (AOD) ve vakum oksijen dekarburizasyon (VOD) teknikleri ile yapılır. Bu yöntemler düşük C miktarları ve kontrol edilebilir N seviyelerinde çok daha temiz çelikler üretilmesini sağlamıştır. 1970'lerde, paslanmaz çelik üretiminde sürekli dökümün yapılabilmesi de paslanmaz çelik üretiminin daha düşük maliyet ve daha yüksek kalitede olabilmesine katkı sağlamıştır. Paslanmaz çeliklerin üretimi özellikle ileri teknoloji gereksinimi duyulan bir prostestir ki dünya genelinde sınırlı ülkelerde gerçekleştirilebilmesinin asıl nedeni budur. Daha farklı üretim teknikleri de mevcut olmasına rağmen burada sadece AOD/VOD yöntemi Şekil 2.2'de şematik olarak anlatılmıştır. [18,22].



Şekil 2.2. Paslanmaz çeliklerin genel üretim akışı [23]

2.4. Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapısına Etki Eden Elementler

Paslanmaz çelik malzemelerin içerisindeki alaşım elementleri ferrit ve ostenit oluşturucu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ayrıca diğer bazı gereksinimleri karşılamak üzere isteyerek katılan veya kaçınılmaz olarak bulunan gayri safiyet elementleri yani nötr elementler de bulunmaktadır. Şekil 2.3’de bazı paslanmaz çelik türlerinin mikroyapıları gösterilmiş olup elementlerin mikroyapıya olan etkileri aşağıda detaylı olarak verilmiştir [1].



Şekil 2.3. Bazı paslanmaz çelik türlerinin mikroyapıları [23]

2.4.1. Ferrit oluşturan elementler

Krom: Ferrit oluşumunda etkili olup malzemenin korozyon ve oksidasyon direncini arttırmaktadır.

Molibden: Ferrit oluşumuna katkıda bulunmakta ve malzemenin yüksek sıcaklıklardaki direncini artırmakla beraber indirgeyici ortamlarda malzemenin korozyona karşı direncini de arttırmaktadır.

Niyobyum ve titanyum: Malzeme içerisinde taneler arası korozyon hassasiyetinin azaltılması amacıyla malzeme içerisine ilave edilmekte olup, malzeme içerisindeki karbonla birleşerek krom karbür çökelmesini önler. Çünkü bu elementler özellikle niyobyum kuvvetli karbür yapıcıdır. Ayrıca, bu elementlerin tane küçültücü etkisi olup, ferrit oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Bu elementler aynı zamanda martenzitik paslanmaz elik türlerinde karbonu bağlayarak çeliğin sertleşme eğilimini azaltmaktadır.

Fosfor, kükürt ve selenyum: Paslanmaz eliklerin işlenebilme kabiliyetini arttırmakta olup, kaynak esnasında sıcak çatlak oluşumuna neden olduğundan paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetini sınırlamaktadır. Bu elementler paslanmaz çeliklerin kaynağında nüfuziyetin artmasına katkı sağlamaktadır [1].

2.4.2. Ostenit oluşturan elementler

Karbon: Ostenit oluşumuna kuvvetli etkide bulunur. Krom ile birlikte tanelerarası korozyonda başrol oynayan karbürlerin oluşumuna neden olur.

Nikel: Ostenit oluşumuna etkide bulunur. Yüksek sıcaklıktaki direnci, korozyona karşı dayanımı ve sünekliği artırır.

Azot: Ostenit oluşumuna çok kuvvetli etkide bulunur, en az nikel elementi kadar etkilidir.

Bakır: Korozyon dayanımlarını arttırmak amacıyla paslanmaz çelik malzemelere katılmakta olup gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti azaltmakta ve çökeltme sertleşmesini sağlamaktadır [1].

2.4.3. Nötr elementler

Mangan: Oda sıcaklığında ve oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ostenitin kararlı olmasını sağlar. Ancak yüksek sıcaklıklarda ferrit ve manganer sülfat oluşturur.

Silisyum: Paslanmaz çelik malzemelerin tufallaşmasını önlemektedir. Mikroyapı içerisinde %1 oranından daha fazla olması durumunda ferrit ve sigma fazının oluşumunda etkili olmakta ve paslanmaz çelik malzemede oksit giderme amacıyla az miktarlarda eklenmektedir. Kaynak esnasında banyonun akışkanlığını arttırmakta ve kaynak metalinin ana metali daha iyi ıslatmasını sağlamaktadır [1].

2.5. Paslanmaz Çeliklerin Faz Diyagramları

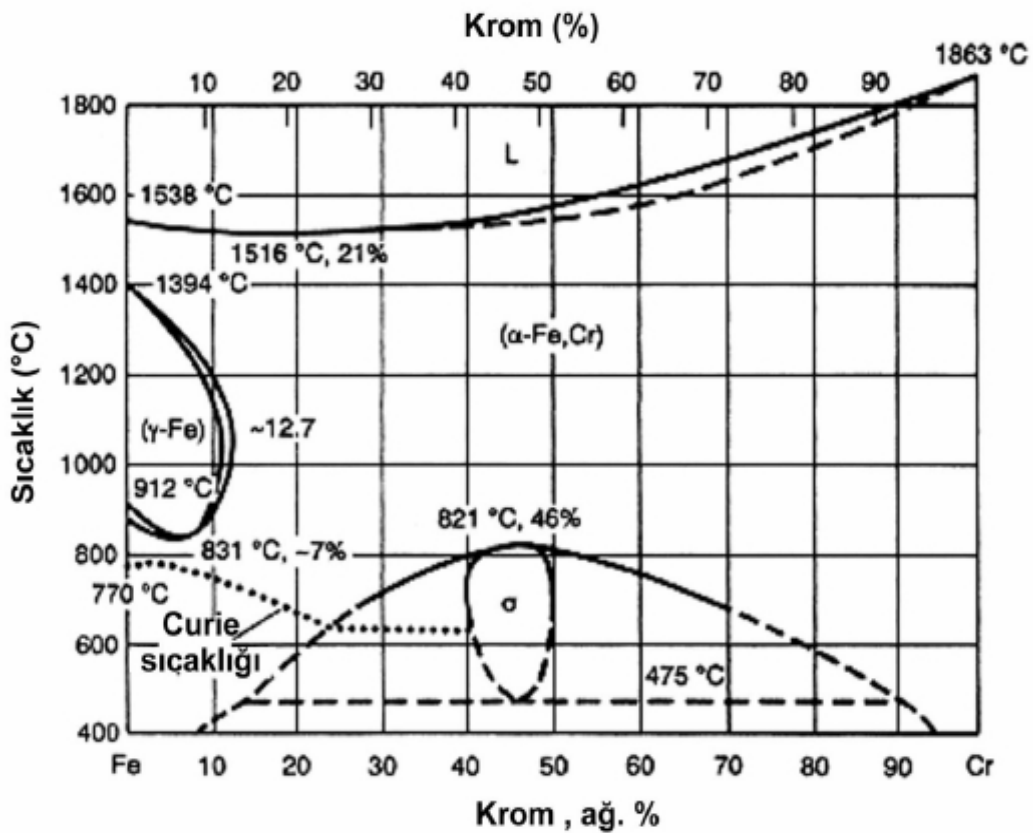
Paslanmaz çelikler ve kaynak edildiklerinde ısının tesiri altındaki bölgelerindeki özelliklerin anlaşılabilmesi için faz diyagramları bilinmelidir. Ancak faz diyagramları, örneğin çok düşük ısıtma ve soğutma hızlarında faz dönüşümlerini ve faz kararlılığını gösteren, faz denge diyagramlarıdır. Kaynak sırasında yüksek ısıtma ve soğutma hızları ile karşılaşılır ve bu durumda da faz diyagramlarında sapma görülebilir. Bu nedenle başka kaynakların kullanılması da önerilebilir [22,24].

Yaklaşık faz diyagramları genellikle kaynak sonrası ısıl işleme görülebilmektedir. Örneğin, katılaşma türü, faz dönüşümleri ve çökeltiler doğrudan faz diyagramları ile ilişkilendirilebilir. Çeliğin kinetik davranışı da göz önüne alınmalıdır. Bu diyagramlar, yalnızca kaynak dikişlerinde gelişen gerçek mikroyapılara yaklaşım sağlayabilmektedir, zira paslanmaz çelik esas metal ve ek kaynak metalleri standart faz diyagramlarına dayanan denge diyagramları ile bağdaştırılamayan ve 10 alaşım elementine kadar element içermektedirler. Paslanmaz çeliklerdeki mikroyapı, dönüşüm ve çökelmelerle ilgili bilgileri edinebilmek için birçok tür bilgi birleştirilmelidir [22, 24].

Bu kısımda, birçok tür paslanmaz çeliğe uygulanan ve mikroyapı öngörülmesinde kullanılabilen faz denge diyagramları hakkında bilgi sağlamak için ikili Fe-Cr, üçlü Fe-Cr-C ve Fe-Cr-Ni sistemleri ile Schaeffler-Delong ve WRC-1992 diyagramları kısaca açıklanmaktadır.

2.5.1. Fe-Cr sistemi

Paslanmaz çeliklerin temelini demir-krom sistemi oluşturmaktadır. Şekil 2.4'de kromun başlıca alaşım elementi olduğu demir-krom denge diyagramı gösterilmektedir. Paslanmaz çelik faz kararlılığı, faz ilişkileri ve mikroyapıları tanımlamak için bu diyagram önemli bir başlangıç noktasıdır [22,25,26].



Şekil 2.4. Fe- Cr ikili faz denge diyagramı [22].

Yüksek sıcaklıklarda, demir içinde Cr tamamen çözünmektedir ve tüm Fe-Cr alaşımlarının katılaşması ferritik olarak görülmektedir. Karbonsuz ikili Fe-Cr alaşımları tam çelik olarak değil ancak paslanmaz demir olarak adlandırılırlar.

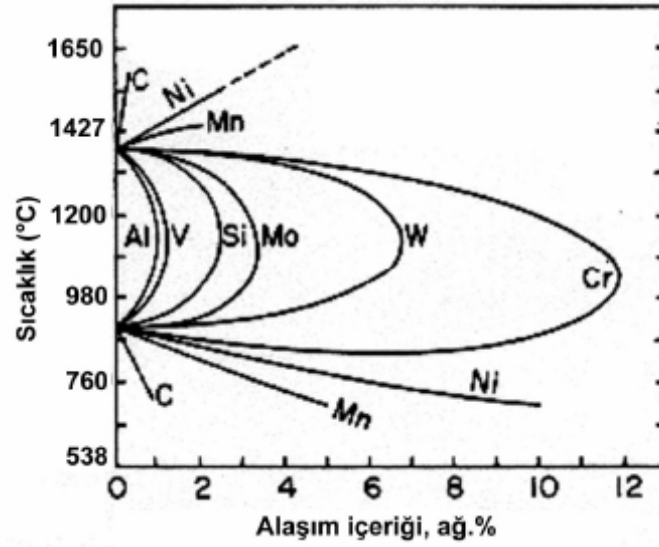
Düşük sıcaklıklarda demir-krom faz diyagramı tamamı katı eriyik olmayıp 821 °C altında yaklaşık % 46 krom içeren sert ve kırılğan olan σ oluşmaktadır [27].

Faz diyagramlarında ferrit, α ve δ sembolleri ile gösterilmektedir. Fe-Cr sistemine dayanarak, δ yüksek sıcaklık ferriti ve α ferriti de ostenitten oluşan düşük sıcaklık ferritidir. İkili ve üçlü sistemlerde, α ve δ sıklıkla kullanılmaktadır ve yüksek sıcaklıkta oluşan ferrit tamamen dönüşmemiştir ve bir kısmı oda sıcaklığında kalmaktadır. δ -ferrit ve α -ferrit farklı tane yapıları göstermektedir. δ -ferrit çoğunlukla α -ferrit ile karıştırılmaktadır ve morfolojik olarak katılaşma mikroyapısına benzer yapılar içermektedir [22,24,25].

Krom, demirin yüzey merkezli kübik (YMK) ferrit yapısını kararlı duruma getirir ve böylece Cr miktarının artması ile yüksek sıcaklık δ ve α - ferrit alanı genişler. Düşük Cr miktarlarında, 912-1394°C sıcaklık aralığında ostenit halkası bulunmaktadır. Ferrit alanı genişledikçe γ (ostenit) alanı daralır. Fe-Cr alaşımlarının katılaşma aralığı oldukça dardır. %12.7'den daha fazla Cr içeren alaşımlar yüksek sıcaklıklarda yapıları tamamen ferritik olurken bu miktardan az Cr içeren alaşımlar γ bölgesi içindeki sıcaklıklarda bir miktar ostenit içermektedirler. %12'den az Cr içeren alaşımlar ise γ alanı içindeki sıcaklıklarda tamamen ostenitiktirler. Hızlı soğumaya bağlı olarak bu ostenit martenzite dönüşebilir [22,25].

Fe-Cr diyagramı martenzitik ve ferritik çeliklerin temelini oluşturmaktadır. Bu çelikler Cr dışında da alaşım elementleri içermektedirler [22,28].

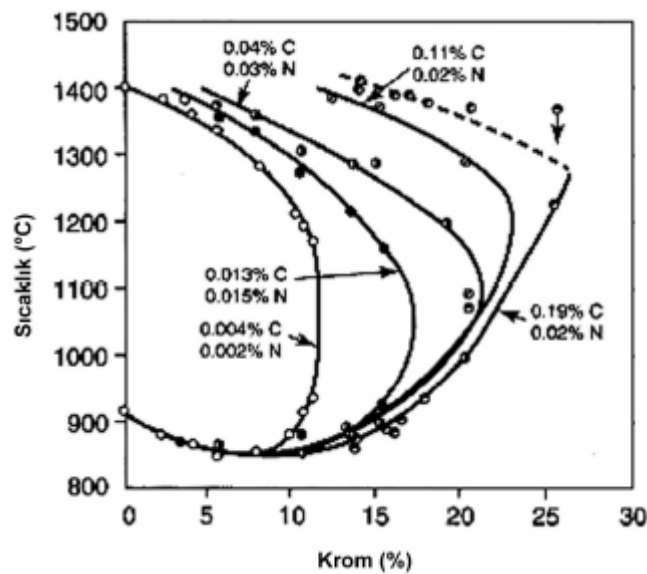
Paslanmaz çeliklerin bünyesinde paslanmazlık özelliğini taşıyan alaşım elementlerinin yanı sıra diğer bazı gereksinimleri karşılamak üzere isteyerek katılan veya kaçınılmaz olarak bulunan gayri safiyet elementleri ve karbon bulunmaktadır. Şekil 2.5'de, vanadyum ve molibden gibi diğer ferrit yapıcı elementlerin demir ile alaşımlanması durumunda kroma benzer davranışı gösterilmektedir [28].



Şekil 2.5. Demirin çeşitli ikili sistemlerinde oluşan ostenit alanı [28]

2.5.2. Fe-Cr-C sistemi

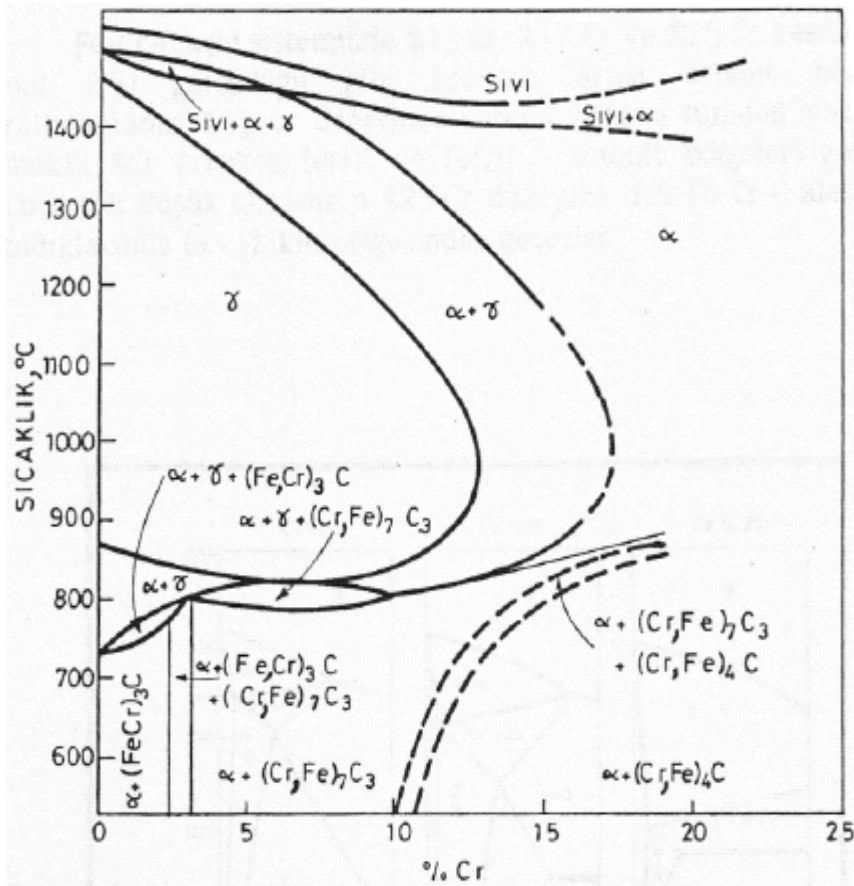
Fe-Cr alaşımlarına C eklenmesi, ostenitin oluştuğu yüksek sıcaklıklarda, Cr miktarı aralığını artırmaktadır. Bu da faz diyagramlarını değiştirmekte ve karmaşık duruma getirmektedir. C, ostenit yapıcı bir elementtir ve yüksek sıcaklıklarda ve çok daha yüksek Cr miktarlarında osteniti kararlı duruma getirerek γ alanını genişletir. C'un γ alanını genişletici etkisi aşağıda gösterilmektedir [22] (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Karbonun γ (ostenit) alanını genişletici etkisi [22]

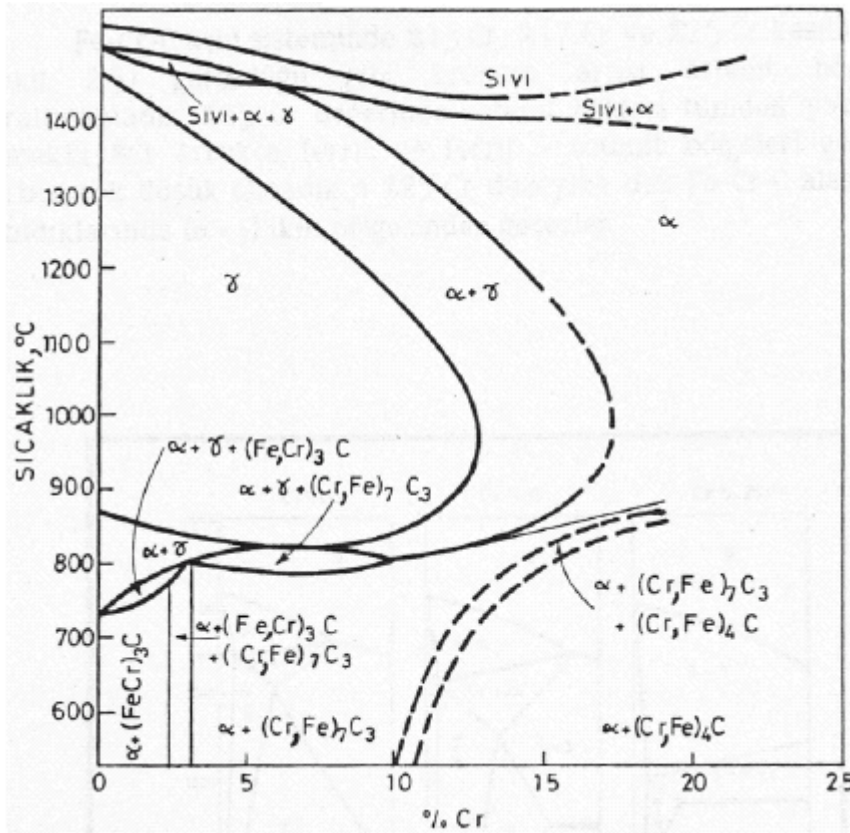
Çok az miktarda da olsa karbon, γ alanını oldukça genişletir. Bu da martenzitik paslanmaz çeliklerin geliştirilmesini etkilemektedir, zira martenzit soğuma sırasında oluşur ve bu çelikler yüksek sıcaklıklarda ostenitik olmalıdır. Ferritik kaliteler için, γ alanının büyüklüğü kontrol edilmelidir ve yüksek sıcaklıkta çok az ya da hiç ostenit oluşmamalıdır [18,22,26,29].

%0.1 C içeren Fe-Cr-C alaşımlarının içyapılarında oluşan evreleri şekil 2.7'de verilen denge diyagramından izleyebiliriz. Değişik bileşimlerde ve sıcaklıklarda ferrit, ostenit ve karbürler oluşabilir. Ostenit evresi 800°C altında dengeli değildir. Anlaşılacağı gibi krom karbürleri çökeldikçe ana yapının içerdiği %Cr, ortalama bileşim değerlerinden daha aza düşer. Özellikle 500-800°C gibi yüksek sıcaklıklarda uzun süre ısıtmalar o denli karbür çökeline yol açabilir ki ana yapıdaki krom oranı %10.5 Cr değerinin altına inebilir [30].



Şekil 2.7. %0.1 C içeren Fe-Cr-C alaşımlarının denge çizgisi [30]

Karbon, Fe-Cr-C alaşımlarında ostenit bölgesini daha yüksek krom değerlerine kaydırır ve ikili ($\alpha+\gamma$) bölgesini de genişletir. En geniş γ bölgesine %0.6 C değerinde ulaşılır (Şekil 2.8); daha yüksek karbonun etkisi ise krom karbürlerinin çökmesine yol açar. Bu kısıt değerine tekabül eden krom düzeyi %18 Cr' dir. %18 Cr ile %26-27 Cr değerine dek ısıl işlemlle yalnızca ($\alpha+\gamma$) evreleri elde edilebilir. Krom %27 Cr değerini geçtiğin de ise, %C ne olursa olsun, alaşımın içyapısını ferrit kalır. Özet olarak karbon da bir ostenit dengeleyici elementtir ve Fe-Cr alaşımlarında γ bölgesini genişletir. Ayrıca, %10 düzeyine dek krom içeren Fe-Cr alaşımlarında karbon sementit içinde çözümler ve $(Fe,Cr)_3C$ çökeler; bu karbür %15 Cr çözümlenebilir. Krom %10 Cr düzeyinin ötesinde ise, M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ karbürleri çökeler [30].



Şekil 2.8. Fe-Cr alaşımlarında %C etkisi [30]

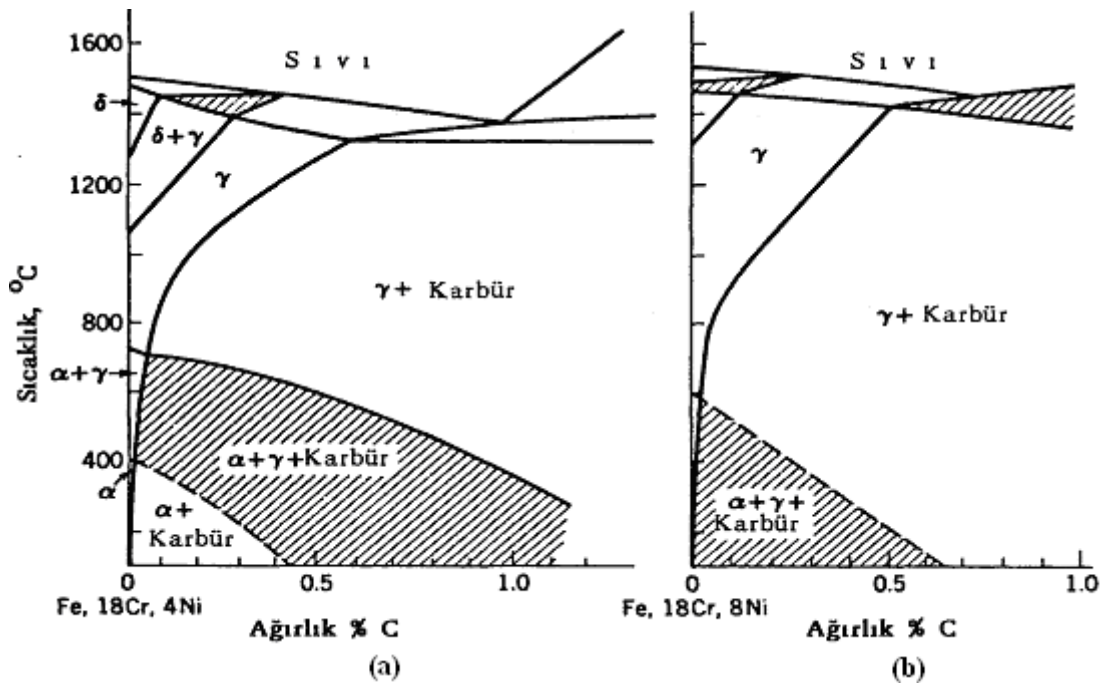
Fe-Cr-C alaşımları, yukarıda anlatılanlardan da anlaşılacağı gibi, 3 bölüme ayrılabilir:

- Martenzitli Fe-Cr-C alaşımları. Bunlar, %12-18 Cr içeren ve %C içerikleri de krom ile artan alaşımlardır

- b) Ferritli Fe-Cr-C alaşımları. Bunlar %16-30 Cr içerirler, düşük krom düzeylerinde %C'da çok düşük olmak zorundadır
- c) İkili (martenzitli + ferritli) Fe-Cr-C alaşımları. Bunlar Şekil 2.8'de gosterilen ikili bölgeye girebilen alaşımlardır [30].

2.5.3. Fe-Cr-Ni sistemi

Nikel ostenit evresini dengeleştirici bir etki yaratır ve γ bölgesini genişletir. Örneğin, düşük karbonlu sade karbon eliklerine %24 Ni katılsa içyapıları oda sıcaklıklarında bile ostenitli kalır. %C arttıa bu etkiyi yaratacak %Ni de düşer. Nikel, kromun aksine, karbür oluşturmaz. Hem krom hem de nikel içeren çeliklerin içyapıları, bir yandan ferrit dengeleştirici krom diğer yandan da ostenit dengeleştirici nikelin zıt etkilerinden ötürü oldukça karmaşıktır. Şekil 2.9' da %18 Cr içeren çeliklerde nikelin etkisi görülmektedir: %Ni arttıa γ bölgesi genişler ve $(\alpha + \gamma)$ bölgesi daralır. %4 Ni, %18 Cr, %0.2 C içeren bir elik, 900°C sıcaklıkta ostenitlenip su verilerek sertleştirilebilir. Halbuki ostenitleme sıcaklığı 1100°C'den büyük ise, δ bölgesine girileceğinden sertleştirme gerçekleşmez [30].

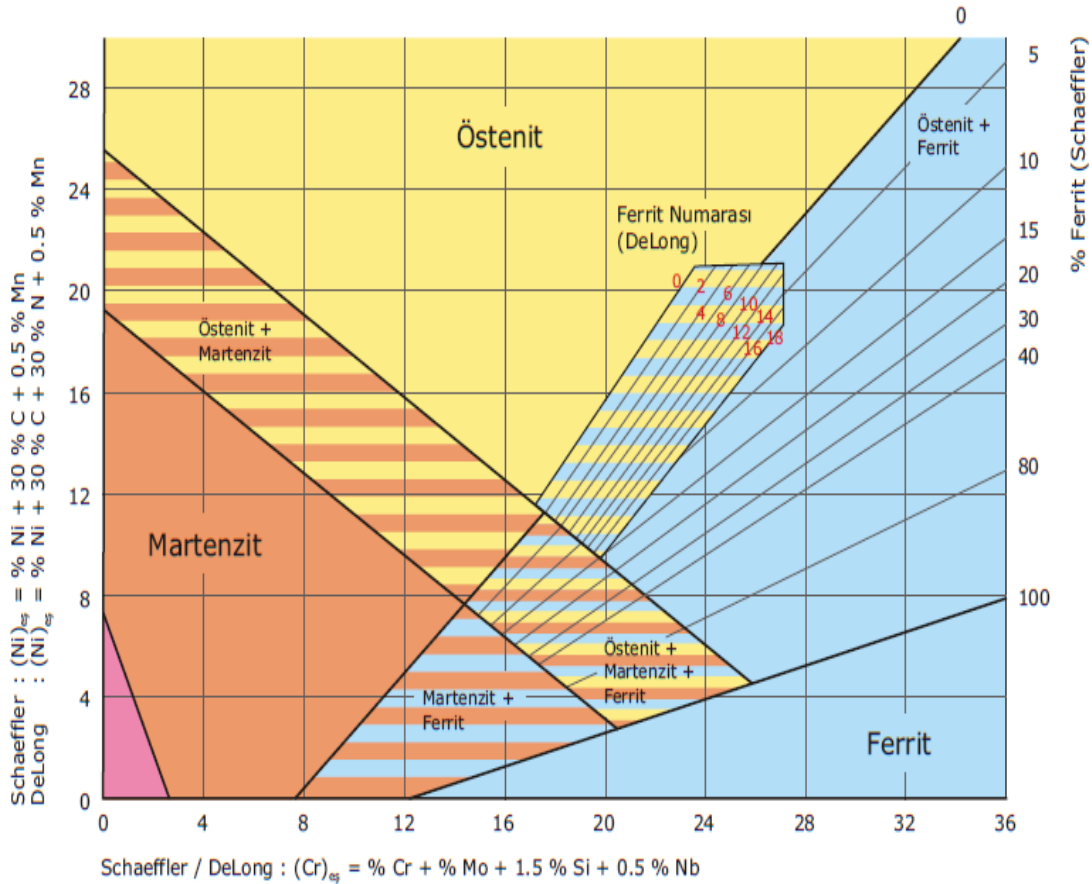


Şekil 2.9. (a) %4 Ni, (b) %8 Ni içeren Fe-%18Cr-C alaşımları faz diyagramları [8]

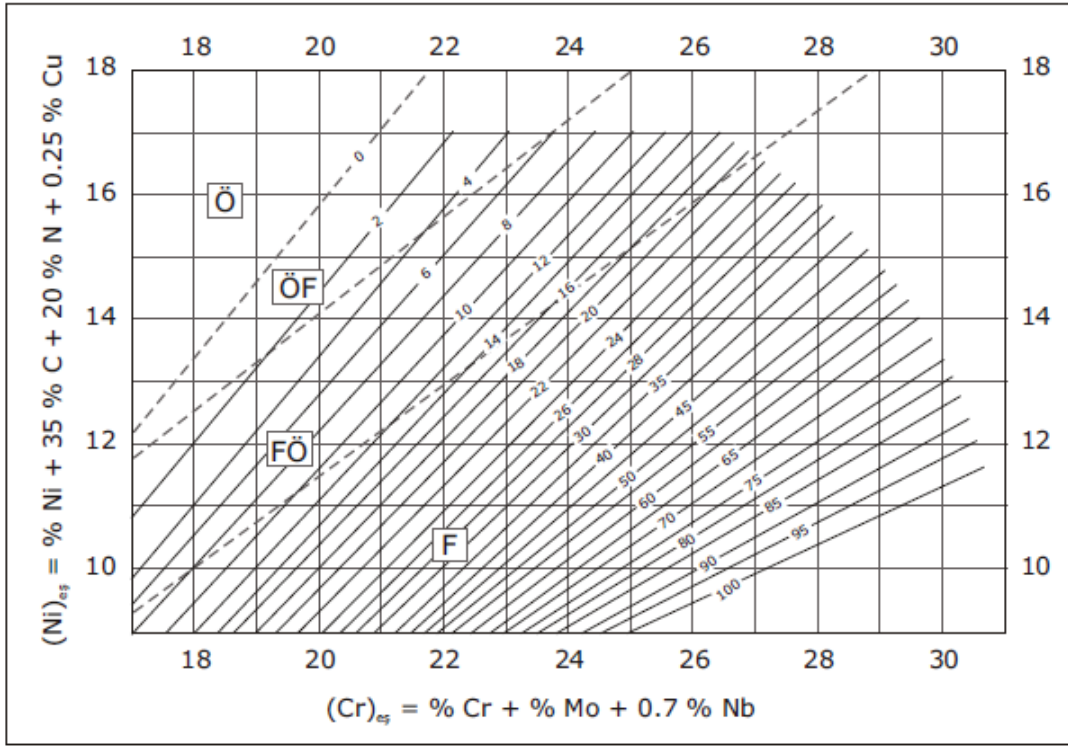
Nikel %8 düzeyine ulaştığında ise ostenit bölgesi iyice genişler ve oda sıcaklığında da içyapısı ostenitli kalır. %18 Cr + %8 Ni içeren elik, ostenitli paslanmaz çeliklerin en belirgin örneğidir. Ostenitli paslanmaz çelikler de, ferritli paslanmaz çelikler gibi, dönüşüme uğramazlar bu bakımdan, ısıtıldıklarında tane büyümesine yatkındırlar, iri taneli içyapı ısıl ilemele düzeltilemez, sıcak ya da soğuk mekanik işlem gereklidir. Ferritli paslanmazlar tane irileşmesi sonucu sünekliklerini yitirir ve gevrekleşirler; ostenitli paslanmazlar ise sünek kalırlar [30].

2.5.4. Schaeffler-Delong ve WRC-1992 diyagramları

Paslanmaz elik alaşım elementleri etkinlik dereceleri ferrit dengeleyicileri $(Cr)_{eş}$ ostenit dengeleyici $(Ni)_{eş}$ şeklinde gruplayarak değerlendirilmektedir. Yıllardan beri araştırmaların sonucunda formüller geliştirilmiş olup, aşığıdaki diyagramlar nikel ve krom eşdeğeri olarak hazırlanmıştır [1] (Şekil 2.10 ve 2.11).



Şekil 2.10. Schaeffler ve DeLong diyagramları [1]



Şekil 2.11. Katılma faz sınırlarını da içeren WRC-1992 diyagramı [1]

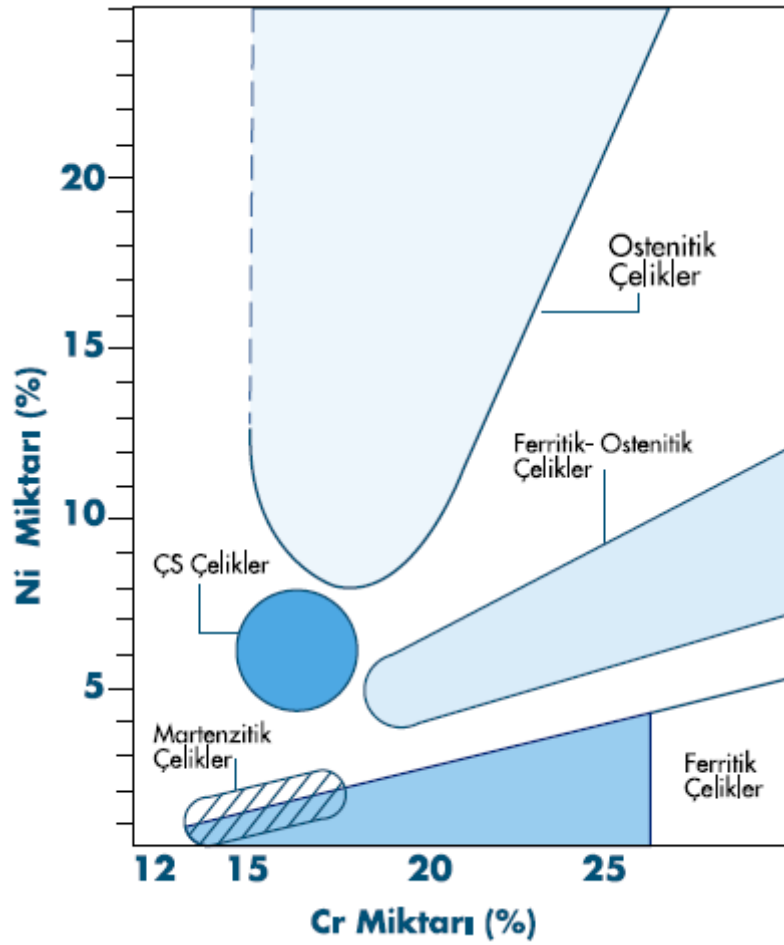
Schaeffler diyagramı çok uzun yıllar kullanılmasına karşın, azotun (N) etkisini hesaba katmaması ve diyagramdan elde edilen verilerin, konusunda bilgili birkaç ölçüm uzmanı tarafından belirlenen ferrit yüzdeleri ile farklılıklar göstermesi nedeniyle günümüzde etkinliğini kaybetmiştir. Bunun yerine Delong diyagramı geliştirilmiştir. Delong diyagramını Schaeffler diyagramından ayıran en önemli özellik nikel eşdeğeri hesaplanırken yapıdaki azot miktarının da göz önüne alınması ve sonucun ferrit yüzdesine ek olarak “FN-Ferrit Numarası” ile belirtilmesidir. Günümüzde en sık kullanılan ve en sağlıklı sonucu veren diyagram Şekil 2.11’de belirtilen WRC-1992 diyagramıdır. ASME (Amerikan Makine Mühendisleri Birliği) şartnamelerinin 1994-1995 kış döneminde yayınlanan eklerinde WRC-1992 Diyagramı, Delong Diyagramının yerini almıştır. Kabul edilen son diyagramda krom ve nikel eşdeğerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$(Cr)_{es} = \% Cr + \% Mo + 0.7 \% Nb \quad (2.1)$$

$$(Ni)_{es} = \% Ni + 35 \% C + 20 \% N + 0.25 \% Cu \quad (2.2)$$

2.6. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması ve Uygulama Alanları

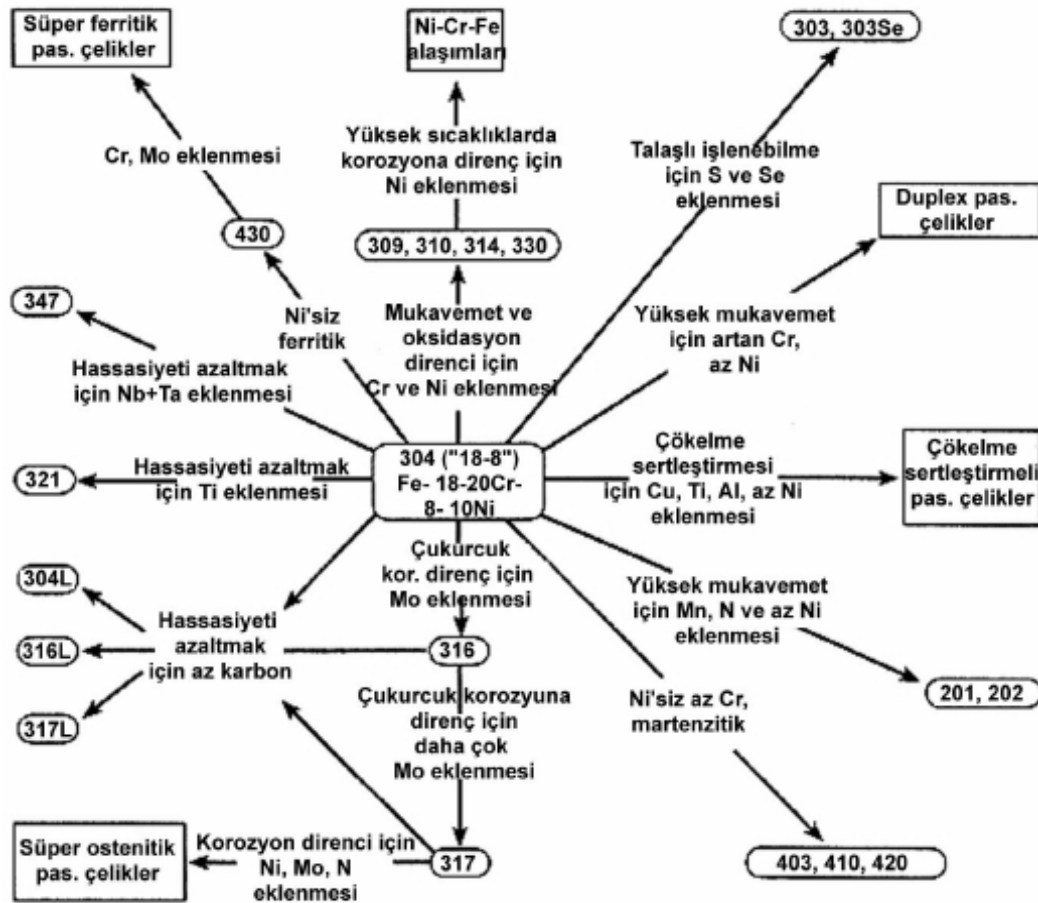
Paslanmaz çelikler beş ana gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.12). Bunlardan ilk dört grup, alaşımların karakteristik mikroyapısına dayanmaktadır. Paslanmaz çeliklerde mevcut olabilen fazlar: martenzit, ferrit ve ostenittir. Dupleks paslanmaz çelikler yaklaşık olarak %50 ostenit ve %50 ferrit içermektedir. Çökelme sertleştirmeli kaliteler ise çökelme sertleştirmesi (yaşlandırma ısıl işlemi) ile oluşturulmasından dolayı bu şekilde adlandırılmaktadır. Bu türler ise martenzitik, yarı ostenitik ve ostenitik türler olmak üzere kendi içlerinde ayrılmaktadır [18,22].



Şekil 2.12. Paslanmaz çeliklerin nikel ve krom miktarlarına göre sınıflandırılması [23]

Paslanmaz çeliklerin, özellikle dövme türlerinin adlandırılması genellikle Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI)'nün üç rakamlı ve bazen de bu üç rakamı izleyen bir harf kullanılarak, örneğin 304, 309, 310, 310S, 316L, 410, 420 ve 430,

oluşturduğu sistemle yapılabilmektedir. 200 ve 300 serisi genellikle ostenitik türleri gösterirken 400 serisi ise ferritik veya martenzitik türleri göstermektedir. UNS (Birleşik Numaralandırma Sistemi) sistemi paslanmaz çelikleri de kapsayan ve tüm metallerin listesini içeren ve AISI sisteminden daha kapsamlı bir numaralama ve adlandırma sistemidir, zira son geliştirilen paslanmaz çelik türlerini de içermektedir. Paslanmaz çeliklerin UNS ile adlandırılması, S harfini ve onu izleyen 5 rakamı içermektedir. AISI ile adlandırılan alaşımlar da çoğunlukla bu sistemde yine AISI adlandırmasına karşılık gelecek biçimde tanımlanmaktadır, zira iki rakam 00 ise bu numaralama temel AISI kalitesine denk gelmektedir. Temel kalitelerin modifikasyonları da 00'ların dışında rakamlarla ifade edilmektedir. %25-30 gibi yüksek miktarlarda Ni içeren paslanmaz çelikler de UNS sisteminde N harfi ve onu izleyen 5 rakamla ifade edilmektedir [18,22].



Şekil 2.13. Paslanmaz çelik alaşım ailesi [18]

Manyetik özellikler de bazı tür paslanmaz çelikleri tanımlamada kullanılabilir. Örneğin, austenitik türler manyetik değildir. Dupleks kaliteler ise yüksek ferrit miktarlarına bağlı olarak kuvvetli manyetiklik özeliği gösterirler. Çok az miktarlardaki artık ferrit veya soğuk şekillendirme de çok az ferromanyetiklik özeliği kazandırabilmektedir, ancak bu durumda manyetik malzemelere göre daha zayıf manyetiklik özeliği gösterirler. Ferritik ve martenzitik tür paslanmaz çelikler de ferromanyetik özellik gösterirler [18,22].

İlk kullanıldıkları kesici takım endüstrisinden günümüze dek paslanmaz çeliklerin uygulama alanları büyük oranlarda artmıştır. Paslanmaz çelikler bugün, güç üretiminde, kimya ve kağıt işleme endüstrilerinde, mobilya sektöründe, otomobillerde, estetik görünüm ve korozyon direncinin tasarımıda önemli rol oynadığı alanlarda rahatlıkla kullanılmaktadır [21,22]

Kimya ve güç mühendislik uygulamaları, uzun ve yassı paslanmaz çelik ürünlerde en büyük payı oluşturmaktadır ve bu 1920’de nitrik asit endüstrisi ile başlamıştır. Günümüzde nükleer reaktör kazanları, ısı değiştirgeçleri, petrol boru hatlarında, kimyasal işleme ve kağıt endüstrilerinde, fosil yakıt güç alanlarında kullanılan fırınlarda ve kazanlarda kullanılmaktadır. Birçok paslanmaz çelik türü, süt ve peynir üretimi gibi gıda endüstrisinde, bira ve meyve suyu üretiminde, şarap ve bira depolamada ve restoranlar için büyük mutfaklar gibi alanlarda kullanılmaktadır [18].

Taşıma araçlarında kullanılan fonksiyonel ve dekoratif bileşenlerin büyük bir kısmı paslanmaz çeliklerden üretilmektedir: örneğin, otomobil parçaları, otobüs ve tankerlerde, kimyasal tankerlerde, uçak bileşenlerinde kullanılmaktadır. Paslanmaz çelikler mimari uygulamalarda da kullanılmaktadır. 304 paslanmaz çeliğin dekoratif amaçla kullanıldığı en eski uygulama, 1929’da New York’taki Crysler binasıdır [18].

Paslanmaz çelikler yıllardır, mutfak ekipmanlarında, gıda endüstrisinde, sağlık uygulamalarında, petrol ve petrokimyasal alanlarda, tekstil endüstrisinde, eczacılık ve taşıma endüstrilerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve sıfırlı sıcaklık uygulamalarında da kullanım alanı bulmaktadırlar. Yassı ve uzun paslanmaz çelik ürünlerin kullanım alanları aşağıda tabloda sunulmaktadır [18,21,22].

Tablo 2.1. Paslanmaz çelik ürünlerin uygulama alanları [18]

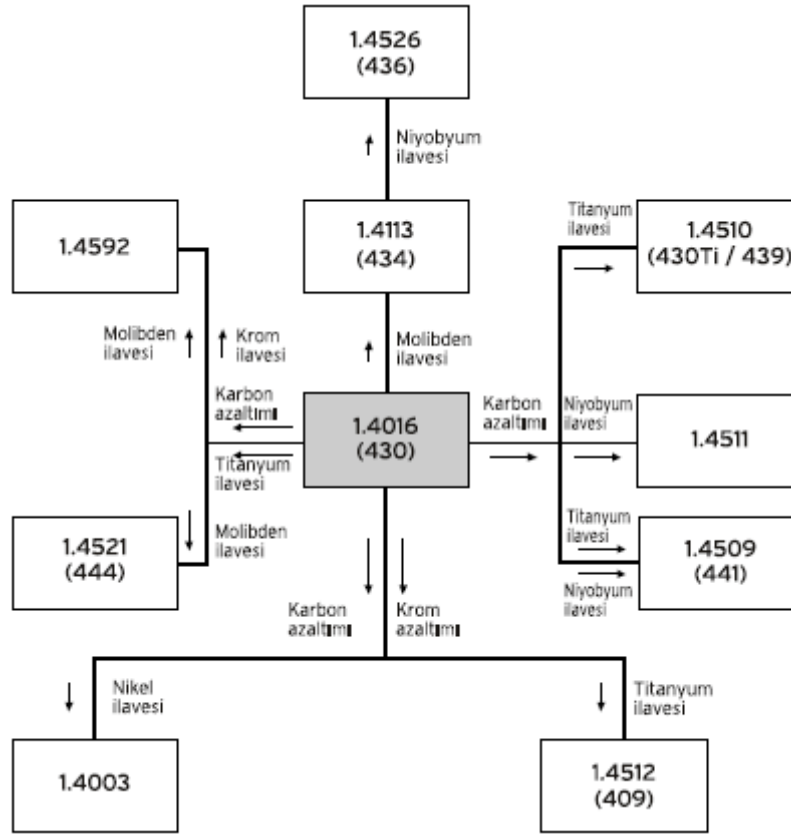
Uygulama	Kullanım Yüzdesi
Endüstriyel ekipmanlarda	
Kimya ve güç mühendisliği	34
Gıda endüstrisi	18
Taşıma	9
Mimari	5
Tüketim eşyalarında	
Evsel uygulamalar	28
Elektrik ve elektronik uygulamaları	6

Aşağıdaki paragraflarda, yukarıda sınıflandırması yapılan paslanmaz çelik türleri anlatılmıştır. Özellikle ferritik ve ostenitik paslanmaz çelikler ile deneyde kullanılan AISI 310 ve AISI 430 kalite paslanmaz çelikler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

2.6.1. Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler %10.5-30.5 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 yapıdadırlar, bu nedenle ostenit oluşturmazlar ve ısı ile sertleştirilemezler [1].

Ferritik paslanmaz çelikler, mevcut baskın metalurjik fazın ferrit olması nedeniyle ferritik olarak adlandırılmaktadır. Ferritik paslanmaz çelikler hem oda sıcaklığında hem de daha yüksek sıcaklıklarda demir elementinin sahip olduğu hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapısına sahiptirler ve ostenit-ferrit dönüşümü göstermezler. Dolayısıyla içyapılarını ve mekanik özelliklerini ısı ilemlerle etkilemek mümkün değildir. Bu alaşımlar, gerilmeli korozyon çatlamasına, çukurcuk korozyonu ve özellikle klorürlü ortamlar için aralık korozyonuna karşı iyi direnç gösterirler. Mekanik özelliklerden ziyade korozyon direncinin en önemli gereksinim olduğu birçok uygulamada kullanılırlar [22,31]. Şekil 2.14'de AISI 430 türünden yola çıkılarak geliştirilen ferritik paslanmaz çelik türleri şeması, AISI ve Avrupa Birliği (EN) standartlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Ferritik paslanmaz çelikler [23]

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

1. Krom miktarı %11-13 arasında olanlar; (405 ve 409 kaliteleri)
2. Krom miktarı yaklaşık %17 olanlar; (430 ve 434 kaliteleri)
3. Yüksek kromlular %19-30; (süperferritikler 442 ve 446 kaliteleri)

Krom oranı düşük olan birinci grup orta derecede korozyon ve oksidasyon dayanımı yanında düşük fiyat ve iyi imalat özelliklerine sahiptir. Otomotiv ve egzost parçalarında tercih edilen bu grup içinde en çok kullanılanı AISI 409 kalitedir. Orta derecede krom içeren ve otomotiv sac parçaları ve mutfak gereçleri yapımında kullanılan ikinci grup, düşük tokluk ve düşük kaynak kabiliyeti ile göze çarpar. Bu grupta en çok kullanılan ve piyasada temel ferritik kalite olarak bilinen AISI 430 dur. Yüksek kromlu üçüncü grup ise süperferritikler diye adlandırılır ve yüksek korozyon ve oksidasyon dayanımı gereken yerlerde tercih edilirler. Genellikle düşük karbon ve

azot içeren bu alaşımlarda, gevrekleşme hassasiyetini azaltmak ve kaynaklı konstrüksiyon dayanımını arttırmak amacıyla titanyum ve niyobyum gibi stabilizatör elementler katılır. Ayrıca alüminyum ve molibden de içerirler. Süperferritikler yerel korozyon söz konusu olduğunda (örneğin suda çözünmüş klorüre karşı) ostenitik çeliklere kıyasla çok daha iyi bir dayanım gösterirler. Bundan dolayı buhar kazanları, ısı değiştiricileri, klorür taşıyan boru hatları ve deniz suyu uygulamalarında tercih edilirler [23].

Bu çeliklerin en önemli özelliği; kaynak esnasında ve ısı etkisi altındaki bölgede oluşan ve kaynak dikişinin tokluğunda önemli derecede düşüşe neden olan tane büyümesidir. Bu tür paslanmaz çeliklerin sahip olduğu başlıca özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

1. Korozyon dayanımı orta ile iyi derece arasında olup, malzeme içerisinde krom miktarının artması ile artmaktadır,
2. Manyetikler,
3. Düşük ısıl genleşmeye sahiptirler, ısıtıldıklarında ostenitik paslanmaz çeliklerden daha az genişirler,
4. Mükemmel yüksek sıcaklıkta oksitlenme direncine sahiptirler. Ostenitiklere göre pullanmaya karşı daha az eğilimlidirler,
5. Yüksek ısıl geçirgenliğe sahiptirler,
6. Niyobyum ile stabilize edilmiş ferritikler mükemmel akma dayanımına sahiptirler,
7. Ostenitiklerle karşılaştırıldığında kesmek ve işlemek daha kolaydır,
8. Soğuk biçimlendirme sırasında, ostenitiklerle karşılaştırıldıklarında geri yaylanmaya daha az eğilimlidirler,
9. AISI 304 tipi ostenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldıklarında daha yüksek sünme dayanımına sahiptirler,
10. Ferritikler, ostenitiklerden farklı olarak gerilme korozyonu çatlamasına meyilli değildirler,
11. Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür,
12. Isıl işleme dayanımları artırılabilir [11].

Tablo 2.2’de değişik ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal alaşım kompozisyonları ve kullanım alanları ile ilgili bilgiler verilmektedir. Bu malzemeler korozyon ve ısıya karşı dayanıklıdır. Bu yönüyle tasarım mühendisliği açısından önemlidir. Çünkü nikel içeren malzemeler gibi korozyon direnci sağlarlar. Ancak pahalı ve stratejik bir element olan nikel’e fazla ihtiyaç duyulmadığı için maliyeti düşüktür. Bu malzemelerin sünekliklerinin azlığı ve çentik hassasiyeti ve kaynak kabiliyetinin düşük olması nedeniyle ostenitik paslanmaz çelikle kıyaslandığında daha az kullanılmaktadır [27].

Tablo 2.2. Çeşitli ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve kullanım alanları [27]

AISI Tip	Cr (%)	C (maks.) (%)	Mo (%)	Al (%)	Diğerleri (%)	Tipik Uygulamalar
405	13	0.08		0.2		Al ilavesi ile kaynak kabiliyeti iyileştirilmiş ve sertleştirilemez duruma getirilmiştir. 410 ve 403 gibi havada sertleşen türlerin istenmediği yerlerde kullanılır. Tavlama ve sertleştirme kutuları, oksidasyon dirençli bölmelerde kullanılır.
409	11	0.08			Ti 6xC	Genel amaçlı yapıım paslanmaz çelikleri genellikle galvanizli çeliğin yeterli olmadığı kaynaklı uygulamalarda kullanılır. Örneğin; otomobillerde susturucu ve ekzost sistemlerinde kullanılır.
434	17	0.12	1			Mo ilavesi ile kiş aylarındaki olumsuz yol şartlarının etkisinde kalan parçalarda ve otomotiv endüstrisindeki sa levhalarda kullanılır.
436	17	0.12	1		Nb 5xC	430 ve 434 tiplerine benzer. Nb ilavesi şekil verme kabiliyetini yükseltir. Otomotiv endüstrisinde şekil vermede zorluk çekilen uygulamalarda kullanılır.
442	20.5	0.20				Korozyon ve pullanma dayanımını yükseltmek için Cr içeriği arttırılmıştır. Fırın parçalarında püskürtme memelerinde ve yanma odalarında kullanılır.
446	25	0.20				442’ye göre daha yüksek Cr içerdiği için yüksek sıcaklıklardaki korozyon ve pullanma dayanımı fazladır. Özellikle değişken servis şartlarında ve sülfürlü ortamlarda kullanılır.

Bu çelikler 900°C sıcaklık üzerinde ısıl işleme tabi kaldıklarında ostenit oluşmakta ve sonrasında hızlı soğuma sonucu ostenitik yapı martenzite dönüşmektedir. Ferritik paslanmaz çelikler martenzite dönüşümle çok fazla sertleşmekte ancak bu durum kırılabilirliğe ve düşük sünekliğe neden olmaktadır. Bu tip çeliklerde aşağıda belirtildiği gibi üç farklı gevreklik gözlenmektedir:

1. 475°C sıcaklık gevrekliği
2. Sigma (σ) fazı gevrekliği
3. Yüksek sıcaklık gevrekliği

475°C sıcaklık gevrekliği ferritik paslanmaz çelik için 400-540°C sıcaklığında uzun zaman ısıtıldığında meydana gelmektedir. σ -fazı kırılabilirliği yaklaşık olarak % 15-70 Cr içeren Fe-Cr alaşımları 500-800°C sıcaklığı arasında uzun zaman ısıl işleme maruz kaldığında σ -fazı çökeltmektedir. Fe-Cr alaşımında 550°C sıcaklığında 131 gün ısıl işleme maruz kaldığında da σ -fazı çökeltmektedir. Yüksek sıcaklık kırılabilirliği ise; belirli bir düzeyde C ve N içeren ferritik paslanmaz çelikler 950°C üzerinde ısıtılıp soğutulduğunda şiddetli kırılabilirlik ve korozyon direncinde düşme görülür. Yüksek sıcaklık kırılabilirliği nedeni Cr'ca zengin karbür ve nitürlerin tane sınırlarında çökmesinden veya distorsiyon çökmesinden kaynaklandığı sanılmaktadır [27].

Ferritik paslanmaz çeliklere molibden ilavesi korozyona karşı direnci artırmak, Nb ve Ti ise, çelikte ergimiş bulunan C ve N' nin oranlarını düşürerek taneler arası korozyona karşı çeliği kararlı yapmak için ilave edilirler. Bu ilave süneklik ve darbe direncini artırır. Bu durum bu çeliklere kimya endüstrisinde kullanılan tankların imalinde birçok avantaj sağlar. Ferritik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında pek çok yöntemle şekillendirilebilirler. Ancak ostenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha zor şekillenirler. Düşük deformasyon sertleşme hızları bunların kolayca deforme edilmelerini sağlar. Soğuk dövme, soğuk şekillendirme yapılabilir [32].

Ferritik paslanmaz çelikler gerilmeli korozyon çatlamasına karşı çok iyi direnç gösterirken tokluk ve kaynaklı durumda süneklik özellikleri zayıftır. Son yıllarda, C ve N miktarı oldukça azaltılmış olan yeni türler geliştirilmiş ve tokluk ve kaynak

kabiliyeti özellikleri iyileştirilmiştir. Birçok birleştirme yöntemi arasında, kaynak teknolojisi en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Ancak ferritik paslanmaz çelikler genellikle kaynak gereksinimi olmayan uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin, orta kromlu türler otomobil, dekoratif ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. 1980'lerin başlarından buyana, az ve orta kromlu kalitelerin otomobil egzost sistemlerinde kullanımı hayli artmıştır. Egzost borularının ve bağlantılarının kaynak edilmesinden dolayı da ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti artan bir ilgi görmeye başlamıştır [22,33].

Birçok yüksek kromlu kalite, örneğin kimyasal sahalarda, kağıt fabrikaları ve rafinerilerde kullanılmak üzere geliştirilmektedir. Bu alaşımlar, ostenitik ve martenzitik türlere göre üstün korozyon direnci göstermektedirler, ancak daha pahalıdırlar ve üretimleri daha zordur. Orta ve yüksek kromlu alaşımların kaynak kabiliyeti, birçok araştırmaya konu olmuştur. Ferritik türler genelde, 400°C'nin altındaki sıcaklıklarında kullanımla sınırlıdırlar, zira yüksek kromlu kaliteler özellikle gevrek fazların oluşumuna bağlı olarak 475°C gevrekliğine karşı hassasiyet gösterirler [22]. Ferritik çeliklerde kaynak bağlantıları, ostenitik çeliklerden daha sorunludur. Bu sebeple kaynak işleminden önce başlangıç tokluğunu artırmak üzere 150-200°C arasında ön ısıtma ve kaynak sonrası 700-800°C sıcaklık aralığında uygulanacak bir tavlama yapılmalıdır. Ayrıca tane irileşmesini ve karbür çökmesini önlemek için kaynak işleminde ısı girdisi düşük tutulmalıdır [23].

Oldukça parlak ve dekoratif görünüme sahip olan bu tür paslanmaz çelikler, dünya paslanmaz çelik türlerinde ostenitik paslanmaz çeliklerden hemen sonra en büyük pazar payı ile ikinci sıradadırlar [34].

Tablo 2.3' de bu deney çalışmasında kullanılan malzemelerden birisi olan ve piyasada en çok kullanılan temel ferritik kalite paslanmaz çelik olarak bilinen AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğinin standartları, kimyasal bileşimi, mekanik ve fiziksel özellikleri ile korozyon dayanımı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Yine Tablo 2.4'de imalat özellikleri ve kullanım alanlarıyla ilgili bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.3. AISI 430 paslanmaz çeliğin; standart numaraları, kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri ile korozyon dayanımı [23]

ASTM 430	UNS S43000	EN 1.4016
-------------	---------------	--------------

Kimyasal Bileşim	C	Cr	Ni
En çok	0.08	18	-
En az		16	-

Fiziksel Özellikler	
Elastik modülü (GPa)	220
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	7.7
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	10
Elektrik direnci (Ω mm 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)
Tavlanmış durumda	En az 210	430-600	>20	150-190
Yüksek sıcaklık özellikleri				
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	105	10.5

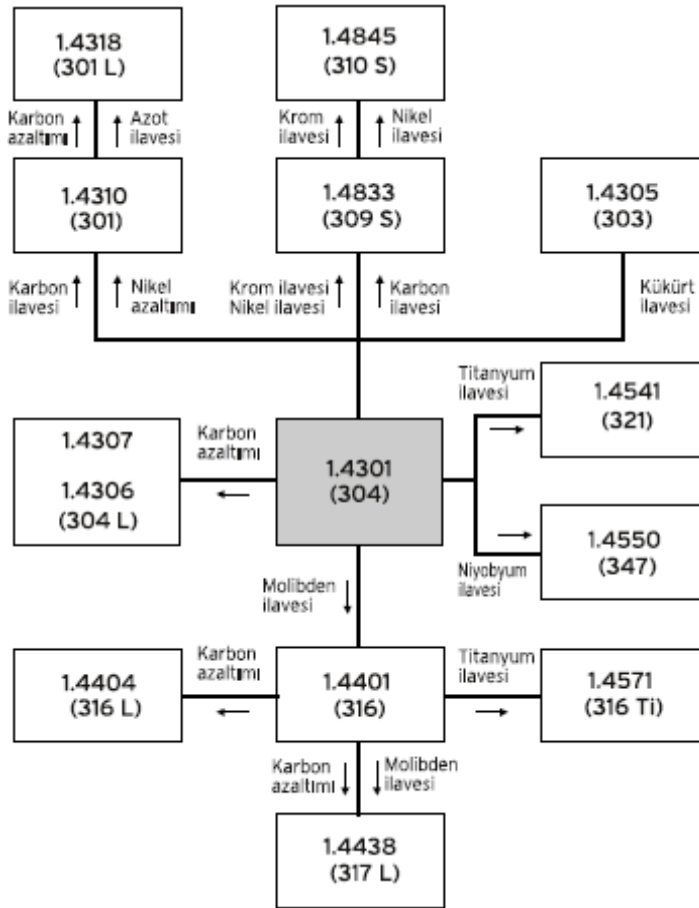
Korozyon dayanımı	Doğru ısıtım işlemi yapılmış durumda atmosferik korozyona dayanımı iyidir. Klorür içermeyen sulu ortamlarda, zayıf organik asitli ortamlarda, deterjanda ve alkali çözeltilerde korozyon dayanımı iyidir. Diğer mineral asitlere ve klorürlere korozyon dayanımı iyi değildir. Sıcak işlemlerden sonra (kaynak gibi) taneler arası korozyona dayanımını tekrar kazanması için tavlanması gerekir.
Yüksek sıcaklıkta	800 °C sıcaklığa kadar sürekli olarak, 850 °C sıcaklığa kadar kesikli olarak kullanılabilir, yeterli tufal oluşumu direnci vardır.

Tablo 2.4. AISI 430 paslanmaz çeliğin; imalat özellikleri ve kullanım alanları [23]

İmalat Özellikleri	
Tavlama sıcaklığı	750-800 °C sıcaklık aralığında 20-30 dakika tutulur. Tavlama sonrasında kalınlığa bağlı olarak su veya havada soğutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilemez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.
Gerilme giderme tavlama	650-700 °C sıcaklık aralığında 15 dakika tutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilemez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir. Tavlama sonrasında kalınlığa bağlı olarak su veya havada soğutulur.
Sıcak şekillendirme	750-1050 °C sıcaklık aralığında yapılır. Havada soğutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilemez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.
Soğuk şekillendirme	Malzemenin kalınlığına bağlıdır. Ferritik çelikler düşük sıcaklıklarda gevrek olduklarından 3 mm kalınlıktaki saclar en az oda sıcaklığında olmak üzere (20 °C) şekillendirilebilirler. Daha kalın saclarda 100-300 °C sıcaklığa ısıtmak gerekebilir. Soğuk haddelenmiş saclarda keskin köşeler haddeleme doğrultusuna paralel olarak yapılmalıdır.
Talaşlı imalat	Yumuşak ferritik içyapı nedeniyle malzemenin sıvanma eğilimi vardır. Talaşlı işlenebilme özelliği dayanımı yaklaşık 500 MPa olan alaşımsız çeliğin işlenmesindeki koşullara benzer.
Kaynaklanabilirlik	Kaynak kabiliyeti orta düzeydedir. Gaz ergitme kaynağı hariç bütün yöntemler uygulanabilir. 3 mm'den kalın saclarda 100-200 °C arasına ön ısıtma önerilir. Taneler arası korozyona dayanımı tekrar kazanması için kaynak sonrasında tavlama gerekir.
Kullanım alanları	Temel ferritik kalite paslanmaz çeliktir. Düşük ısıl genleşme, iyi şekillendirilebilme ve oksidasyona dayanım karakteristik özellikleridir. Genel amaçlar için kullanılan bir paslanmaz çelik kalitesidir. Otomotiv sanayinde karoser parçaları, tampon v.s. üretiminde kullanılır. Tüm mutfak ekipmanları ve çatal-kaşık üretiminde tercih edilir. Ayrıca gıda, kimya sanayi ile iç mimaride uygulama alanı bulur.

2.6.2. Ostenitik paslanmaz çelikler

Paslanmaz çeliğin bileşiminde yeterince nikel bulunduğu, malzemenin içyapısı oda sıcaklığında dahi ostenitik olmaktadır. Ostenitik paslanmaz çelikler %16-25 Cr, %10-24 Ni + Mn, %0.4'e kadar C ve düşük miktarda Mo, Ti, Nb, ve Ta gibi diğer alaşım elementleri içermektedir. Cr ve Ni + Mn oranları arasındaki denge %90-100 ostenitden oluşan bir mikroyapının elde edilebileceği şekilde oluşturulmuştur. Bu alaşımları, geniş bir sıcaklık aralığında sahip oldukları yüksek tokluk ve yüksek dayanım değerleri ön plana çıkarmakta olup, 540°C'a kadarki sıcaklıklarda oksidasyona karşı dayanım gösterirler. Bu grupta yer alan malzemelerin başında AISI 302, 304, 309, 310, 316, 321 ve 347 gelmektedir [1]. Şekil 2.15'de AISI 304 türünden yola çıkılarak geliştirilen ostenitik paslanmaz çelik türleri şeması AISI ve Avrupa Birliği (EN) standartlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Ostenitik paslanmaz çelikler [23]

Ostenitik paslanmaz çelikler biçimlendirme, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı bakımından çok uygun bir kombinasyon sunarlar. Süneklikleri, toklukları ve biçimlendirme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Manyetik olmayan bu çeliklere, ostenitik içyapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme veya sertleştirme ısıl işlemleri uygulanmamaktadır. Mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile artırılabilir. Ostenitik paslanmaz çelikler başlıca aşağıdaki özelliklere sahiptirler;

1. Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler,
2. Mükemmel kaynak edilebilme kabiliyetleri vardır,
3. Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilme kabiliyetleri vardır,
4. Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır,
5. Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler,
6. Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir,
7. Tavlanmış olduklarında manyetik değildirler,
8. Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilme özelliğine sahiptir [27].

Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde ostenitik paslanmaz çeliklerin payı %70'dir. Bu alaşımların esas olarak yüksek korozyon dirençlerinden ve şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı mühendislik uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. AISI 304 tipi paslanmaz çelik özellikle yüksek sıcaklıklarda ve çevre ile ilgili alanlarda önemli yere sahiptir. %2 Mo içeren AISI 316 tipi ostenitik paslanmaz çelik yüksek korozyon direncine ve iyileştirilmiş yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Krom seviyesi %23-25 artırılmış AISI 309 ve AISI 310 paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikler etkili miktarlarda karbon içerirler. Ostenitik paslanmaz çeliklerde karbon eriyebilirliği sıcaklık düştükçe %18Cr-8Ni alaşımlarında olduğu gibi hızı düştüğü için bu alaşımlar yavaş soğutulursa krom karbür çökelme olmaktadır [27].

Tablo 2.5'de endüstride yaygın olarak kullanılan değişik ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal alaşım kompozisyonları ve kullanım alanları ile ilgili bilgiler verilmektedir.

Tablo 2.5. Çeşitli ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi ve kullanım alanları [27]

AISI Tip	Cr (%)	Ni (%)	C(mak.) (%)	Mn (%)	Diğerleri (%)	Tipik Uygulamalar
201	17	4.5	0.15	6		Yüksek pekleşme hızı, 301'in düşük karbon eşdeğerliği, çatal kasık takımları, otomobil tekerlek kapakları, süslemeler.
202	18	5	0.15	7-8		302'nin düşük nikel eşdeğerliği genel amaçlı mutfak ekipmanları, başlık, süt taşıma malzemeleri.
301	17	7	0.15	2		Yüksek pekleşme hızı, yüksek dayanım, yüksek sünekliğin gerekli olduğu durumlarda kullanılır. Tren yolu arabaları, treyler gövdeleri uçak parçaları, sıkma bilezikleri otomobil tekerlek kapakları, süslemeler.
302	18	9	0.15	2		Genel amaçlı ostenitik paslanmaz çelik, süsleme, yiyecek taşıma ekipmanları, uçak kaportaları, antenler, yaylar, ev aletleri, petrol rafine sistemleri.
304	19	9	0.08	2		Kaynak sırasında karbür çökmesi sınırlamak için tip 302'nin düşük modifikasyonu. Kimyasal ve yiyecek işleme ekipmanları, soğuk kaplar, oluklar, sac kaplamalar.
304L	19	9	0.03	2		Kaynak sırasında oluşan karbür çökmesi riskini azaltmak amacıyla 304'ün ekstra düşük C'lusu.
309	23	13.5	0.20	2		Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksitlenme direnci, uçak ısıtıcıları, ısıl işlem ekipmanları, tavlama kapakları, fırın kaplamalar, pompa parçaları.
310	25	20.5	0.25	2		309'a benzer yapıda olup Ni ve Cr içeriği daha yüksektir. Isı eşanjörleri, fırın parçaları, yanma odaları ve kaynak dolgu malzemelerinin imalatı başlıca kullanım alanlarıdır.
310S	25	20.5	0.08	2		310'un kaynak kabiliyetini yükseltmek amacıyla daha düşük karbon içeren türüdür. Yüksek sıcaklık malzemesidir. Sanayi fırınları, buhar kazanları, petrol tesisleri, termo eleman koruyucuları.
316	17	12	0.08	2		304'den daha yüksek korozyon direnci, yüksek sürünme dayanımı, kimyasal ve küspe taşıma ekipmanları, fotoğraf makineleri, maya tüpleri.
316L	17	12	0.03	2		316'nın daha fazla karbon modifikasyonu taneler arası karbür çökmesini önlemek zorunda olduğu kaynaklı yapılar, tip 316L yoğun kaynak gerektiren yerlerde kullanılır.
321	18	10.5	0.08	2	Ti 5XC	Çok şiddetli korozyon şartlarına maruz kaynaklı bağlantı ve 800'den 1600°F'ta hizmet için kararlaştırılmış, kaynatma kazanları, işlem ekipmanları, kabin ısıtıcılar, ateş duvarlar.
347	18	11	0.08	2	Nb 10XC	Yüksek sürünme dayanımıyla birlikte 321'e benzer, uçak egzost bacaları, jet motor parçaları, kimyasal maddeler için kaynaklı tanker arabaları.

Tablo 2.6’da bu deney çalışmasında kullanılan malzemelerden birisi olan ve piyasada yüksek sıcaklık malzemesi olarak bilinen AISI 310 ostenitik paslanmaz çeliğinin, standartları, kimyasal bileşimi ile fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Yine Tablo 2.7’de korozyon dayanımı, imalat özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.6. AISI 310 ostenitik paslanmaz çeliğin; standart numaraları, kimyasal bileşimi ile fiziksel ve mekanik özellikleri [23]

ASTM 310	UNS S31000	EN 1.4841
-------------	---------------	--------------

Kimyasal Bileşim	C	Cr	Ni
En çok	0.25	26	22
En az	0	25	19

Fiziksel Özellikler	
Elastik modülü (GPa)	200
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	7.9
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	17
Elektrik direnci (Ω mm ² /m)	0.9
Özgül ısı (J/kg.K)	500
Isıl iletkenliği (W/m.K)	14
Manyetiklik	Yok

Mekanik Özellikler					
	% 0.2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (Brinell)	
Tavlanmış durumda	en az 230	550-800	en az 30	165-205	
Yüksek sıcaklık özellikleri					
Sıcaklık (°C)	600	700	800	900	1000
Sürünme sınırı R_{pl} (t= 10000h/MPa)	150	53	23	10	4
Sürünme kopma dayanımı R_m (t= 10000h/MPa)	160	40	18	8.5	
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	17.5		18		19

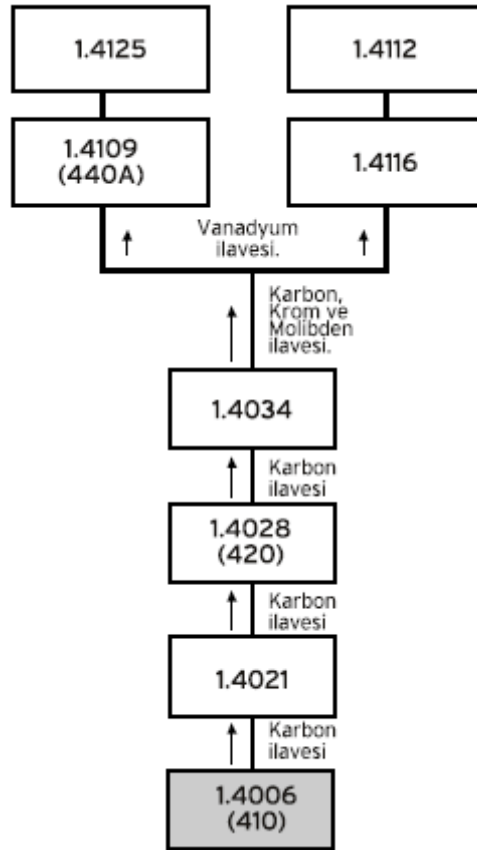
Tablo 2.7. AISI 310 paslanmaz çeliğinin; korozyon dayanımı, imalat özellikleri, kullanım alanları [23]

Korozyon dayanımı	Kükürtlü gazlara karşı az. Azotlu gazlara karşı mükemmeldir.
Yüksek sıcaklıkta	Yüksek krom ve nikel miktarı yüksek sıcaklık oksidasyonunu önler. Yaklaşık 1000 °C kadar havada ısıya dayanıklı olup iyi mekanik ve sürtünme dayanıklılığına sahiptir.
İmalat Özellikleri	
Tavlama sıcaklığı	1050-1100 °C
Şekil verme sıcaklığı	1150-800 °C
Kaynaklanabilirlik	İyi. Gaz ergitme hariç tüm yöntemlerle kaynak edilebilir.
Kullanım Alanları	Yüksek sıcaklık malzemesidir. Isı eşanjörleri, fırın parçaları, yanma odaları ve kaynak dolgu malzemelerinin imalatı başlıca kullanım alanlarıdır. Kaynak kabiliyetini artırmak amacıyla 310S türü geliştirilmiştir. 310' un tüm özelliklerini taşıyan bu tür sanayi fırınları, buhar kazanları, petrol tesisleri, termoeleman koruyucuları imalatında kullanılır.

2.6.3. Martenzitik paslanmaz çelikler

Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik kafese sahip ostenitin hızlı soğutma sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit yapıya dönüşümü ile elde edilir. Bu çeliklerin içyapısında tavllanmış halde yumuşak ferritik faz da bulunur. Bu çelikler, genelde, ferritli çeliklerden daha az krom içerirler %12-17 Cr ve %0.1-1.2 C içerirler. Karbonlar bazılarında düşük (en çok %0.15) ve diğerlerinde oldukça yüksektir (%12 C). Özellikle yüksek karbonlularda ostenit bölgesi o denli genişlemiştir ki %1 C içeren türleri 1200°C sıcaklıklarda %30 Cr çözüdürebilen ostenit bölgelerine sahiptir. Bu nedenle, martenzitli paslanmaz çelikler 1000-1100°C sıcaklıklarda ostenitlenip su verilerek sertleştirilebilirler. Bu çeliklerde kromun çok yüksek düzeylerde bulunması, bunların sertleşebilirlik özelliklerini çok artırır. Düşük karbonlu martenzitik paslanmaz çeliklerde bile %100 martenzitli içyapı oluşturmak olasıdır. Yüksek karbonlu martenzitik paslanmaz çeliklerde ise hem martenzit hem de sert krom karbürleri oluşur; bu nedenle yüksek karbonlu martenzitik paslanmaz çelikler aynı zamanda

yüksek ısınma direnci istenen uygulamalar için de seçilirler. Şekil 2.16'da AISI 410 türünden yola çıkılarak geliştirilen martenzitik paslanmaz çelik türleri şeması AISI ve Avrupa Birliği (EN) standartlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Martenzitik paslanmaz çelikler [23]

Ürün tipine bağlı olarak martenzitik çelikler tavllanmış veya ıslah edilmiş durumda pazara sunulmakta olup, tavllanmış olarak satın alınan ürünler biçim verildikten sonra ıslah işlemine (su verme + temperleme) tabi tutulur. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek değişik özellik kombinasyonları elde edilebilir. En iyi korozyon dayanımını elde edilmesi için tavsiye edilen ısıl işlem sıcaklıklarına uyulması çok önemlidir. Bu tür paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şunlardır;

1. Orta derecede korozyon dayanımına sahiptirler,
2. Isıl işlem uygulanabilmekte olup, yüksek dayanım ve sertlik elde edilebilir,
3. Kaynak kabiliyetleri düşüktür,

4. Manyetik olmaları gibi özelliklere sahiptir [23].

Tablo 2.8’de endüstride yaygın olarak kullanılan değişik martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal alaşım kompozisyonları ve kullanım alanları ile ilgili bilgiler verilmektedir.

Tablo 2.8. Çeşitli martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi ve kullanım alanları [27]

AISI Tip	Cr (%)	C (%)	Ni (%)	Mo (%)	V (%)	Tipik Uygulamalar
403	12.2	0.15				Buhar türbin bıçakları ve jet motorları halkaları gibi yüksek gerilmeye maruz kalan iş parçalarında.
410	12.5	0.15 maks.				Makine parçaları, pompa şaftları, jet motor parçaları, maden makineleri, gibi genel amaçlı ısıtılabilir işlemlendirilebilir işlerde.
414	12.5	0.15 maks.				410 tipinin yüksek karbon modifikasyonu, mutfak gereçleri, cerrahi aletleri, valfler.
422	12	0.22	1	0.25	1	1200 °F’ta kadar hizmet sıcaklıklarında yüksek dayanım ve tokluk. Buhar türbin bıçakları, sıkma bilezikleri.
431	16	0.20 maks.	1.8			Yüksek mekanik özelliklerinin gerekli olduğu yerlerde kullanılan, sertleşebilen özel amaçlı çelikler, uçak ekipmanları, dövücü kollar, kağıt makineleri.
440A	17	0.72				İyi korozyon direnci ile birlikte tip 420’den daha yüksek sertliğe sertleşebilir. Çatal, kasık, cerrahi takımlar.
440B	17	0.85				Çatal kaşık sınıfı, valf parçaları, alet yatakları.
440C	17	1.07				Sertleşebilir paslanmaz çeliklerin en yüksek sertliğini oluşturur. Bilyeler, yataklar, yarış bisikletleri, petrol kuyuları için yataklar, valf parçaları.

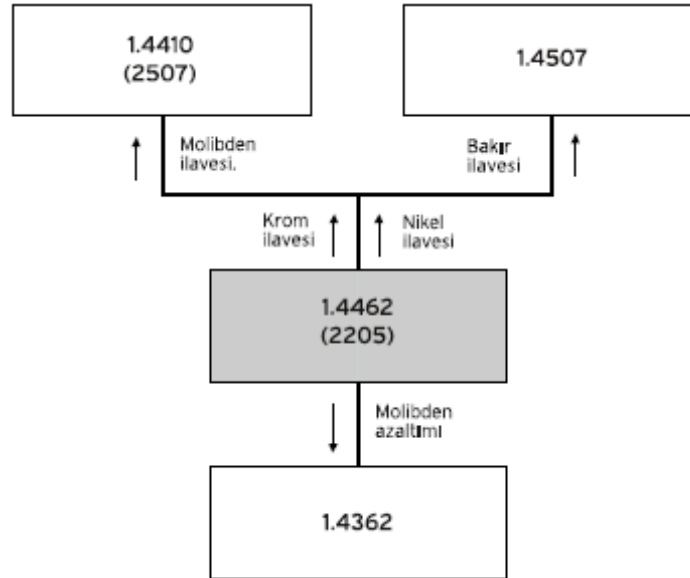
Martenzitik paslanmaz çeliklerin korozyon direnci %12 Cr içerdiğinden dolayı daha azdır. Bu korozyon düzeyinde ilave edilecek maksimum karbon miktarı %1.5'dir. Ancak bu durumda fazla karbon tane sınırlarında çökeltmekte ve aralarındaki krom miktarı %12'nin altına düşmektedir. Martenzitik çelikler yüksek çekme, sürünme ve yorulma dayanımı gerektiren, orta derecede korozif ve en çok 650°C'a kadar sıcaklıktaki uygulamalarda tercih edilirler. Bu çeliklerin dayanım ve sertliğini arttırmak için çeşitli ısı işlemler uygulanmaktadır. Esas olarak az karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklere uygulanan işlemlerle aynı olup bu işlemlerde alaşım ostenitlenir, yeterince hızlı soğutulur ve tokluğu arttırmak için temperlenir [23,27].

2.6.4. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler

Çift fazlı paslanmaz çelikler yaklaşık olarak eşit oranda ferrit ve ostenit içeren bir mikroyapıya sahiptir. Çift fazlı paslanmaz çelikler daha yüksek akma dayanımına sahip olmaları ve gerilmeli korozyon çatlamaına karşı daha fazla direnç göstermeleri nedeniyle konvansiyonel tipteki ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere oranla daha üstün avantajlar sunarlar. Çift fazlı mikro yapı %21-25 Cr ve %5-7 Ni içeren çeliğin 1000-1050°C sıcaklıkta tavlınması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulmasıyla elde edilirler [35].

Dubleks ostenitik-ferritik paslanmaz çelikler ostenitik ve ferritik fazların korozyon direnci ve mekanik özelliklerini birleştirme amacı ile geliştirilmiştir; ostenit tokluk ve genel korozyon direnci sağlarken ferrit, dayanım ve gerilmeli korozyona direnç sağlar [36].

Dubleks paslanmaz çelikler yaygın ostenitik türlere çekici bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Dupleks paslanmaz çelikler klorlu gerilmeli korozyon çatlamaına direncinin yanında yüksek dayanıma sahip olup, bazı ortamlarda 300 serisi paslanmaz çelik türlerinden daha iyi çukurcuk ve aralık korozyon direncine sahiptir [37]. Şekil 2.17'de AISI 2205 türünden yola çıkılarak geliştirilen dupleks paslanmaz çelik türleri şeması AISI ve Avrupa Birliği (EN) standartlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler [23]

Dubleks paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu %2.5-4 oranlarda molibden içermektedir. Bu tür çelikler hem iyi mukavemet hem de iyi süneklik özelliklerine sahiptir. Ayrıca korozif yapıcı ortamlarda bile çok uygun yorulma dayanımları elde edilmektedir. Tavsiyelere dikkat edildiğinde kaynaklı birleştirmeleri kolay olup, genellikle kimyasal işlemlerde kullanılan aparatların imalatında, arıtma tesislerinde ve deniz veya off-shore teknolojisinde kullanılmaktadır. Bu tür çeliklerin başlıca özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

1. Gerilmeli korozyona karşı yüksek dayanıklılığa sahiptirler,
2. Klor iyonunun bulunmadığı ortamlarda daha yüksek korozif dayanım göstermektedirler,
3. Ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek mekaniksel dayanıma sahiptirler,
4. İyi kaynak ve şekillendirme kabiliyetine sahiptirler.

Dubleks paslanmaz çeliklerde korozyona karşı direncini malzeme bileşimindeki krom tarafından sağlamakta olup, nikel ise tokluk ve malzemenin şekillendirilebilme özelliğini artırmaktadır. Bu tür paslanmaz çeliklerde çukurcuk korozyonu direncini artırılması amacıyla molibden içermektedir. Taneler arası korozyonun azaltılması için dubleks paslanmaz çeliklerin α - γ yüzeylerinin krom karbür çökmesi

azaltılması düşük karbon (<%0.03) içeriğine sahip olması gerekmektedir. Dupleks paslanmaz çeliklerde 1000-1150°C sıcaklığında tavlandığında sadece α - γ fazları bulunur. Fazların oluşumunun önlenmesi için hızlı soğutulması gerekmektedir [27].

Dupleks paslanmaz çelikler korozyon direnci ve dayanımın çok iyi bir kombinasyonu olarak deniz suyu, tuzlu su ve seyreltik asitli ortamlar için valf endüstrisinde ve pompalarda kullanılmaktadır [38]. Dupleks paslanmaz çelikler korozyon direnci ve mekanik özelliklerinin çekici birleşimleri nedeni ile yıllardır yağ ve gaz endüstrisinde kullanılmakta olup deniz altından geçen boru hatlarında kullanılmaktadır [39].

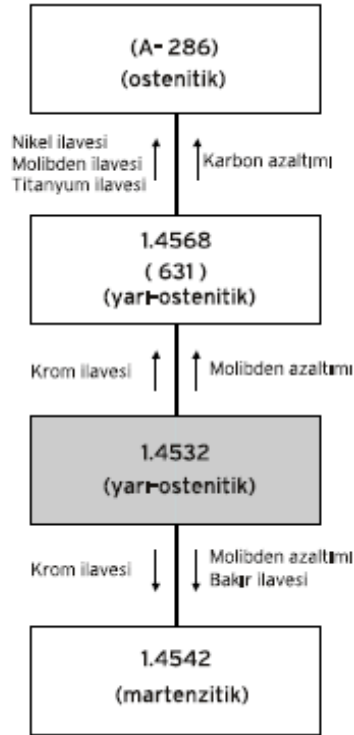
2.6.5. Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler

Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler çeşitli uygulamalar için ihtiyaçların önemi ölçüde arttığı 1940'lı yıllarda geliştirilmiştir. Bunların ana içyapıları ostenitik, yarı ostenitik veya martenzitik olabilir. Çökeltme olayını gerçekleştirebilmek için bazen önce soğuk şekil vermek gerekebilir. Çökelti oluşumu için alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri ile alaşımlaşma yapılır. Bu sayede mukavemetleri 1700 MPa kadar çıkan paslanmaz çelikler elde edilebilir [1]

Bu çelikler piyasaya çözme tavı görmüş sürülür; Malzeme bu durumda yumuşak olup, imalat işlemleri uygulanabilmekte ve daha sonra tek kademeli bir düşük sıcaklık yaşlandırması ile sertleştirilebilmektedir. Bu tür çeliklerin başlıca özellikleri;

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

En yaygın olarak kullanılan türü 630 kalite olan bu grubun kullanım alanı uçak-uzay ve diğer ileri teknoloji alanlarıdır. Şekil 2.18'de AISI 630 türünden yola çıkılarak geliştirilen çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelik türleri şeması AISI ve Avrupa Birliği (EN) standartlarında gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Çökelme yoluya sertleşebilen paslanmaz çelikler [23]

Bu çeliklerin en önemli özelliklerinden birisi kolay üretilmeleri ve aynı zamanda yüksek dayanım, süneklik ve korozyon direncine sahip olmalarıdır. Bu tip paslanmaz çelikler, çözeltiye alma fazlaşmasından sonraki işlemler ile çeliğin yapısal değişme ve özelliklere bağlı olarak üç farklı tipte gruplanmaktadır. Bunlar;

1. Yarı ostenitik çökelme paslanmaz çelikler
2. Ostenitik çökelme paslanmaz çelikler
3. Martenzitik çökelme paslanmaz çelikler [23].

2.7. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Paslanmaz çeliklerin fiziksel ve mekanik özellikleri alüminyum ve bakır gibi yaygın kullanılan demirdışı metallerden oldukça farklıdır. Ancak, çeşitli paslanmaz çelik aileleri karbonlu çeliklerle kıyaslandığında bazı farklılıklar olsa da özelliklerde birçok benzerlikler görülmektedir [18].

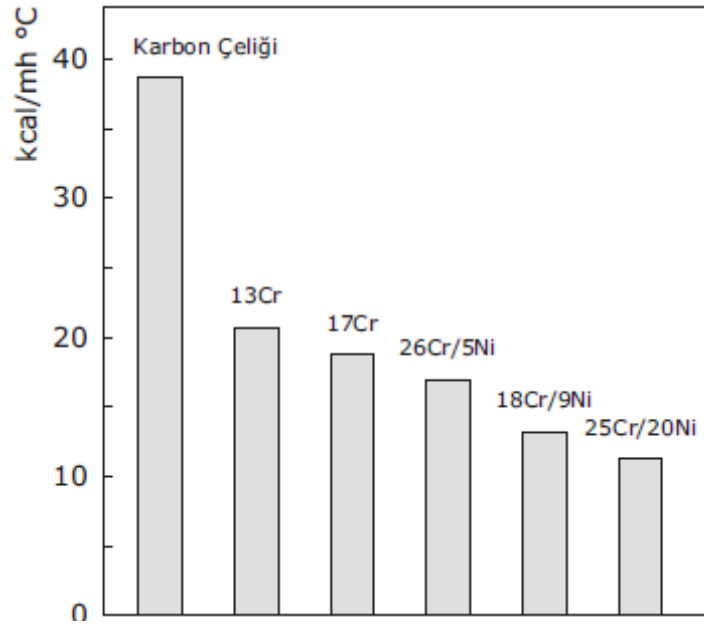
2.7.1. Fiziksel özellikler

Paslanmaz çelikler türlerine göre farklı fiziksel özellikler gösterirler. Tablo 2.9'da görüldüğü gibi elastisite modülü, ısıl genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik, özgül sıcaklık, manyetik geçirgenlik özellikleri ilgili bilgiler verilmektedir.

Tablo 2.9. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [1]

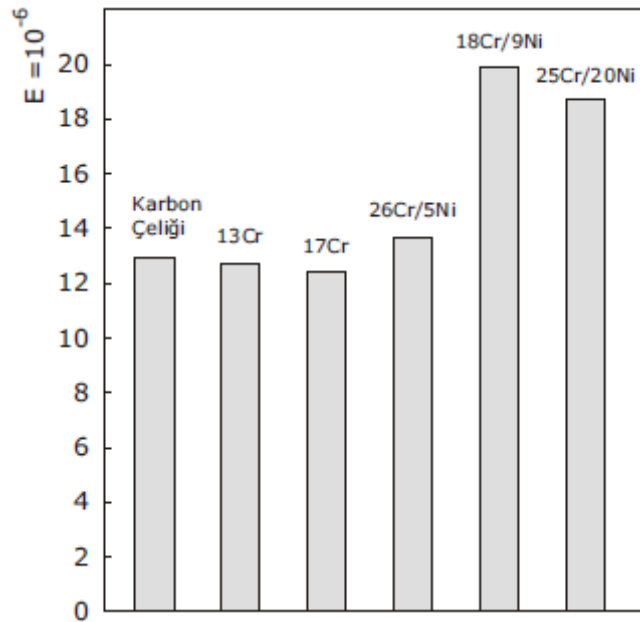
Fiziksel Özellikler	Ostenitik Paslanmaz Çelikler	Ferritik Paslanmaz Çelikler	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm ³)	8.0	7.8	7.8	7.8
Isıl genleşme Katsayısı (µm/m°C)	16.6	10.4	10.3	10.8
Isıl iletkenlik (W/mk)	15.7	25.1	24.2	22.3
Özgül Sıcaklık (J/k°K)	50	460	460	460
Elektriksel Direnç (µΩcm)	74	61	61	80
Manyetik Geçirgenlik	1.02	600 - 1100	700 - 1000	95
Ergime Aralığı (°C)	1375 - 1450	1425 - 1530	1425 - 1530	1400 - 1440

Paslanmaz çeliklerin ısı iletimi özelliği karbon çeliklerinkinden farklıdır. Örneğin yüksek kromlu çeliklerin ısıyı iletme kabiliyetleri karbon çeliklerinkinin yaklaşık yarısı kadardır. Ostenitik tip paslanmaz çeliklerde bu durum daha da belirgin olup, ısı iletim kabiliyeti karbon çeliklerinkinin üçte birine kadar düşmektedir (Şekil 2.19). Bu durum kaynak sırasında oluşan sıcaklığın kaynak bölgesinde daha uzun süre kalacağı ve dolayısı ile bazı zorluklarla karşılaşılabilen anlamına gelmektedir. Şekil 2.19'da çeşitli paslanmaz çeliklerin ısı iletim kabiliyetleri ile ilgili grafik verilmiştir [1].



Şekil 2.19. 20-100°C'de çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin ısı iletim kabiliyetleri [1]

Yüksek kromlu paslanmaz çelikler genellikle karbon çelikleri ile aynı genleşme katsayısına sahiptir. Ostenitik tip paslanmaz çeliklerde ise bu değer karbon çeliklerinkinden % 50 daha fazladır (Şekil 2.20). Bu konu sadece kaynakçıyı değil aynı zamanda konstrüksiyonu yapan mühendisi de yakından ilgilendirmektedir [1].



Şekil 2.20. 20-800 °C çeşitli paslanmaz çeliklerle karbonlu yapı çeliğinin uzama kabiliyeti [1]

2.7.2. Mekanik özellikler

Ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri Tablo 2.10'da verilmiştir. Bu malzemeler çözündürme ve ardından su verme ile tamamen sertleştirilmektedir. Bu nedenle tavlanmış durumda kullanılırlar. Böylece, yapı eş eksenli tanelere sahip ferritik matris içinde dağılmış olup, karbür parçacıklarından meydana gelmektedir. Ferritik paslanmaz çelikler bir miktar azot ve karbon içerdiklerinden dolayı daha çok uzama gösterirler. Tavlanmış şartlardaki bu alaşımların karbon ve azot içerikleri azaldığında darbe eğrileri artmakta, özellikle eksi sıcaklıklarda sünek-gevrek geçiş sıcaklığını düşürmek için düşük karbon düzeyi gerekmektedir [27].

Tablo 2.10. Ferritik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [1]

Çelik türü (AISI)	Isıl İşlem Durumu	Çekme Dayanımı (daN/mm ²)	Akma Dayanımı (daN/mm ²)	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	Sertlik (Rockwell)
405	Tavlı	480	275	30	60	B 80
409	Tavlı	450	240	25		B 75 M
429	Tavlı	490	310	30	65	B 88 M
430	Tavlı	515	310	30	60	B 82
430F	Tavlı	550	380	25	60	B 86
430Ti	Tavlı	515	310	30	65	
434	Tavlı	530	365	23		B 83 M
436	Tavlı	530	365	23		B 83 M
442	Tavlı	550	310	25	50	B 85
444	Tavlı	415	275	20		B 95 M
446	Tavlı	550	345	23	50	B 86
26-1Ti	Tavlı	470	310	20		B 95 M
29-4	Tavlı	550	415	20		B 98 M
29-4-2	Tavlı	550	415	20		B 98 M
18SR	Tavlı	620	450	25		B 90

Ostenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ostenitik yapıya sahip olduğundan ısıl işlemle çok önemli bir seviyede sertleşmezler. Buna karşılık soğuk deformasyona uğradıklarında dayanımları artırılabilir. Ostenitik paslanmaz çelikler mikroyapıdaki

ostenitin kararlı hale gelebilirliğine göre kararlı veya yarı kararlı ostenitik çelikler olmak üzere iki grupta toplanabilir. Kararlı ostenitik çelikler mikroyapıları soğuk deformasyondan sonra ostenitik olarak kalmaktadır. Yarı kararlı ostenitik paslanmaz çelikler ise soğuk deformasyondan sonra belirli düzeyde yapı martenzite dönüşerek ostenit ve martenzit karışımı meydana getirmektedir [27]. Tavlanmış şartlardaki bazı ostenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında mekanik özellikleri Tablo 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.11. Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [1]

Çelik Türü (AISI)	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı (daN/mm ²)	Akma Dayanımı % 0.2 (daN/mm ²)	Uzama (%)	Kesit Daralması	Sertlik (Rockwell)
304	Tavlı	586	241	55	65	B 80
304L	Tavlı	552	207	55	65	B 76
304N	Tavlı	586	241	30		
304LN	Tavlı	552	207			
308	Tavlı	586	241	55	65	B 80
308L	Tavlı	551	207	55	65	B 76
309	Tavlı	620	276	45	65	B 85
310	Tavlı	655	276	45	65	B 87
314	Tavlı	689	345	45	60	B 87
316	Tavlı	586	241	55	70	B 80
316L	Tavlı	538	207	55	65	B 76
316F	Tavlı	586	241	55	70	B 80
317	Tavlı	620	276	50	55	B 85
317L	Tavlı	586	241	50	55	B 80
321	Tavlı	599	241	55	65	B 80
347/348	Tavlı	634	241	50	65	B 84
329	Tavlı	724	552	25	50	B 98
330	Tavlı	550	241	30		B 80
330HC	Tavlı	586	290	45	65	

Martenzitik paslanmaz çeliklerde çekme özellikleri ısı işlemlerle bir miktar kontrol edilmektedir. Bu tür alaşımlar yüksek karbon içerdiklerinden martenzit oluşturmak için havada soğutma ve sonra temperleme gerekmektedir [27]. Martenzitik paslanmaz çeliklere ait mekanik özellikleri Tablo 2.12’de görülmektedir.

Tablo 2.12. Martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [1]

Çelik Türü (AISI)	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı (daN/mm ²)	Akma Dayanımı % 0.2 (daN/mm ²)	Uzama (%)	Kesit Daralması	Sertlik (Rockwell)
410	Tavlı	517	276	30	65	B 82
410	Temperlenmiş (427°C)	1344	1034	17	55	C 41
410S	Tavlı	414	207	22		B 95 M
410Nb	Temperlenmiş (Ara Tav)	862	689	13	45	
414	Tavlı	827	655	17	55	C 22
414	Temperlenmiş (427°C)	1379	1034	16	58	C 43
420	Tavlı	655	345	25	55	B 92
420	Temperlenmiş (315°C)	1586	1344	8	25	C 50
422	Temperlenmiş (Ara Tav)	965	758	13	30	
431	Tavlı	862	655	20	60	C 24
431	Temperlenmiş (427°C)	1413	1069	15	60	C 43
440A	Tavlı	724	414	20	45	B 95
440A	Temperlenmiş (315°C)	1793	1655	5	20	C 51
440B	Tavlı	738	427	18	35	B 96
440B	Temperlenmiş (315°C)	1931	1862	3	15	C 55
440C	Tavlı	758	448	13	25	B 97
440C	Temperlenmiş (315°C)	1965	1896	2	10	C 57

Dubleks paslanmaz çeliklerin çekme dayanımı ostenitik paslanmaz çeliklerle aynı olup, akma dayanımı ostenitik paslanmaz çeliklere göre üç kat fazladır. Bu nedenle dubleks paslanmaz çelikler yüksek akma dayanımı ve ağırlık azalması gibi özelliklerinden dolayı tasarımlar için önemli üstünlüktür. Bazı dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri Tablo 2.13’de verilmiştir.

Tablo 2.13. Dubleks paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [1]

Çelik Türü (AISI)	Çekme Dayanımı (daN/mm ²)	Akma Dayanımı % 0.2 (daN/mm ²)	Uzama (%)
2205	827	448	25
2304	758	414	25
255	758	552	15
2507	800	550	15

Bazı çökeltme yoluyla sertleşen paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri Tablo 2.14’de verilmiştir. Çökeltme yoluyla sertleşen paslanmaz çelikler çok yüksek akma ve çekme dayanımları sahiptir. Buna karşın uzamaları az olup sertlikleri yüksektir.

Tablo 2.14. Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [1]

Çelik Türü (AISI)	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı (daN/mm ²)	Akma Dayanımı % 0.2 (daN/mm ²)	Uzama (%)	Kesit Daralması	Sertlik (Rockwell)
PH13-8 Mo	H950	1517	1413	8	45	C 45
15-5 PH	H900	1310	1172	10	35	C 44
17-7 PH	Çözelti Tavlama	896	276	35		B 85
17-10 P	Çözelti Tavlama	613	255	70	76	B 82
17-10 P	H1300	986	676	20	32	C 32
Custom 450	Tavlı	862	655	10	40	B 30
Stainless W	Çözelti Tavlama	827	517	7		C 30

2.8. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Günümüzde çok yaygın olarak uygulama alanı bulan paslanmaz çelikler, değişik ark kaynağı yöntemleri ile kaynak edilebilirler; ancak paslanmaz çeliklerin farklı bileşimlerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemesi kaynak kabiliyetleri açısından kaynak problemlerini de beraberinde getirmektedir.

Paslanmaz çeliklerin kaynağında yaygın olarak, gazaltı kaynak yöntemleri, tozaltı kaynak yöntemleri hatta plazma ve elektron ışın gibi modern kaynak yöntemleri de kullanılabilir. Özlü elektrotlar ile kaynak ise henüz dar bir alanda uygulanmaktadır. Değişik ark kaynağı yöntemleri bütün paslanmaz çeliklerin kaynağı için uygun olmayabilir, zira çeliklerin bileşimindeki değişimler ve üretimlerinden gelen farklılıklar büyük rol oynar. Bundan dolayı sorunsuz kaynak edilebilmeleri için bir seri tedbire başvurulmak zorunluluğu vardır [7]. Bu sebeple deneyde kullanılan ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti detaylı olarak aşağıda anlatılmıştır.

2.8.1. Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan en önemli sorun, bu malzemenin 1150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tane irileşmesine karşı olan aşırı eğilimidir. Kaynak esnasında ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) bir bölümü 1150 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar ısınır ve dolayısı ile bu bölgede aşırı bir tane irileşmesi meydana gelir. Ferritik paslanmaz çeliklerde katı halde γ - α dönüşmesi olmadığından ısı işlem yardımı ile taneleri küçültmenin olanağı yoktur. Alında, ferritik paslanmaz çelikler çok ince taneli sünek bir yapıya sahiptirler. İri taneli bir yapı oluştuğunda gevrekleşirler, çentik darbe mukavemetleri azalır ve geçiş sıcaklığı yükselir. Tane irileşmesine mani olabilmek için, ferritik paslanmaz çeliklerin bileşimine bir miktar ($N \leq 0.25$) azot ilave edilir. Bu tür paslanmaz çelikler kaynağa daha uygun bir durum gösterirler. Elektrota ilave edilen bir miktar azot da kaynak metalinin katılaşması sonucunda ince taneli olmasına yardımcı olur. Ferritik paslanmaz çelikler daima bir miktarda karbon içerirler. Karbonun ferrit içinde çözünme miktarı çok az olduğundan, karbon tüm içyapı içinde ince bir şekilde

dağılmış karbürler halinde bulunur. Kaynak esnasında ITAB'da karbürlerin bir kısmı çözülür ve yerel ostenit bölgeleri meydana getirir. Oluşan ostenit, irileşen ferrit tanelerinin çevresinde bir ağ şeklinde yer alır ve soğuma esnasında bu ostenit martenzite dönüşür, dolayısı ile ITAB'da iri ferrit taneleri etrafında martenzit ağından oluşmuş bir yapı ortaya çıkar. Bu yapının sertliğine martenzit bir etkiye bulunmaz, zira miktarı çok azdır, ancak yapıyı kırılğan hale getirir [7,40].

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında ortaya çıkan bir tehlike de, ITAB'da oluşacak tanelerarası korozyona karşı aşırı hassasiyettir, özellikle stabilize edilmemiş %17 Cr'lu türlerde karşılaşılan önemli bir olaydır [7,40]. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında detaylı olarak anlatılacak olan bu olay, bu tür çeliklerin aksine ferritik çeliklerde 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklardan hızlı soğuma halinde bile ortaya çıkmaktadır, zira ostenitik karışık kristaller ile karşılaştırıldığında ferritik yapı içinde krom karbür çökmesi daha yüksek oranlarındadır. Bu tür çelikler kaynak edildiklerinde dikişe komşu bölgede tanelerarası korozyona karşı hassaslaşırlar, çünkü ısıl etkilere uzun süre maruz kalmaktadırlar. Krom karbürler önce çözülür, soğuma esnasında yer alabildiğince çabuk gerisin geriye tane sınırlarına partiler halinde çökerler. Stabilize edilmemiş %17 Cr'lu çeliklerin kullanıldığı, kaynaklı bağlantılar kaynaktan hemen sonra 700-800 °C'de bir tavlama işlemine tabi tutularak tanelerarası korozyona karşı dirençli hale getirilebilirler [8].

Ferritik paslanmaz çeliklerde tanelerarası korozyona hassasiyeti önlemek amacıyla karbon miktarı %0.03'ün altına düşürülerek ve çeliğin bünyesine bir takım alaşım elementleri katılarak tane sınırlarında krom karbür çökmesi problemi halledilmiş ancak bu yeni bileşimlerde de σ -fazı gevrekleşmesi olduğundan bu yöntem geçici bir çözüm olarak kalmıştır. Paslanmaz çelik üreticileri bu yeni türlerin kaynağı için yeni kaynak yöntemlerinin kullanılmasını önermektedirler. Eğer ferritik paslanmaz çelikler titanyum veya niyobyum ile stabilize edilmişlerse, kaynaklı bağlantıları tanelerarası korozyona karşı, ısıl işlem yapmaksızın dirençli olmaktadır [8].

Bu tür çeliklerin kaynağında ortaya çıkan önemli iki sorunda σ -fazı oluşumu ve 475 °C gevrekleşmesidir. σ -fazı sert, gevrek bir metallerarası bileşiktir. Bu fazın oluşumunda yüksek krom miktarı, molibden ve soğuk şekillendirme büyük rol oynar.

Bu faz sıcaklığın 600-900 °C arasında tutulması sonucunda ortaya çıkar; bileşimi yaklaşık olarak %52 Cr ve %48 Fe'den oluşmaktadır [1-22]. σ -fazi, 900 °C'nin üzerinde bir sıcaklığa ısıtılmakla ve hemen soğutulmakla önlenir. Ancak bu tür paslanmaz çeliklerde 1000 °C'ye ısıtmak sertlik ve işlenebilirlik kabiliyetlerini olumsuz yönde etkiler [1-3]. Bu bakımdan bu tür paslanmaz çeliklere hiçbir zaman 400 °C'nin üzerinde bir ön tavlama uygulanmamalıdır [8].

%17-26 Cr içeren paslanmaz çelikler 450-525 °C'ye ısıtıldıklarında 475 °C gevrekleşmesi adı verilen bir sertleşme ve gevrekleşme ortaya çıkar. Kaynaklı bağlantılarda nitrik asite karşı korozyon hassasiyetini etkileyen bu gevrekleşme, 700-800 °C'de kısa süreli bir tavlama ve bunu takip eden suda soğutma ile giderilebilir [7].

Yüksek miktarlarda krom ve karbon içeren ferritik paslanmaz çeliklere, ITAB'ın özelliklerinin iyileştirilmesi bakımından 200 °C'lik bir ön tavlama uygulanabilir, diğer hallerde bu çeliklerin kaynağında bir ön tavlama uygulanmaz.

Ferritik paslanmaz çeliklere kaynaktan sonra 750-850 °C'lik bir tavlama takiben hızlı bir soğutma, ITAB'ın sünekliğinin ve tanelerarası korozyona direncinin artmasına yardımcı olur. Kaynak edilmiş parçaların soğuk şekillendirmesi ve zorlanması 300-400 °C'lik bir ön tavlama sonrası yapılmalıdır. Zira bu çeliklerin şekil değiştirme kabiliyetleri bu sıcaklıklarda hissedilebilir şekilde artmaktadır. Kaynak dikişinde erimiş bölgede tane irileşmesinin neden olduğu gevrekliğe ostenitik elektrot kullanılarak mani olunabilir [7,8].

2.8.2. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı

Nikel kuvvetli ostenit yapısı olan bir element olduğundan, bu tür çeliklerde katılaşma sırasında ortaya çıkan ostenit oda sıcaklığının altındaki sıcaklık derecelerinde bile dönüşmeden kalır. Soğuma esnasında γ - α dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler de su yolu ile sertleştirilemezler. Antimagnetik olan bu tür çeliklere genellikle korozyon mukavemetini arttırmak için bir miktarda molibden katılır. Bu tür paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti açısından en önemli özellikleri şunlardır;

- a) Isı iletme katsayıları oda sıcaklığında, az alaşımlı ve karbonlu çeliklerin yaklaşık üçte biri kadardır,
- b) Isıl genleşme katsayıları karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin yaklaşık 1.5 katı yani % 50 fazladır,
- c) Bu tür çeliklerin elektrik iletme dirençleri, alaşımsız çeliklere karşın dört ile yedi kat daha büyüktür.

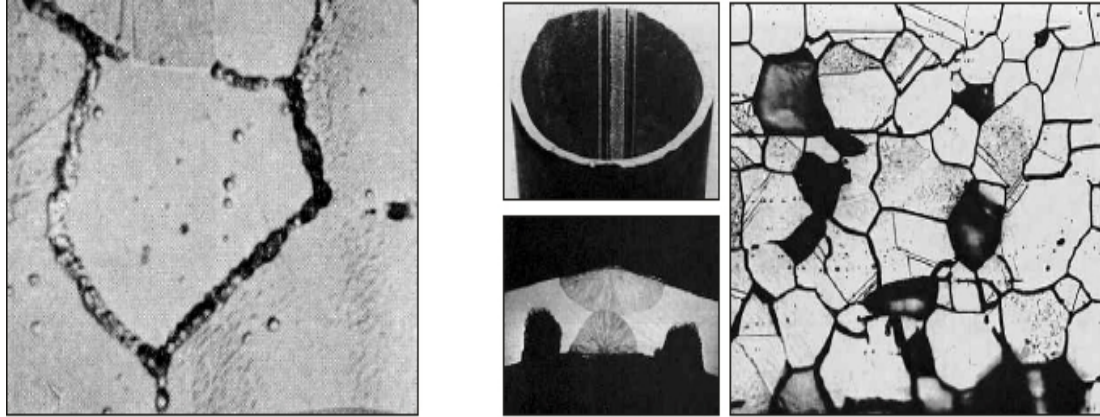
Bu özelliklerinden dolayı, ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, normal karbonlu çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekme meydana gelir. Kaynak dikişinin soğuması esnasında büzölmelerin oluşması sonucunda, bu bölgede oluşan şiddetli iç gerilmeler çatlama tehlikesine yol açar. Bu tür paslanmaz çeliklerin çift taraflı iç köşe dikişlerinde sıcak çatlakların oluşma olanağı çok fazladır. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetini etkileyen fiziksel özelliklerin yanı sıra bir dizi metalurjik etkende bu tür çeliklerin kaynağında önemli rol oynar; bunlar δ -ferrit fazının oluşumu, tanelerarası korozyona hassasiyet, gerilmeli korozyona hassasiyet ve σ -fazının oluşmasıdır [2].

Yukarıda anlatılanlara göre ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında başlıca üç kaynak problemi ile karşılaşılabilir. Bunlar sırası ile; 1) ısının etkisi altında kalan bölgede “Krom Karbür” oluşması sonucu meydana gelen hassas yapı, 2) kaynak dikişinde görölen “Sıcak Çatlak” oluşumu ve 3) yüksek çalışma sıcaklıklarında karşılaşölan “Sigma (σ) Fazı” oluşumu riskleridir.

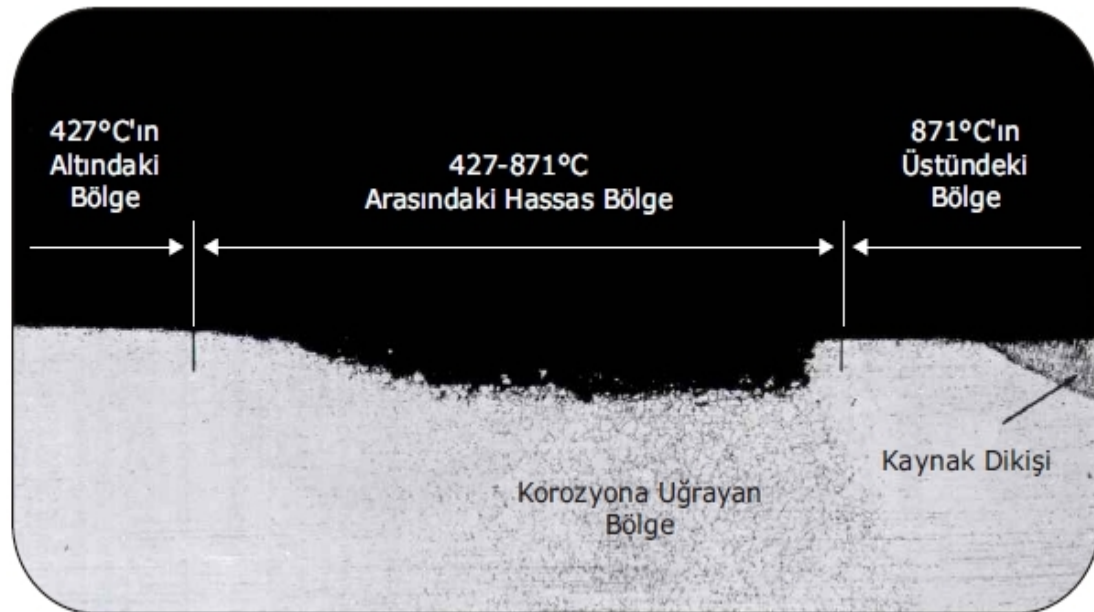
2.8.2.1. Krom karbür oluşumu

Isının etkisi altında kalan bölgenin 427-871 °C sıcaklığına kadar ısınan bölümünde yer alan tane sınırlarında çökelen ve taneler arası korozyonu hızlandıran karbürler burada hassas yapı oluşmasına neden olurlar. Bu oluşum sırasında Şekil 2.21’de göröldüğü gibi bir miktar Cr çözültiden tane sınırlarına doğru yer değıştirir ve bunun sonucunda bu bölgesel alanlarda Cr miktarında azalma olacağı için korozyon dayanımı düşer. Bunun sonucu olarak malzeme korozif bir ortamda bulunduğunda, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon oluşur. Bu şekilde ortaya çıkan

tanelerarası korozyon bütün malzemeyi çok kısa bir zamanda kullanılamaz hale getirir. Çeliğin karbon içeriği artıkça bu olay şiddetlenir [6].



Şekil 2.21. 18 Cr / 8 Ni (0.10 C)'lu paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi (x1200) [6]



Şekil 2.22. Krom karbür çökmesi sonucu hassas bölgede oluşan korozyon [6]

Bu sorun, kromla birleşerek krom karbür oluşmasına neden olan karbonun yapıda düşük seviyelerde tutulduğu düşük karbonlu (L tipi) ana metalin ve dolgu metallerinin kullanılmasıyla önlenir. Bunun yanında kaynak işleminin ön tav uygulanmadan yapılması ısı girdisinin düşük seviyede tutulmasına ve bakır altlık

kullanarak hızlı soğuma sağlanması hassas sıcaklık arasında kalma süresinin kısa tutulması açısından önemlidir [6].

Diğer bir yöntem, stabilize edilmiş paslanmaz çelik ana malzemelerin ve dolgu metallerinin kullanılmasıdır. Bu sayede stabilizatör görevi gören alaşım elementleri karbon ile reaksiyona girecek ve Cr miktarının azalmadan yapıda kalması sağlanacağından korozyon dayanımında herhangi bir düşme ile karşılaşılmayacaktır. 321 kalite paslanmaz çelikler stabilizatör olarak (Ti) içerirken 347 türü paslanmaz çelikler Nb (Nb+Ta) ile stabilize edilmişlerdir. Her iki element de Cr'dan daha güçlü karbür oluşturma özelliğine sahiptir [6].

Bunların dışında kalan bazı ısıl işlem yöntemleri pahalı olmaları, pratik olmamaları ve parçalarda çarpımalara yol açmaları nedeniyle pek tercih edilmezler [6].

2.8.2.2. Sıcak çatlak oluşumu

Sıcak çatlamanın temel nedeni S ve P gibi elementlerin oluşturduğu ve tane sınırlarında toplanma eğilimi yüksek olan düşük ergime sıcaklığına sahip metalik bileşimlerdir. Bu bileşimler eğer kaynak dikişinde veya ısının etkisi kalan bölgede bulunuyorsa tane sınırlarına doğru yayılırlar. Kaynak dikişi soğurken ve çekme gerilmeleri oluştuğunda çatlama neden olurlar [6,41].

Sıcak çatlak oluşumu dolgu metalinin ve ana metalin kimyasal analizinin ostenitik matriksde düşük miktarda ferrit içeren bir mikro yapı elde edilecek şekilde ayarlanmasıyla önlenir. Ferrit, kükürt ve fosfor bileşimlerini kontrol altında tutabilecek ve ferritik ostenitik yapıya sahip olan tane sınırları oluşturacak sıcak çatlak oluşumunu engeller. Bu sorun S ve P miktarlarının çok düşük seviyelerde tutulması ile de giderilebilir, ancak bu durumda çeliklerin üretim maliyetleri belirgin bir şekilde artacaktır [6,41].

Sıcak çatlama riskine karşı dayanım elde edebilmek için yapıdaki ferrit miktarının en az %4 olması önerilmektedir. Ferritin varlığı (Amerikan Kaynak Birliği) AWS A4.2'ye göre kalibre edilen manyetik ölçüm aletleriyle sağlıklı bir şekilde

belirlenebilir. Bunun dışında dolgu malzemesinin ve ana metalin kimyasal analizi biliniyorsa, çeşitli diyagramlar kullanılarak da bir tahminde bulunmak mümkündür. Bu diyagramlarda paslanmaz çelik alaşım elementleri etkinlik dereceleri ferrit dengeleyicileri $(Cr)_{eş}$ ostenit dengeleyici $(Ni)_{eş}$ şeklinde gruplayarak değerlendirilmektedir. Bu diyagramlardan en bilineni ve eski olanı 1948 yılında Schaeffler tarafından geliştirilen diyagramdır (Bkz. Şekil 2.10). Schaeffler diyagramı çok uzun yıllar kullanılmasına karşın, azotun etkisini hesaba katmaması ve diyagramdan elde edilen verilerin, belirlenen ferrit yüzdeleri ile farklılıklar göstermesi nedeniyle günümüzde etkinliğini kaybetmiştir. Bunun yerine Delong diyagramı geliştirilmiştir (Bkz Şekil 2.10). Delong diyagramını Schaeffler diyagramından ayıran en önemli özellik nikel eşdeğeri hesaplanırken yapıdaki azot miktarının da göz önüne alınması ve sonucun ferrit yüzdesine ek olarak “FN-Ferrit Numarası” ile belirtilmesidir. Günümüzde en sık kullanılan ve en sağlıklı sonucu veren WRC-1992 diyagramıdır [1] (Bkz. Şekil 2.11).

2.8.2.3. Sigma (σ) fazı oluşumu

Sigma fazı, çok sert manyetik olmayan ve gevrek yapıya sahip metaller arası bir bileşiktir. Röntgen ışını ile yapılan analizde bileşim yaklaşık %52 Cr ve %48 Fe'den oluştuğu ancak bunun yanında Mo gibi diğer alaşım elementlerini de içerebildiği görülmüştür. Sigma fazı Cr'lu ve Cr-Ni esaslı paslanmaz ve ısıya dayanıklı çeliklerin kaynak bölgesinde oluşur. Saf ostenitik yapıdaki sigma fazı oluşum hızı, ostenitik kütle içerisinde ferrit içeren yapıdakine oranla daha düşüktür [1].

Sigma fazı ile karbür çökmesi birbirinden tamamen farklı iki oluşumdur. Sigma fazı kırılma hızı 650-850 °C sıcaklıkları arasında görülür ve bu sıcaklık aralığında kalma süresi ile oluşan yapının yoğunluğu arasında yakın bir ilişki vardır. Faz dönüşüm hızının en yoğun olduğu sıcaklık 720 °C civarındadır. Yapıda bulunan ferrit miktarının %3-4 ile sınırlı tutulması durumunda ostenit tanelerin etrafı ferrit ile çevrilmeyecek ve kırılma riski önlenecektir. Buna karşın ferrit miktarının %12'yi geçmesiyle birlikte elastiklik kabiliyeti hızla azalacaktır [1].

Kaynak işlemi sırasında banyonun çok hızlı soğuması nedeniyle sigma fazı kolay oluşmaz. Bu sorun esas olarak ferrit içeriği çok yüksek olan bir kaynaklı bağlantının kaynak işleminden sonra uzun süre yüksek sıcaklık değerlerinde kalacak bir çalışma ortamlarında kullanılması durumunda ortaya çıkar.

Sigma fazı konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

1. Sigma fazının oluşumu 750 °C de 650 °C' dakinden daha çabuk meydana gelir. 750 °C' de 30 saat gibi bir zamana gereksinim varken bu süre 650 °C' de bir haftaya çıkar.
2. Sigma fazı oluşumu soğuk şekil değiştirme ile hazırlanır.
3. Sigma fazı oluşumuna kuvvetli olarak etki eden elementler; Mo, Cr, Nb ve Si'dir.
4. Sigma oluşumunu kuvvetlendiren elementlerin miktarı yüksek ise, belirli şartlar altında, kaynağa bağlı olmadan ve ısıl işlem uygulamadan da sigma fazı meydana gelebilir.
5. Sigma fazı, 950-1100°C sıcaklıkları arasında belirli bir süre tavlandıktan sonra suda hızlı olarak soğutularak giderilebilir.
6. Sigma fazının giderilmesi için uygulanan ısıl işlemlerden sonra oluşan ferrit miktarı, ısıl işlem uygulanmamış yapıdakine oranla daha fazladır.
7. Ferrit miktarı, parçaya 1150 °C 'de homojenleştirme tavlama uygulanarak daha da düşürülebilir. Bu durumda ferrit mikro toplanmalar şeklinde oluşur.
8. 300-400 °C' nin üzerinde oluştuğu iyi çentik değerleri elde edildiği için, yüksek işleme sıcaklığında çalışan konstrüksiyonlarda, sigma fazının neden olduğu gevrekleşmeden korkulmamalıdır.
9. Sigma fazının neden olduğu kırılmalık, kaynak bölgesinin tavlama yapılmadan önceki durumunda içerdiği ferrit miktarına bağlıdır. Eğer kaynak bölgesi başlangıçta %6.5 ferrit içerirse, sigma dönüşmesi çentik darbe dayanımının azalmasına neden olmaz. Burada ferrit miktarı az olduğu için ferrit ostenitik yapı içerisinde ağ şeklinde değil, izole edilmiş odacıklar halinde meydana gelir. Bu yolla elde edilen sigma yapıya bir süneklik kazandırmaktadır [1].

2.9. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Paslanmaz çeliklerin bazı sınırlamalar dışında uygulamadaki tüm kaynak yöntemleri ile uygun bir şekilde birleştirilebildiği söylenebilir. Kaynak yönteminin tercih edilmesinde aşağıdaki faktörler göz önüne alınır;

1. Cihazların varlığı, kurulması ve kullanılabilirliği,
2. Malzemenin kalınlığı,
3. Kaynağın gerçekleştirileceği ortam,
4. Kaynak pozisyonu,
5. Paslanmaz çelik malzemenin türü,
6. Yardımcı ekipmanların durumu ve sağlanması [42].

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

- Örtülü elektrot ile ark kaynağı
- Gazaltı kaynağı
- Eriyen elektrot ile gazaltı kaynağı (MIG)
- Ergimeyen elektrot ile gazaltı kaynağı (TIG)
- Plazma arkı ile kaynak
- Tozaltı kaynağı
- Elektron ışın kaynağı
- Lazer ışın kaynağı
- Direnç nokta veya dikiş kaynağı
- Sürtünme kaynağı
- Difüzyon kaynağı

Paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde uygulamadaki tüm kaynak yöntemleri kullanılabilmesine rağmen özellikle ince sac levhaların kaynağında elektrik direnç kaynak yöntemleri bazı özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv endüstrisinde daha çok tercih edilmektedir. Bu özellikler şöyle sıralanabilir,

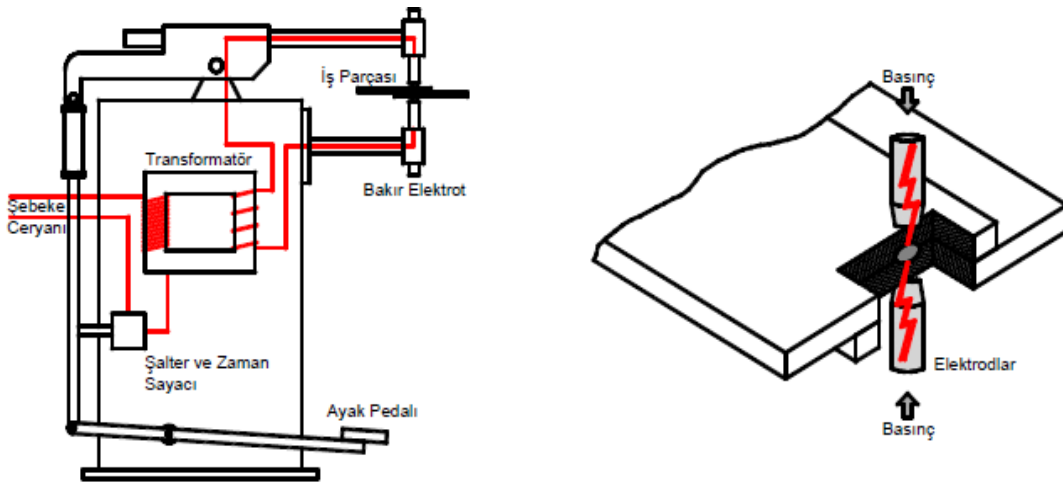
1. Seri üretime uygunluk,
2. Kaynak operatörünün az bir bilgiye sahip olarak yüksek kalitede imalat yapabilmesi,
3. Hızlı bir şekilde imalat yapılabilmesi,
4. Düşük işçilik giderleri,
5. Ek kaynak metali kullanılmadığından dolayı hafif bir birleştirme elde edilmesi,
6. Yüksek kaynak mukavemeti elde edilmesi,
7. Görünüm olarak diğer kaynak yöntemlerine göre daha düzgün kaynak bağlantıları elde edilmesi [9]

Dünyanın en büyük endüstrisinin otomotiv endüstrisi olduğu düşünülürse elektrik direnç kaynak yöntemlerinin uygulanmalarının önemi daha açık şekilde ifade edilmiş olur. Bu sebeple bu çalışmada elektrik direnç nokta kaynağı tercih edilmiştir ve bu kaynak yöntemi bölüm 3’de detaylı olarak anlatılmıştır.

BÖLÜM 3. ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

3.1. Direnç Nokta Kaynağı Prensibi

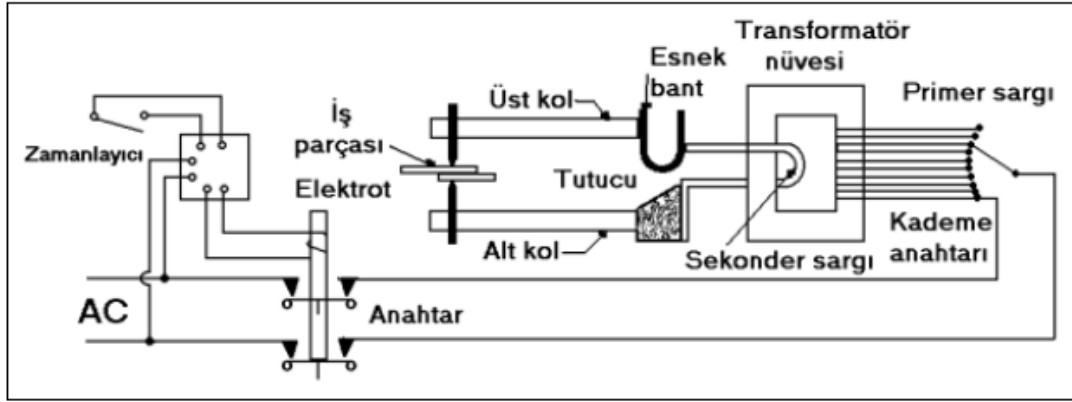
Elektrik direnç nokta kaynağı; elektrotlar arasında basınç altında bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı, iş parçalarının gösterdiği direnç nedeniyle meydana gelen ısı ile yapılan kaynak yöntemidir. Kaynak edilecek parçaların temas yüzeyi, kısa bir süre tatbik edilen düşük gerilim ve yüksek akım ile ısıtılarak erimiş haldeki kaynak çekirdeğine dönüştürülür. Elektrik akımı kesilince, erimiş metal hızla soğur ve katılaşır. Bu sırada elektrotlar, kaynak edilen parçaları sıkı bir şekilde tutmaya devam ederler daha sonra geri çekilerek parçayı serbest bırakırlar. Kaynak işlemi genellikle 1 sn'den daha kısa bir sürede tamamlanır. Elde edilen kaynağın şekli ve boyutu öncelikle elektrot ucunun boyutu ve çevresi ile belirlenir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi kaynak çekirdeği iki parçanın temas yüzeylerinde meydana gelir ve dış yüzeylere kadar yayılmaz. Kesit alınırsa, uygun bir şekilde yapılmış kaynağın çekirdeğinin oval şeklinde olduğu görülür. Üstten görünüşü ise elektrot yüzeyinin şeklinde ve yaklaşık aynı boyuttadır [43].



Şekil 3.1. Direnç nokta kaynak makinesinin temel bileşenleri ve kaynak bölgesi [44]

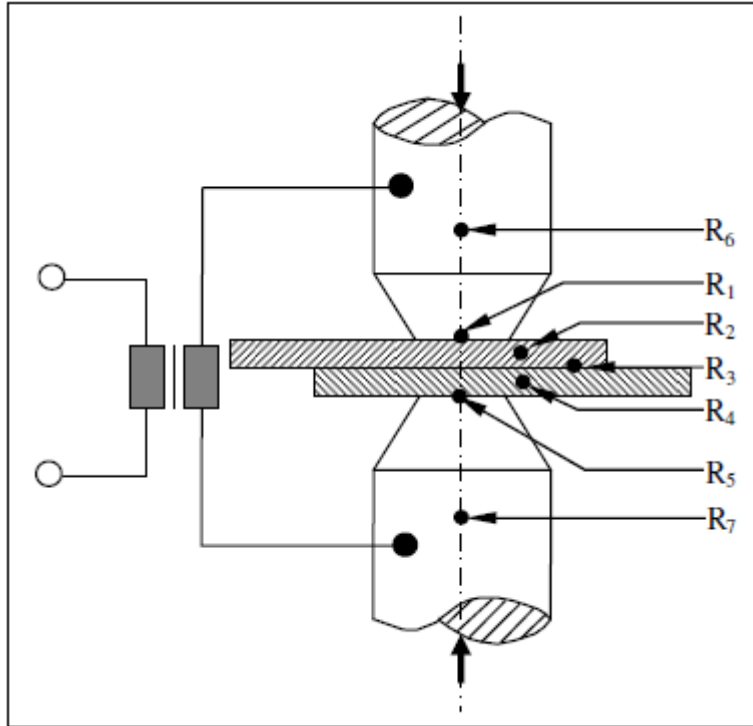
Kaynak noktaları, parçaların elektrot kuvveti ile çarpılması sonucu kaynak noktasından metalin kıvılcım halinde fırlamasını önlemek için kenarlarından yeteri kadar uzakta olmalıdır. Diğer yandan, paralel akım devrelerinin meydana gelmesini önlemek veya makul bir seviyede tutabilmek için, birbirini takip eden kaynak noktaları ve hatları arasındaki mesafe yeteri kadar büyük olmalıdır [45].

Kaynak için gerekli akım, yüksek gerilim ve düşük akım şiddetindeki şebeke elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetinde kaynak akımına çeviren kaynak makinesinden sağlanır (Şekil 3.2). Gerekli basınç veya elektrot kuvveti, hidrolik, pnömatik veya mekanik donanımlarla gerçekleştirilir [40,46].



Şekil 3.2. Direnç nokta kaynak makinesinin elektriksel sistemi [43]

Kaynak işlemi, bir düğmeye ya da pedala basarak makineyi devreye sokan ve devreden çıkaran operatörler tarafından hızla gerçekleştirilir. Bu nedenle, özellikle ark kaynağı, gaz kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme gibi diğer termik birleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kaynak başına düşen işçilik masrafı bu yöntemde oldukça düşüktür. Diğer yandan, direnç kaynağı makineleri, diğer kaynak yöntemleri için gerekli teçhizatın maliyetleri ile karşılaştırıldığında daha pahalıdır. Bu kaynak yöntemi, ilave malzeme kullanılmadığından, sağladığı hafiflik, yüksek kaynak mukavemeti, estetik, özel kaynak beceri gerektirmemesi ve kaynak hızının yüksek oluşu gibi nedenlerle, günümüzde otomotiv ve uçak endüstrisinde ve metal eşya imalatında büyük ölçüde kullanılmaktadır [47].



Şekil 3.3. Direnç nokta kaynağında meydana gelen dirençler [48]

Şekil 3.3’de elektrik direnç nokta kaynağında meydana gelen dirençler gösterilmiştir. Buna göre; I akımı, R ohmik direncinden, t süresince geçtiğinde, Joule kanununa bağlı olarak, Q birim ısı açığa çıkar.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (3.1)$$

$$\text{Burada, } R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \text{ dir.} \quad (3.2)$$

Yani sekonder devredeki toplam dirençtir. Bu dirençler (Şekil 3.3);

1. Malzeme dirençleri:

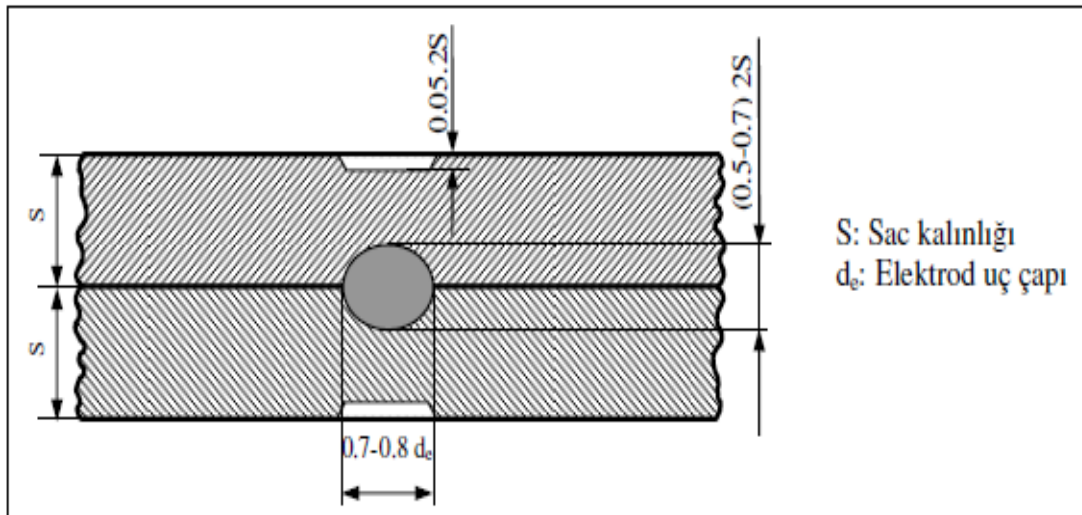
- R_6, R_7 elektrotların direnci
- R_2, R_4 iş parçalarının dirençleri

2. Temas dirençleri:

- R_1, R_5 elektrot-malzeme temas direnci
- R_3 malzeme-malzeme temas direnci

Malzeme direnci, malzemenin fiziksel özelliklerinden kaynaklanır ve değişken değildir. Temas dirençleri ise malzemenin ve elektrotların uç durumlarına bağlı olarak değişir. Kaynak sırasında R_3 , en büyük ısının gerçekleşeceği direnç olarak seçilir. Diğer dirençlerdeki ısınmaların mümkün olduğunca küçük olması gerekir. Bu ise, I_k kaynak akımının, t_k kaynak süresinin ve F elektrot kuvvetinin seçimiyle sağlanır. R_1 , R_3 ve R_5 temas dirençleri bağlantının kalitesine etki ederler. R_3 kaynak bölgesindeki sıcaklık, malzemenin t_e ergime sıcaklığının üzerine çıkar. Burada sıvılaştıran malzeme, kaynak sonrasında kaynak çekirdeğini oluşturur. R_1 ve R_5 temas bölgelerindeki ısınma, mümkün olduğunca düşük tutulur. Bu ise, iyi ısı ileten elektrot ve malzeme yüzeyleriyle sağlanır. Yüzeylerdeki pas, yağ ve boya gibi iyi ısı iletmeyen tabakaların olmaması gerekir. Temas dirençleri, farklı büyüklükte ısı miktarlarına ve bağlantı dayanım özelliklerinin farklılaşmasına yol açar [49].

Direnç nokta kaynağında, hatalı kaynak dikişlerinden kaçınmak için, elektrot kuvveti, akım uygulaması sonu arttırılmaktadır. Nokta çapının büyüklüğü kullanılan elektrotun çapına bağlı olarak ortaya çıkar. Kusursuz kabul edilen bir birleşmede bu çap $(0.7-0.8) d_e$ olarak verilmektedir. İdeal olarak bu çapın, elektrot çapına eşit olması gerekmektedir. Kaynak noktasının diğer boyutları, alabilecekleri en büyük değerler olarak Şekil 3.4’de verilmiştir [50].



Şekil 3.4. Direnç nokta kaynağının boyutları [50]

3.2. Direnç Nokta Kaynağı Kabiliyeti

Elektik direnç kaynağında, birleştirilecek parça malzemenin cinsine göre elektrik akımının geçişine büyük bir direnç gösterir. Bunun sonucu olarak, parçalar ısınır. Ohm kanununa göre ısıya dönüşen elektrik enerjisi Eşitlik 3.1'deki ifadeyle ($Q=I^2.R.t$) belirlenir. Burada Q ısı enerjisine dönüşen elektrik enerjisi, I kaynak yapılan parçadan geçen akım şiddeti, R kaynak yapılan parçanın elektrik direnci, t ise akımın geçti zaman aralığıdır [46].

Buna göre Eşitlik 3.1'deki ifadeden, elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyetinin malzemenin cinsine bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Elektrik direncinin düşük olması; ortaya çıkan ısı miktarını azaltacağından, kaynak yapılması güçleşir. O halde; elektrik iletkenliği yüksek bir malzemenin kaynak kabiliyeti, elektrik iletkenliği düşük malzemeye göre daha kötüdür. Elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyetinin tarif edilmesinde malzemenin ısı iletkenliğinin ve erime noktasının da göz önüne alınması gerekmektedir. Isı iletkenliğinin yüksek olması, kaynak için gerekli ısı yoğunlaşmasını zorlaştırmaktadır. Bu sebepten ısı iletkenliği yüksek bir malzemenin elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyeti düşük olmaktadır. Diğer taraftan erime noktasının yüksek olması, kaynak için gerekli ısı miktarını artırmaktadır [46].

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı malzemenin elektrik iletkenliği, ısı iletkenliği ve erime noktası göz önüne alınarak elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyeti aşağıdaki ifadeyle verilebilir:

$$S = \frac{10^4}{\alpha \cdot \lambda \cdot t_e} \quad (3.3)$$

Burada;

- S : Kaynak kabiliyeti faktörü
- α : Elektrik iletkenliği (m/n.mm²)
- λ : Isı iletkenliği (cal/cm.sn.°C)
- t_e : Erime noktası (°C)

Eşitlik 3.1'deki ifade ile bulunan kaynak kabiliyeti faktörlerine göre elektrik direnç kaynağında kaynak kabiliyeti aşağıdaki Tablo 3.1'deki gibi değerlendirilir:

Tablo 3.1. Kaynak kabiliyetinin değerlendirilmesi [46]

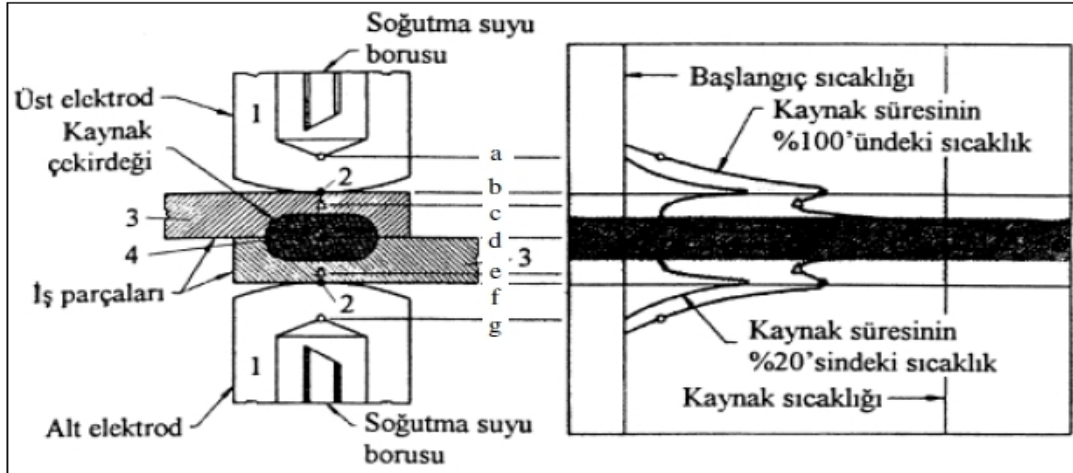
Kaynak kabiliyeti faktörü	Kaynak kabiliyeti durumu
0.25 kadar	Kötü
0.25-0.75 arası	Yeterli
0.75-2.0 arası	İyi
2.0'dan yukarı	Çok iyi

Tablo 3.2. Bazı alaşımların fiziksel özellikleri ile kaynak kabiliyeti faktörleri ve durumu [46]

Alaşımlar	Elekt. İlet. (m/n.mm ²)	Isı İlet. (cal/cm.sn.°C)	Erime Nok. (°C)	Kaynak. Kab. Fak. (S)	Kaynak Kab. Dur.
Karbonlu çelik	6	0.12	1490	9.3	Çok iyi
Ostenit	3.5	0.05	1420	40.0	Çok iyi
Alüminyum Alaşımları	22	0.37	610	2.0	İyi
Magnezyum Alaşımları	16	0.28	620	3.6	Çok iyi

3.3. Kaynak Sırasında Sıcaklık Dağılımı ve Kaynak Çekirdeği Oluşumu

Direnç nokta kaynağı makinelerinin sekonder devreleri, kaynak edilecek parçalar dahil bir seri dirençten meydana gelmiştir. Bu dirençlerin toplamı elektrik akım şiddetini tayin eder. Elektrik akımı devrenin her noktasında, o noktanın direncinden bağımsız olarak, aynıdır. Bununla beraber herhangi bir noktada meydana gelen ısı, doğrudan o noktadaki direnç ile orantılıdır. Sekonder devreyi meydana getiren elektriksel sistem, istenilen noktada ısı meydana getirecek ve sistemin geri kalan elemanlarının nispi olarak soğuk kalmasını sağlayacak şekilde etüt edilmiştir. Uygulanan akımla birlikte ısı bir noktada oluşmaz. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi 7 bölgenin dirençleri doğrultusunda ısı üretilir. İstenilen ısı bölgesi 4 nolu bölgedir. Bunun dışındaki noktalarda oluşan ısıların engellenmesi istenir. Başlangıç sıcaklığı düşey çizgiyle belirtilmiştir. En büyük direnç 4 düzleminde. Bu nedenle en yüksek ısı bu bölgede oluşur ve 2 ve 6 noktalarında ikinci derece etkili olan dirençler mevcuttur. Buna paralel olarak 2 ve 6 bölgelerinde ısı hızla artar [40,46].



Şekil 3.5. Direnç nokta kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık gradyanı [46]

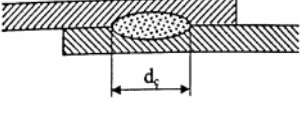
Bu dirençler;

1. Elektrot direnci,
2. Elektrot-levha arası temas direnci,
3. Levha direnci,
4. Levhalar arası temas direncidir.
 - a) Üst elektrot direnci
 - b) Üst elektrot ile üst levha arasındaki temas direnci
 - c) Üst levhanın direnci
 - d) Üst levha ile alt levha arasındaki temas direnci
 - e) Alt levhanın direnci
 - f) Alt levha ile alt elektrot arasındaki temas direnci
 - g) Alt elektrot direnci

Kaynak süresindeki %20'ye karşılık gelen çizgi, kaynak akımının uygulandığı ilk anlarda oluşmaktadır. Kaynak süresinin %100'ündeki sıcaklık çizgisi maksimum noktadaki ısıyı görmektedir. Bu nedenle 2 ve 6 düzlemlerindeki ısı bu düzlemlere temas eden 1 ve 7 düzlemindeki su soğutmalı elektrotlara doğru hızla iletir. Diğer bölgelerdeki ısılardan 4 düzleminde oluşan ısı her zaman yüksektir. Parçaların birleşmesi 4 bölgesinde oluşacak ve sonuçta ergimeyle birlikte kaynak çekirdeği oluşacaktır [46].

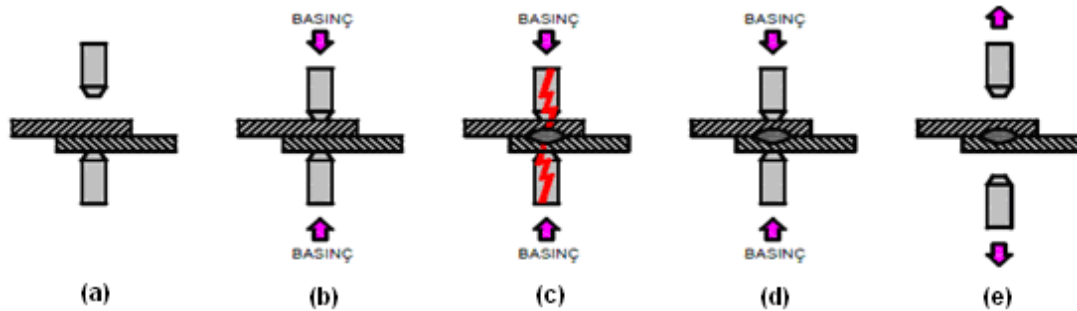
Kaynak noktaları, parçaların elektrot kuvveti ile çarpılması sonucu kaynak edilen noktadan ergiyik metalin kıvılcım şeklinde sıçramasını önlemek için kenarlardan yeterince uzak olmalıdır. Ayrıca, parça üzerinde kaynak edilen noktanın haricinde paralel akım geçişlerini önlemek için ardışık kaynak noktaları arasındaki mesafe yeteri kadar büyük olmalıdır [51]. Kaynak çekirdeklerinin, kaynağın yapıldığı sac kalınlığına bağlı olarak boyutları değişmektedir. Tablo 3.3’de değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları verilmektedir.

Tablo 3.3. Değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları [51]

Tek sacın kalınlığı	mm				
	0.5	1.0	1.5	2.0	
	En Büyük	6.0	9.0	10.0	13.0
	En Küçük	2.5	4.0	5.0	7.0

3.4. Kaynak Çevrimi

Bütün direnç kaynağı metotları, uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı düzenlemesini gerektirir. Kaynak bölgesinin ısınma ve soğuma hızları, zaman ekonomisi bakımından mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Genel olarak direnç nokta kaynağı çevrimi 4 ana zaman diliminden oluşur. Bunlar Şekil 3.6’da gösterilmiştir.[43,52]



Şekil 3.6. Direnç nokta kaynağının işlem basamakları [44]

Bunlar;

1. Yaklaşma ve sıkma zamanı (a-b)
2. Kaynak zamanı (c)
3. Tutma zamanı (d)
4. Ayrılma zamanı (e)

3.4.1. Yaklaşma ve sıkma zamanı

Elektrot kuvvetinin ilk uygulandığı an ile kaynak akımının verildiği ilk an arasında geçen süredir. Bu aralık, solenoid hareketli silindir valfinin çalışması ve üst elektrot tutucunun üst elektrotu iş parçasıyla temas haline getirmesi ve elektrot kuvvetinin tamamını uygulaması için zaman sağlar. Bu zaman, parçaların yakın temasını sağlamaya yetecek kadar olmalıdır [53].

3.4.2. Kaynak zamanı

Kaynak akımının devreden geçtiği zaman aralığıdır. Akım verilir ve ergimenin olduğu önceden ayarlanmış bir süre devrede kalır ve kaynak dikişi gerekli boyuta gelinceye kadar büyür. Genel olarak kaynak zamanları bir saniyeden önemli ölçüde kısadır ve periyotlarla (cycle) belirtilir. Bir periyot 1/50 saniyeye eşittir [53].

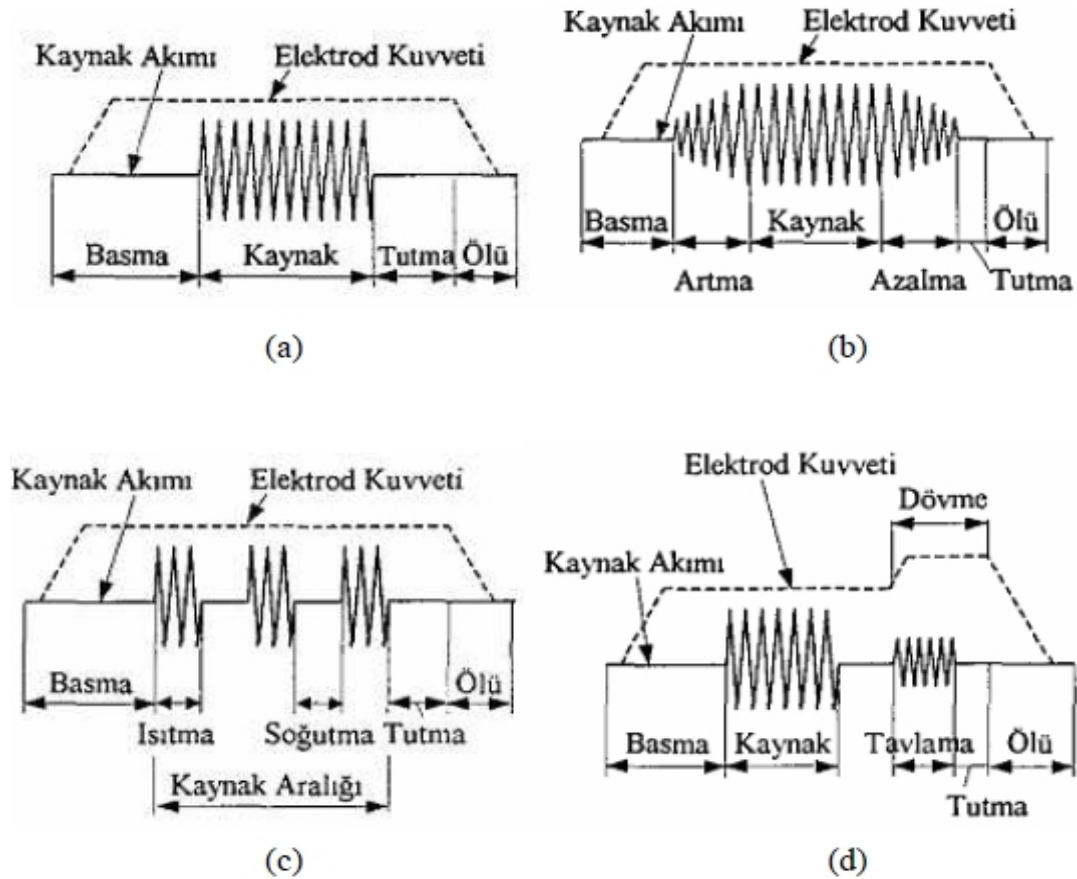
3.4.3. Tutma zamanı

Kaynak akımının kesilmesinden sonra, nokta kaynağının metali katılaşıncaya kadar elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği zaman aralığıdır. Bazı ince taneli yapı malzemeleri tutma süresine hassastır. 25 ile 50 arasındaki periyot sayılarında (1/2 ile 1 sn), bu malzemeler çekme deneylerinde ara yüzeyde yırtılma eğilimi gösterir [53].

3.4.4. Ayrılma zamanı

Tutma zamanının sonundan bir sonraki çevrimdeki basma zamanının başlangıcına kadar geçen, elektrotların iş parçasıyla temasta olmadığı zaman aralığıdır. Otomatik çevrimde, ölü zaman, elektrotların geri çekildiği ve iş parçasının kılavuzlandığı,

kaldırıldığı veya pozisyonunun değiştirildiği süredir. Elle yapıldığında, kontrol cihazı tarafından maksimum periyot olarak sabitlenmemiş olup operatör yeni çevrime başlayana kadar geçen süreye bağlıdır. Şekil 3.7(a) tek impulslu direnç nokta kaynağı çevrimi için bu dört temel süreyi göstermektedir. Her aralık periyot olarak gösterilmektedir. 50 Hz'lik bir şebeke için bir periyot 1/50 sn'dir. En basit kaynak çevrimi, kaynak aralığı boyunca, düzgün kaynak akımı ve elektrot kuvveti sağlamakla birlikte, eğim kontrolünün eklenmesi kaynak akımının değiştirilebilmesine olanak tanır. Şekil 3.7(b)'de gösterildiği gibi, eğim kontrolüne sahip bir kaynak çevriminde akım, kaynaktan önce artmakta, kaynaktan sonra da azalmaktadır. Artan akım, kaynak akımının tamamının bir anda uygulanması yerine, düşük bir değerden istenilen değere birkaç periyotta yükseltilmesine izin verir. Düşük ilk akım ya da kaynak akımı, akım ilk uygulandığında metal fişkirmasını azaltır ya da önler. Artış kontrolü, yüksek akım değerlerinde kaynakta ve çoğu kaplamalı metalin kaynağında kullanılmaktadır [53].



Şekil 3.7. Nokta kaynak çevrimleri [53]

3.5. Direnç Nokta Kaynağı Değişkenlerinin İncelenmesi

Kaynak işlemi sırasındaki akım ve zamanlama çok önemlidir. En iyi kaynak, bu üç değişken arasında en iyi uyumun sağlanması ile elde edilecektir. Kaynak makinelerinde değişkenlerin kontrolü ve makinenin otomasyonu için elektronik kontrol ünitesi kullanılır. İstenilen kaynak çekirdeği çapı; akım şiddeti ve zamanın uygun bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Zaman kısa tutulursa kaynak çapı küçülür; aksine uzun tutulursa ergiyen hacim fazlaşır ve ergiyik dışarı çıkar.

Bu parametreler yavaş ve hızlı kaynak diye iki grup kaynak anlayışını ortaya çıkarmıştır. İlk zamanlarda yüksek güçte elektrik enerjisi olmadığı için uzun süreli düşük akım, düşük kuvvetli kaynaklar yapılmıştır. Bu tür kaynakta düşük kuvvet uygulanmasına rağmen elektrot fazla batar ve kaynak civarındaki renk değişim bölgesi çok geniştir. Nokta başına enerji de daha çoktur. Teknolojinin ilerlemesi ile yüksek kuvvet ve akım uygulanmasıyla kaynak teknikleri gelişmiştir. Puntalar daha sağlam, daha kısa sürede ve daha az enerji ile yapılabilir olmuştur. Direnç nokta kaynağında, yapılacak kaynağın sağlamlığı için kaynak değişkenleri her zaman birleştirilecek sac parçaların ince kalınlıkta olanına göre ayarlanır [54,55]. 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. İş parçasının malzemesi
6. Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi
7. Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin etkisi
8. Elektrot ve iş parçasının temas durumları

3.5.1. Kaynak akımının etkisi

Kaynak için ısı gerekir. Isının oluşmasında dirençten sonra etkili olan etmen ise akımdır. Isı formülünde gösterildiği üzere akımın karesi kadar bir çarpan

oluşturmaktadır. Bu nedenle istenen kriterlere uygun bir kaynak elde etmek için akım değerini iyi seçmek gerekir [43].

Kaynak akımı, transformatör sekonder sargısı, sargıyı kollara bağlayan esnek bantlar, kollar, elektrotlar ve iş parçasından oluşan sekonder devreden akar. Isı, devrenin her kısmında Eşitlik 3.4'deki formüle göre oluşmaktadır [40].

$$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot T \quad (3.4)$$

Burada;

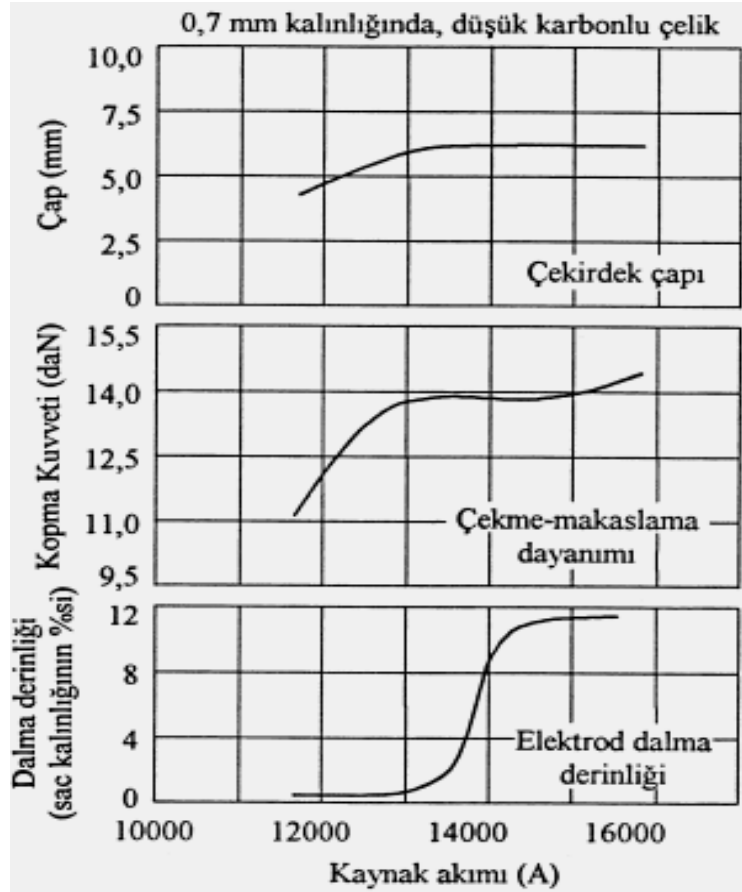
- Q : Üretilen ısı miktarı (Joule)
- K : Sabit bit sayısı
- I : Kaynak akım şiddeti (Amper)
- R : Devredeki elektrik dirençlerinin toplamı (Ohm)
- t : Kaynak akımının devrede kalma süresidir (saniye)

Isının bir bölümü elektrotlardan ve iş parçalarından iletim, taşınım ve ışıyım yoluyla kaybolur. Bu kayıpların büyüklüğü genelde bilinmemektedir.

Çeliğin ısıl iletimi yaklaşık olarak bakırınkinin %12'si kadardır. Bu yüzden, çeliğin bakır esaslı elektrotlarla kaynağında, yeterli kaynak akımı kullanıldığında, iş parçalarının ara yüzeyinde oluşan ısı, kaynak bölgesinden, elektrot uçlarında oluşan ısının su soğutmalı elektrotlara iletilmesine oranla, daha yavaş uzaklaşmaktadır. Böylece, önce iş parçalarının ara yüzeyi ergime sıcaklığına ulaşmakta ve kaynak bu ara yüzeyde oluşmaktadır [43].

Kaynak akımı, bağlantının çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliğinin çekirdek çapı üzerindeki etkisi Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Akım 13500 A'ın üzerine çıktığında 6 mm'lik çekirdek çapında önemli bir artış olmamıştır, fakat elektrot dalma derinliğinde bir artış meydana gelmiştir. Optimum akıma ulaşılan kadar çekme-makaslama dayanımı hızlı bir şekilde artmakta, fakat akım 14000 A'ın biraz üzerine çıktığında dayanım biraz düşmektedir. Dalma derinliği, 13500 A'lık

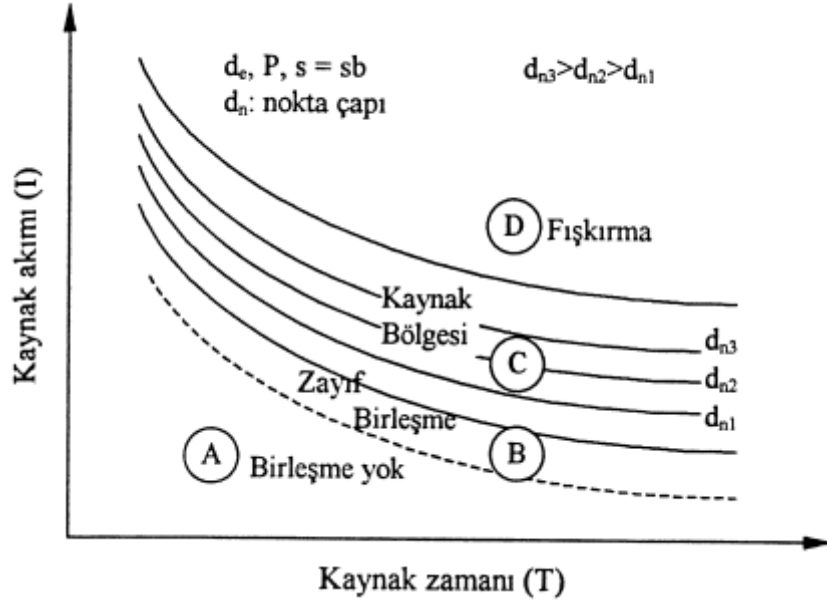
kaynak akımında sac kalınlığının %2' sinden 14000 A'in biraz üstünde %10 civarına kadar çıkmaktadır [43].



Şekil 3.8. Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme-makaslama dayanımı ve elektrot dalma derinliği üzerindeki etkileri [43]

Kaynak akımının ısı üretiminde önemli bir değişken olması, dikkatlice kontrolünü gerektirmektedir. Akım değişimlerine şebeke gerilimindeki değişimler ve kaynak makinesinin sekonder devresinde yapılan çeşitli değişiklikler neden olabilir. Diğer yandan, kaynak sırasında, kaynak bölgesindeki akım yoğunluğunda da azalma meydana gelebilir. Bu olay, akımın bir önceki kaynak noktasından ve elektrotların etki alanı dışındaki metalik temas noktalarından kısa devre olması sonucunda ortaya çıkar. Kısa devre nedeniyle nokta çapı yeterli bir değere erişemez. Ayrıca, kullanım sırasında, uç çapı çeşitli sebeplerden dolayı büyümüş elektrotlar, akım yoğunluğunda azalmaya neden olur [43,51].

Belirli bir levha malzemesi ve kalınlığı, elektrot uç çapı ve verilmiş bir elektrot kuvveti için bir kaynak kabiliyeti diyagramı (akım-zaman diyagramı) elde etmek mümkündür (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Kaynak kabiliyeti diyagramı [54]

Bu diyagram dört bölgeye ayrılmaktadır. A bölgesinde herhangi bir ergime ve birleşme yoktur. B bölgesinde basınç kaynağı ile oluşan ve ergime olmadan zayıf bir birleşme meydana gelir. C bölgesi ergime veya kaynak bölgesidir. C ve B bölgesinin sınır eğrisinden itibaren ergime başlar ve ergimiş kaynak bölgesinin boyutları, bu bölge içine girdikçe artar. Sonuçta nokta çapı d_n , elektrot çapı d_e 'ye yaklaşık olarak eşit olur. C bölgesi malzemenin cinsine bağlıdır. Bazı metallerde bu bölge dar olduğundan kaynak akım ve zamanının hassas bir şekilde ayarlanması gerekir. Uygulamada, akım ve zaman değerleri C bölgesinin üst sınırına yakın kalacak şekilde seçilir. D bölgesi fışkıрма bölgesi olup, C bölgesinin üst sınırından itibaren fışkıрма başlar [43].

3.5.2. Kaynak zamanının etkisi

Kaynak süresi çok kısa olursa kaynak tutmayabilir veya kaynak çekirdeğinin çapı çok küçük kalabilir. Kaynak süresi uzun olunca da ergimiş bölge fazla büyüyeceği

için baskı altında patlar, aradan malzeme fışkırır ve çok derin izler oluşur. Kaynak esnasında lokal bir bölgenin ergitilmesi söz konusu olduğundan, ergiyik civarında malzeme kristal yapısında önemli değişiklikler olur. Kaynak işleminden sonra elektrotlar hemen kaldırılırsa kaynak bölgesindeki ısı alınmadığı için geniş bir halka şeklinde etrafa yayılır ve elektrot temas yüzeyi siyah veya menevişli olabilir. Kaynaktan sonra elektrot bir süre bekletilirse (tutma zamanı), malzemedeki ısı, su ile soğur elektrotlar tarafından uzaklaştırılacağı için kaynak izi küçük ve beyaz olur.

Isı (enerji) formülü $Q = K.I^2.R.t$ (Bkz. Eşitlik 3.4), toplam direnç sabit kalmak üzere, devrenin herhangi parçasında oluşan ısının hem kaynak süresi (akımın geçtiği süre) hem de kaynak akımının karesiyle doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Isı geçişinin zamanın fonksiyonu olmasından dolayı, uygun çekirdek çapının gelişmesi için gereken süre, akım ne kadar yükseltirse yükseltilsin, sınırlı ölçüde kısaltılabilir. Temas yüzeylerinde ısı oluşumu çok hızlı olduğunda, özellikle elektrot temas yüzeylerinde, oyuklar ve fışkırmaya meydana gelir [43].

Kaynak akımı ve basınç artırılarak kaynak süresinde biraz azalma sağlanabilir. Akımdaki yükselmeden dolayı oluşan fışkırmayı önlemek için yüksek basınç gereklidir. Kısa kaynak süresi ve yüksek akım şiddeti ya da uzun kaynak süresi ve düşük akım şiddeti kullanarak, aynı nokta çapını elde etmek mümkündür. Bunlardan birincisi kısa süreli kaynak, ikincisi uzun süreli kaynak adını alır.

Getirdiği büyük faydalar yüzünden, kısa süreli kaynak tekniği çok gelişmiş olup büyük ölçüde kullanılmaktadır. Önceleri, çok ince levhalar için bile birkaç saniye olan kaynak süresi, kontrol organları ve akım devrelerindeki büyük gelişmelerden sonra birkaç periyoda kadar düşürülmüştür. Kaynak zamanı azaldıkça ısı kayıpları da azaldığından işlemin ısı verimi artmaktadır. Düşük karbonlu alaşımsız çeliklerin kaynağında, kısa süreli kaynak için gerekli kaynak süresi aşağıdaki bağıntıyla belirlenebilir [46]:

$$T = 8.s \quad (3.5)$$

Bir önceki sayfadaki bağıntıda, T (periyot) kaynak süresi, s (mm) levha kalınlığıdır. 50 Hz frekanslı bir şebekede l periyot 1/50 saniyedir.

Kısa süreli kaynakta işlemin hızlı olması sebebiyle sadece kaynak bölgesi ergime sıcaklığına ulaşır ve levhaların dış yüzeyinde aşırı ısınma olmadan kaynak işlemi sona erer. Bu nedenle, elektrotların dokunma yüzeyleri bozulmaz. Uzun süreli kaynakta ise, levhaların diğer bölgelerinde sıcaklık önemli ölçüde artar. Bunun sonucunda, levhaların dış yüzeyleri yumuşar ve elektrotlar levha içine gömülerek derin izler bırakır.

Kaynak süresi, kaynak akımının kesilmesinden sonra kaynak bölgesinin soğuma hızını etkiler. Uzun süreli kaynakta, kaynak bölgesine komşu bölgelerin sıcaklığı yükseldiğinden, sıcaklık farkı, dolayısıyla da kaynak sonrası soğuma hızı düşüktür. Bu nedenle, %0.3 karbon içeren çeliklerde sertleşmeyi önlemek için uzun süreli kaynak kullanılır. Diğer yandan, elektrotlar tarafından sıkıştırılması zor olan parçalar için de uzun süreli kaynak tercih edilir [43,46,54].

3.5.3. Elektrot kuvvetinin etkisi

Elektrot kuvveti veya kaynak kuvveti, elektrot tarafından kaynak edilecek parçalara, kaynak çevrimi boyunca tatbik edilen kuvvettir. Elektrotlar birbirine yaklaşır ve sıkıştırma sağlandıktan sonra kuvvetin statik hale gelmesiyle kaynak işlemi başlatılır. Kaynak için gerekli temas direnci genellikle kuvvetle ters orantılıdır. Baskı kuvveti arttırılınca, temas direnci düşer. Düşme eğilimi malzemeye göre değişir. Bu nedenle direnç çok küçülürse, gerekli ısı oluşmamaktadır. Kaynak türüne göre (hızlı, orta, yavaş) optimum kuvvet değeri uygulanır [54].

Çekirdek tamamen katı metalle çevrili olduğundan, hemen basıncın kalkacağı düşünülürse, o anda kaynakta boşluk ve çatlama tehlikesi oluşur. Bundan dolayı ergimiş malzeme üzerinde elektrotların basıncı soğuma sırasında devam ettirilir veya arttırılarak ısının çabuk dağılmasına ve aynı zamanda kaynağın dövülmesine imkan tanınır. Elektrot uç alanına en az 700 kg/cm basınç uygulanmalıdır, istenilenden fazla

olması durumunda, elektrot ucu aşınması ve malzemenin ezilmesi istenilenden fazla olur [54].

Kaynak yapılması için, akımın iletilmesi gerekir ve malzemenin bir arada tutulması şarttır. Kaynak bölgesinde kalan malzemeyi tutmak elektrot baskısıyla olur. Kaynağı yapılacak iş parçaları kaynak noktasında akımın geçişini sağlayacak şekilde sıkıca tutulmalıdır. Elektrot kuvvetinin artırılması iş metalinin temas direncini azaltacağı ve böylece kaynak akımı tarafından iş parçalarının kaynak bölgesindeki yüzeyleri arasında açığa çıkan toplam ısıyı düşüreceği için, elektrot kuvveti çok yüksek olmamalıdır. Ayrıca, çok yüksek elektrot kuvveti, levhalarda istenmeyen distorsiyonlara neden olur.

Elektrot kuvveti, cihazın kapasitesi dahilindeki bir kaynak akım ile uyumlu olmalı ve tekrar oluşmasına yetecek kadar uzun kaynak zamanının kullanımına müsaade etmelidir. Ayrıca, iş parçaları kaynak alanında aşırı elektrot kuvvetine maruz kalmadan oldukça yakın temasta olmalıdır. İş parçaları, kaynak bölgesindeki temas çok yakın olmayacak şekilde deforme olmuşsa, deformasyonu yenebilmek için çok yüksek kuvvet gerekebilir. Özellikle pres parçaların, şekilli iş parçalarının veya iş metalinin kalın kesitlerinin nokta kaynağında, kaynak dayanımı ve kalitesindeki farklılıklar, iş parçalarını uygun bir şekilde bir araya getirmek için gereken elektrot kuvvetindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu, özellikle ince taneli yapı çeliklerinin kaynağında geçerlidir. Bu malzemelerin yüksek dayanımından dolayı, oldukça yüksek geri yaylanmaya sahiptirler ve bu yüzden düşük karbonlu çeliğe oranla daha yüksek elektrot kuvveti gerektirirler [43].

Bazen, iş parçalarını bir arada tutabilmek için normalde kullanılanlardan daha uzun bir sıkma süresi gerekmektedir. Ayrıca, geri yaylanma olasılığından dolayı, tutma süresi kaynak metalinin katılaşmasına imkan tanıyacak kadar uzun olmalıdır. Elektrot kuvvetindeki farklılıkların direnç ve ısınmada değişikliklere sebep olmasından dolayı, bu kuvvet kaynak kabiliyeti diyagramındaki eğrilerin boyut ve lokasyonunda ve akım seviyesinde değişikliklere neden olabilir. Artan elektrot kuvvetleri, ergileri daha yüksek akım seviyelerine kaydırır. Eğrilerdeki bu atlama, bir elektrot kuvvetinde kabul edilebilir kaynak çekirdekleri sağlamış kaynak akımı ve kaynak

süresi kombinasyonlarının, yeni elektrot kuvvetinde daha fazla kabul edilebilir kaynak çekirdekleri üretmeyebileceğini belirtmektedir. Bu yüzden, özellikle, akma dayanımları 700 MPa'ın üzerindeki ince taneli yapı çeliklerinin bazıları gibi, kısmen kabul edilebilir kaynak akımı sınırına sahip alaşımlarda, elektrot kuvvetinde değişiklik yaparken dikkat edilmelidir [43,46].

Elektrot kuvveti, kaynak işleminin üç safhasında da önemli bir rol oynamaktadır. Basma safhasında, elektrot kuvveti, levhalar arasındaki temas direncinin uygun bir değerde, buna karşılık elektrot-levha temas direncinin düşük bir değerde olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, levhaların, elektrotlar altında belli bir alanda temas etmesini sağlayarak kaynak noktasının kesin yerini belirlemektedir. Elektrot kuvveti, kaynak safhasında, levhalar arasından fişkırmaya çalışan sıvı metali katı haldeki metal çukuru içinde basınç altında tutarak, bu fişkırmayı engellemektedir. Dövme safhasında ise, kaynak dikişinin sıvı halden itibaren soğuması ve katılaşması sırasında, büzülme nedeniyle ortaya çıkabilecek boşluk, çatlak gibi kusurların oluşumunu dövme kuvveti yoluyla önlemektedir [43,46].

3.5.4. Elektrot bileşimi ve şeklinin ısınma üzerine etkisi

Elektrotun ısınmasını minimumda tutabilmek için, elektrotlar yüksek elektrik iletkenliği ve düşük temas direncine sahip olmalıdır. Aynı zamanda, elektrot ucu ile metalin temas ettiği alanlardaki (Bkz. Şekil 3.5'de b ve f bölgeleri,) ısının uzaklaştırılabilmesi için, yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdırlar. Elektrotlar ayrıca, tekrarlanan yüksek kaynak kuvvetlerinin sebep olduğu deformasyonlara direnebilecek kadar kuvvetli olmalıdır [46].

3.5.4.1. Elektrot bileşimin etkisi

Genellikle alaşımın sertliği arttıkça ısı ve elektrik iletkenliği azalmaktadır. Dolayısıyla en uygun alaşımın seçiminde, elektriksel, ısısız ve mekaniksel özelliklerin uygun bir kombinasyonu bulunmalıdır. Ticari saf bakır mükemmel bir elektriksel iletkenliğe sahip olmasına karşılık, sıkıştırma kuvvetlerine direncinin ve

tavlama sıcaklığının düşük olma nedeniyle elektrot malzemesi olarak tek başına kullanılması tavsiye edilmez [46].

3.5.4.2. Elektrot şeklinin etkisi

Aynı bileşimde ve kalınlıktaki parçalar kaynak edildiğinde, elektrotların uç çapları aynı olmalıdır. Bununla beraber, 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 metallerden birisinin elektriksel direnci diğerinden büyükse aynı durum geçerlidir. Bu farklılık, yüksek dirençli parça ile temasta olan elektrotun ucunun çapı büyütülerek veya düşük dirençli parça ile temasta olan elektrot için yüksek dirençli malzeme kullanarak telafi edilebilir. Kaynak çekirdeğinin çapı, elektrotun temas yüzeyinden hafifçe küçüktür. Elektrotun ucu aşındıkça veya mantarlaşıma nedeniyle büyüdükçe, kaynak çekirdeğinin çapı artar. Uç çapının büyümesi, akım yoğunluğunu azaltacağı ve açığa çıkan ısı iyi bir kaynak meydana getirmeye yeterli olmayacağı için, kaynak kalitesini etkileyecektir [47].



Şekil 3.10. Elektrot uçlarında mantarlaşıma [47]

3.5.4.3. Elektrotların malzemesi ve boyutları

Ticari saf bakır, en iyi iletkendir. Saf bakır elektrotlar, üstün mekanik özellikleriyle beraber, yeterli elektrik iletkenliğine sahip malzemeler elde edilene kadar, direnç

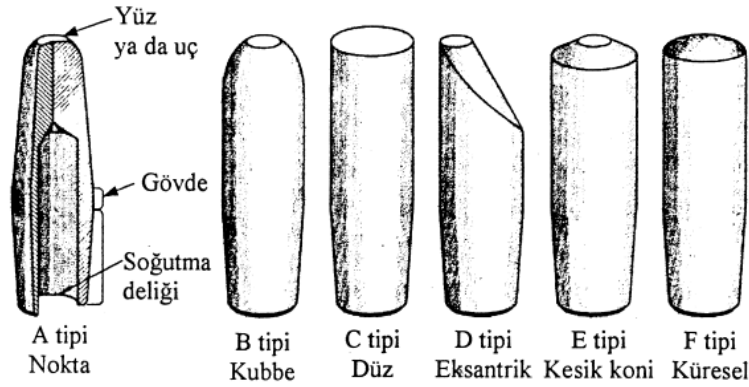
kaynağı elektrotu olarak kullanılmıştır. Daha yüksek akım şiddeti, elektrot kuvveti ve kaynak hızına sahip yöntemlerin gelişmesi, saf bakırın elektrot malzemesi olarak kullanımını engellemiştir. Soğuk çekilmiş bakır, statik ve dinamik basma kuvvetlerine karşı düşük mukavemete ve düşük yumuşama sıcaklığına sahiptir. Ticari saf bakırın istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak için daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip bir seri bakır alaşımı geliştirilmiştir. Direnç kaynağında kullanılan başlıca elektrot alaşımları ve özellikleri aşağıdaki Tablo 3.4’de verilmiştir [43,54].

Tablo 3.4. Direnç kaynağında kullanılan elektrot alaşımları [46]

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 artırır. Bu yüzden, herhangi bir uygulama için belli bir elektrot alaşımının seçimi, onun mekanik özelliklerine göre değişen ısı ve elektriksel özelliklerinin de göz önüne alınmasıyla gerçekleşir. Örneğin, alüminyumun kaynağında kullanılan elektrotlar, yüksek basma mukavemeti yerine yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Buna karşılık, paslanmaz çeliğin kaynağı için kullanılan elektrotlarda, maksimum basma mukavemeti elde etmek için iletkenlikten fedakarlık edilmelidir [51,54].

Elektrotların şekil ve boyutları, kaynak yapılacak iş parçalarının cinsine, şekil ve boyutlarına göre saptanır. Standart elektrotlar içinde en çok kullanılanlar, kesik koni uçlu ve küresel olanlardır. Şekil 3.11’de standart elektrotların uç şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Standart elektrot uç şekilleri [46]

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 ya da dişlidir. Dişli delikler yuvarlak olanlardan daha fazla soğutma yüzeyi sunar. Soğutma delikleri, elektrot dayanımını tehlikeye sokmayacak şekilde, mümkün olduğunca elektrot yüzüne kadar uzamalıdır. Elektrot ucunun veya temas yüzeyinin çapı kaynak düğmesinin boyutunu kontrol eder. Ucu çapı çok küçükse, elde edilen kaynak sağlam görünebilmekle birlikte zayıf olabilir. Küçük çaplı uçlar ayrıca şiddeti yüksek ısı konsantrasyonu ve yüzey işaretlenmesine veya düzgün olmayan elektrot izine sebep olabilir. Büyük çaplı uca sahip elektrotlar özellikle yüksek kaynak akımında yetersiz elektrot basıncı yüzünden aşırı ısınabilir ve boşluklara veya zayıf yüzey görünümüne sebep olurlar [43,46,51,54].

3.5.5. İş parçasının malzemesi

Metallerin bileşimi, onların özgül ısılarını, ergime sıcaklıklarını, gizli ergime ısılarını, ısı ve elektrik iletkenliklerini ve yoğunluklarını etkiler. Gümüş ve bakır gibi

yüksek iletkenliğe sahip metallerde yüksek akım yoğunluğunda dahi çok az ısı meydana gelir. Bu metallerin ısı iletkenliği de yüksek olduğundan, az miktarda ısı, hızla iş parçasına ve elektrotlara doğru iletilir. Metallerin bileşimi; özgül ısı, ergime noktası, gizli ergime ısı ve yoğunluk gibi özellikleri etkilediğinden dolayı direnç nokta kaynağından önce metallerin bileşiminin bilinmesi önemlidir [55].

Metalin bileşimindeki diğer maddelerin de kaynak kabiliyetine etkisi vardır. Fosfor ve kükürt genellikle çekirdek ara yüzeyinde yırtılmayı iletici rol oynamaktadır. Titanyum içeriğini arttırmak çoğunlukla çekirdek çapını, çekme-makaslama dayanımını ve kaynak akım sınırını düşürmektedir. Azot, ara yüzeysel hasar iletici rol oynamaktadır. Yüksek oksijen seviyeleri, ara yüzeysel hasara neden olmaktadır. Bunların dışında, yüzey yağlarından yayılan hidrojen de kaynak metali hasarına yardımcı olmaktadır [43,51].

3.5.6. Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi

Yüksek kalitede nokta kaynakları elde etmek için, elektrotlarla temas eden iş parçası yüzeyindeki direnç minimumda tutulmalıdır. Bu düzgün ve temiz iş metali yüzeylerine sahip olarak ve elektrot kuvveti kontrol edilerek yapılabilir. Elektrotlarla temas halindeki iş parçası yüzeyleri çok yüksek temas direncine sahipse, bu yüzeylerdeki sıcaklık artışı kaynak bölgesindeki yüzeylerdeki kadar hızlıdır. Ayrıca, temas direncindeki değişimler ve buna bağlı olarak kaynak akımının oluşması için geçen süredeki değişimlerden dolayı tutarsız sonuçlar elde edilebilir [56].

Metal levhaların yüzeyleri mikro ölçekte düzgün değildir ve düşük elektrot basınçları kullanıldığında, gerçek metal-metale temas bölgesi tüm temas bölgesinin sadece küçük bir yüzdesi olabilir. Elektrot kuvveti arttırıldıkça, yüksek noktalar bastırılarak gerçek metal-metale temas bölgesi artar ve böylece elektrik direnci düşer. Artan elektrot kuvveti iş parçalarının arayüzeyindeki direnci düşürür. Elektrot malzemesinin iş metalinden daha yumuşak olduğu durumlarda, belli bir elektrot kuvvetinin uygulanması elektrotlar ve iş parçaları arasındaki temas yüzeylerinde, iki iş parçasının ara yüzeyine oranla daha iyi bir temas sağlar [56].

3.5.6.1. Yüzey hazırlama

Kaynak edilecek parçalar veya en azından birleştirme yüzeyleri, kaynakların gayri safiyetlerden arınabilmesi için temizlenmelidir. Elektrotlarla temasa gelebilecek, pislik, pas ve oksit filmleri kaynakların bu yüzey görünümünü bozarlar. Kaynak edilecek parçaların yüzeyindeki yabancı malzemelerin uzaklaştırılması, elektrotların bu malzemeleri bünyelerine alması olayını azaltacağından, elektrot ömrünü arttırır. Pislik veya filmleri buhar fazında yağ alma veya kimyasal banyolarla uzaklaştırabilir. Bununla beraber bezle, elle silinerek de kaliteli nokta kaynakları elde edilebilir. Oksit filmleri ise mekanik yollarla uzaklaştırılabilir [7,56].

3.5.6.2. Yağ tabakasının etkisi

Soğuk haddelenmiş yüzeyler veya asit ile temizlenmiş sıcak haddelenmiş ve yağlanmış yüzeyler üzerindeki ince yağ filminin kaynak kalitesi üzerindeki etkisi çok küçüktür. Bu konuda yapılan testler üzerinde ince bir yağ filmi bulunan metaller üzerinde yapılan nokta kaynaklarının dirençlerinin, aynı metallerin yağı alındıktan sonra yapılanlara nazaran %2-3 daha düşük olduğunu göstermiştir. Fazla miktarda yağ ve gres bezle silinerek veya yağ alma ile uzaklaştırılmalıdır. Yağın kendinin kaynağa bir zararı olmasa da, üzerine yapışan kirler ve yabancı maddeler zayıf kaynakların elde edilmesine neden olabilir [7,56].

3.5.6.3. Pas ve oksitlerin tesiri

Paslanmış veya ısı ile meydana gelmiş siyah veya mavi oksit filmleri ihtiva eden çelikler direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirler. Fakat kaynak kalitesi ve sürekliliği bu tabakaları ihtiva etmeyen çeliklere nazaran düşük olur. Muntazam ve düşük bir elektrik direncine sahip olan ince filmlerin kaynak üzerine etkisi azdır. Oldukça kalın ve muntazam olmayan oksit filmleri ihtiva eden çelikler bu tabaka uzaklaştırılmadan seri imalat şartlarında kaynak edilemezler. Kalın fakat muntazam oksit filmleri ihtiva eden çelikler düşük bir değerden orta bir değere doğru artan seri halde kaynak tatbik edilerek ve oldukça yüksek elektrot kuvvetleri kullanılarak kaynak edilebilirler [7,56].

3.5.7. Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin etkisi

İkinci nokta kaynağı, kaynak akımının birinci kaynaktan ya da ikinci kaynak noktasında elektrotlar arasındaki metalden akmasına neden olacak kadar, birinciye yakın yapılırsa şönt akımı (atlama) meydana gelir. Kaynak akımı iki yolun direnciyle ters orantılı olarak akar. Akım bölünmesi, ikinci kaynak noktasında, esas metal direncinin ara yüzey direncine oranına bağlıdır [46].

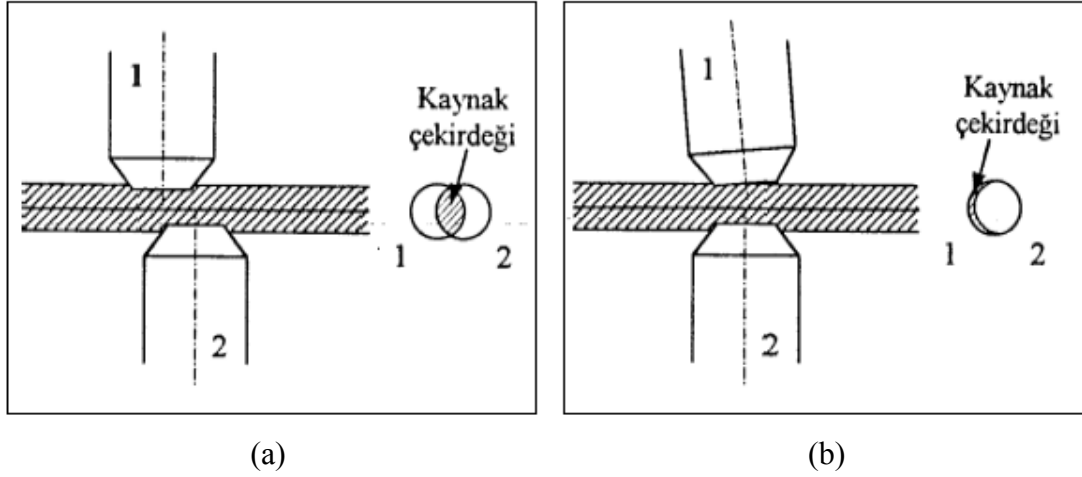
İkinci ve bunu takip eden kaynaklar yapıldığında, elektrotlar arasındaki metal bölünmüş devre olur; akımın bir bölümü metalden bir önceki kaynağa doğru hareket ederken, kalanı ikinci kaynak noktasındaki elektrot uçları arasındaki metalden akar. İlk nokta kaynağına olan mesafe yeterince büyükse, metalden direkt olarak akanla karşılaştırıldığında ilk nokta kaynağı boyunca olan yolun direnci yüksektir ve şöntlenme etkisi ihmal edilebilir. İlk nokta kaynağına olan mesafe kısa ise akımın önemli bir kısmı ilk nokta kaynağına atlar. Bu atlama (kısa devre) nedeniyle, nokta çapı yeterli bir değere erişmez. Bunu önlemek için, d_n nokta çapı olmak üzere, nokta merkezleri arasındaki uzaklık $3 \cdot d_n$ 'den büyük olmalıdır [43].

Düşük karbonlu çelik parçaların kaynağında minimum aralık, metalin kalınlığı, ergimiş bölgenin çapı ve kaynak bölgesindeki yüzeylerin temizliğine bağlıdır. Buna göre çeliklerde minimum nokta aralığı $(4 \cdot d_n)$ ile $(5 \cdot d_n)$ arasındadır. Alüminyum gibi yüksek elektrik iletkenliğine sahip malzemelerde bu aralık $(8 \cdot d_n)$ ile $(10 \cdot d_n)$ alınmalıdır [46,51,54].

3.5.8. Elektrot ve iş parçasının temas durumları

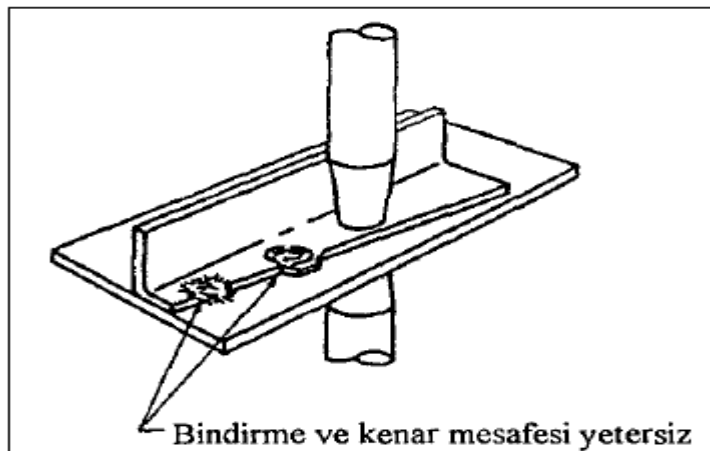
Kaynak kalitesi ve kabiliyetini etkileyen bir diğer faktör elektrotların ve iş parçalarının birbiriyle temas etme durumudur. Elektrotlar, iş metalinde kaynağın yapılacağı bölgeye dik, dolayısıyla birbirine paralel olmalıdır. Ancak iyi bir kaynak için bu koşul yeterli değildir. Birbirine paralel olan alt ve üst elektrotun aynı ekseninde olması gerekmektedir. Birbirine paralel ancak aynı ekseninden geçmeyen alt ve üst elektrotlarla yapılan kaynaklarda tek bir dairesel bölge yerine iki dairenin kesişim bölgesi şeklinde gölgeli bir alan gözlenmektedir. Bunun sebebi; kaynağın, basıncın

etkin olduğu bölgede gerçekleşmesidir. Şekil 3.12(a)'da görülen kaynak bölgesi, gerekli alanın yaklaşık olarak üçte biri olup gerekli basıncın üç katına çıkmasına sebep olmaktadır [56]. Şekil 3.12(b)'de ise birbirine paralel olmayan iki ucun meydana getirdiği kaynak görülmektedir.



Şekil 3.12. Elektrotların temas durumuna göre oluşan kaynak çekirdekleri; (a) aynı eksende olmayan, (b) paralel olmayan elektrotlar [56]

Yukarıda belirtilen durumların yanı sıra bindirme ve kenar mesafelerinin de kaynak kalitesinde önemi vardır. İyi bir kaynak elde edebilmek için nokta kaynağının kenara uzaklığı en az çekirdek çapının yarısı kadar olmalıdır. Şekil 3.13'de yetersiz bindirme ve kenar mesafesi sonucu oluşan kaynak hataları görülmektedir [56].



Şekil 3.13. Yetersiz bindirme ve kenar mesafesi sonucu oluşan hatalar [56]

3.6. Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Isıl Denge

Eğer eşit bileşimde ve kalınlıkta iki sac, eşit kütle ve şekle sahip elektrotlar ile kaynak edilirse, ısı her iki parçada üniform olarak üretilecek ve kaynak kesiti tipik oval biçimde olacaktır. Bu şartlar mevcut ise eğer ısıl denge mevcuttur. Bununla beraber, saclardan biri diğerinden daha yüksek elektriksel dirence sahip ise, ısı bu sac ta diğerine nazaran çok daha hızlı üretilecektir. Bu durumda ısıl denge mevcut değildir. Paslanmaz çelik ve orta karbonlu çelik gibi, farklı iki metal kaynak edildiğinde, ısıl denge ya yüksek dirençli paslanmaz çelik tarafındaki elektrot temas alanını artırarak veya düşük dirençli karbonlu çelik tarafında daha yüksek dirençli elektrot kullanılarak sağlanır [8].

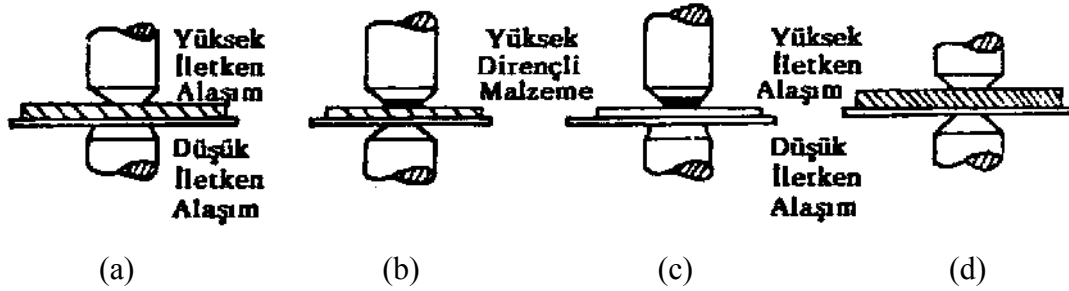
Farklı kalınlıkta metallerin kaynağında, soğutulmuş elektrotun ince parça tarafında kaynak ara yüzeyine daha yakın olması nedeni ile, ara yüzeyde yetersiz ısı üretimi yönünde bir eğilim vardır. Uygun ısıl denge, ince sac tarafında daha küçük temas alanına sahip elektrot kullanarak daha yüksek akım yoğunluğu elde etmek ve kısa kaynak zamanı kullanmak suretiyle gerçekleştirilir.

Isıl dengeyi etkileyen faktörler esas olarak şunlardır;

1. Kaynak edilecek malzemelerin ısıl ve elektriksel iletkenlikleri
2. Kaynak edilecek parçaların geometrisi
3. Elektrotların ısıl ve elektriksel iletkenlikleri
4. Elektrotların geometrisi

Şekil 3.14'de farklı metallerin nokta kaynağında ısıl denge sağlamak için uygulanan yöntemler belirtilmiştir. Şekil 3.14(a)'da daha önce açıklandığı gibi, yüksek iletkenliğe sahip alaşım tarafına daha küçük temas yüzeyine sahip elektrot kullanarak bu taraftaki akım yoğunluğu artırılmış ve her iki parçada da eşit derecede erime sağlanmıştır. Şekil 3.14(b)'de yine aynı malzemelerde bir başka yöntem kullanılarak ısıl dengenin oluşturulması gösterilmiştir. Burada yüksek iletkenlikte malzeme ile temasta olan elektrotun temas yüzeyi, molibden ve tungsten gibi yüksek ısıl dirence sahip malzemelerden yapılmıştır. Şekil 3.14(c)'de her iki yöntemin bir arada

uygulanışı gösterilmiştir. Şekil 3.14(d)'de yüksek iletkenliği dengelemek için malzemenin kalınlığını artırarak gerçekleştirilen bir yöntem görülmektedir [8].



Şekil 3.14. Farklı metallerin direnç nokta kaynağında ısıl dengeyi sağlamak için uygulanan yöntemler [8]

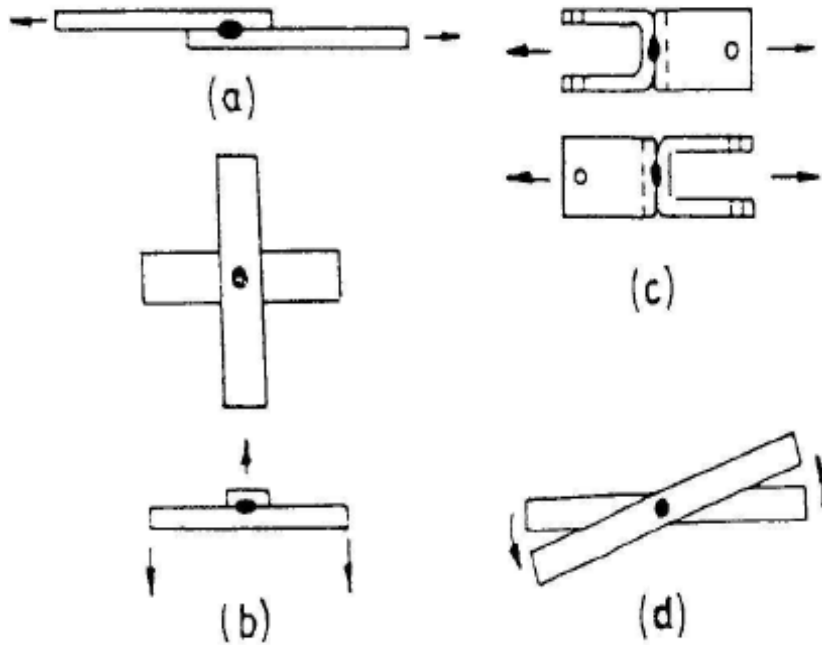
3.7. Yöntemin Uygulanması ve Sınırları

Nokta kaynağı, yaklaşık 3 mm kalınlığa kadar olan sac levhaların birbiri üzerine bindirilerek birleştirilmesinde, çok geniş bir şekilde kullanılır. Bazen 6 mm ve daha kalın sacların birleştirilmesinde de kullanılır. Azami parça kalınlığı son yıllarda geliştirilen kaynak makineleri ile 20 mm kadar çıkmıştır. Direnç nokta kaynağı, genel olarak, aynı birleşimde ve aynı kalınlıktaki metal levhaların birleştirilmesinde kullanılır. Bununla beraber, ikiden daha fazla metal levhanın, bileşimi ve kalınlıkları farklı metallerin başka bir metal ile kaplanmış sacların birleştirilmesinde de kullanılır. Gaz veya su sızdırmazlığı istenmeyen, pres ile şekillendirilmiş parçalardan meydana gelen birleşik parçaları yüksek bir üretim hızıyla en ekonomik şekilde nokta kaynağı vasıtasıyla birleştirilebilirler. Nokta direnç kaynağının en önemli avantajı yüksek hızlı olması, yüksek imalat kapasitesindeki birleştirme hatlarında kolaylıkla kullanılabilmesi ve otomasyona elverişli olmasıdır. Akım, zaman ve elektrot kuvvetinin otomatik kontrolü ile yüksek imalat hızlarında, sağlam ve birbirinin aynı özellikte nokta kaynakları elde edilir. Bu avantajlarına karşılık, sacların direnç nokta kaynağı (yaklaşık 5-20 volttan, 5000-20000 amper çekilir) yüksek kilovolt-ampere (kVA) ihtiyaç gösterir. Daha iletken metaller örneğin birçok alüminyum veya bakır alaşımları daha da yüksek kVA gerektirir. Direnç nokta kaynak makineleri birçok ark kaynak makinesinden daha pahalıdır [46,56].

3.8. Kaynak Noktasının Mukavemeti

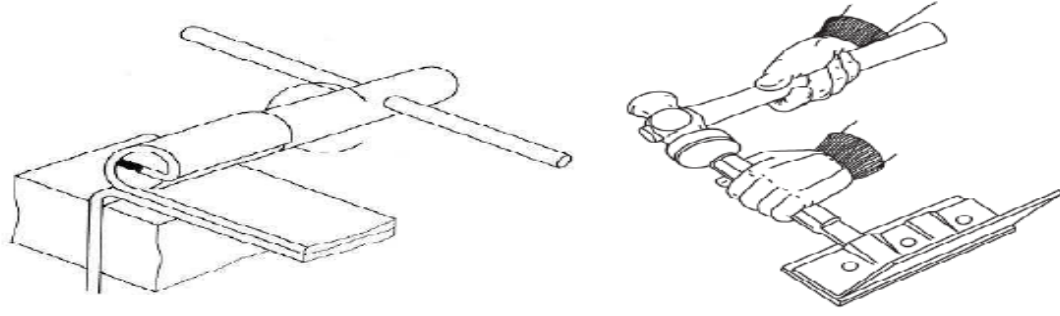
Nokta kaynağının statik mukavemetini tayin için aşağıdaki deneyler yapılmaktadır;

1. Çekme-makaslama deneyi
2. Haç biçimi çekme deneyi
3. U biçimi çekme deneyi
4. Burulma deneyi



Şekil 3.15. Elektrik direnç nokta kaynağının çeşitli mukavemet deneyleri [57]

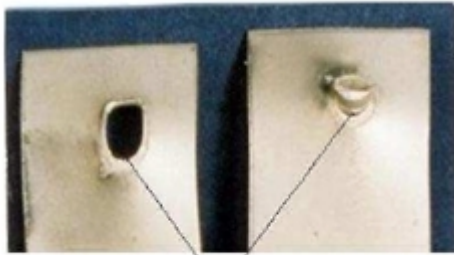
Değişik elektrot uç çapları kullanıldığında, özellikle 3 mm. kalınlığa kadar levhalarda, çekme-makaslama deneyi sonucu, levhalar düğmelenme yoluyla hasara uğrar. Yani kaynak noktası levhanın birinden sıyrılıp, bir delik bırakarak diğer levhada kalır. Bu hasar tipi yeterli bir kaynak mukavemetinin göstergesidir. Yetersiz bir kaynak dikişinde hasar makaslama yoluyla meydana gelir. Bu nedenle imalat sırasında da kalite kontrolü amacıyla, ayırma deneyi çok sık kullanılır (Şekil 3.16). Deney sonucu düğmelenme meydana gelmezse kaynak dikişleri yeniden ayarlanır [57].



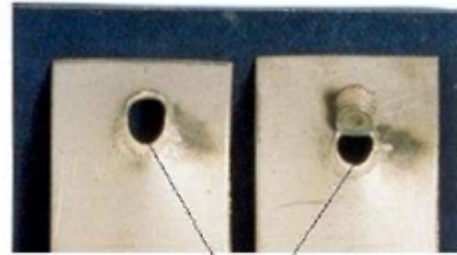
Şekil 3.16. İmalat sırasında kalite kontrolü amacı ile sıyırma [57]



Şekil 3.17. Nokta kaynağında düğmelenme yoluyla hasar [48]

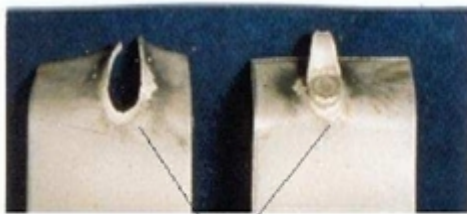


YIRTILMA TIPI KOPMA

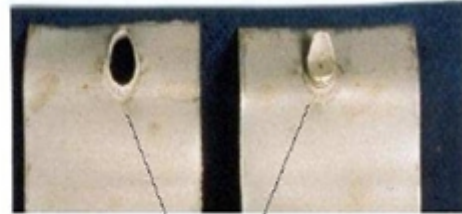


YIRTILMA TIPI KOPMA

Şekil 3.18. Nokta kaynağında makaslama yoluyla hasar [48]



YIRTILMA TIPI KOPMA



YIRTILMA TIPI KOPMA

Şekil 3.19. Nokta kaynağında sıyırma yoluyla hasar [48]

3.9. Elektrik Direnç Nokta Kaynak Makineleri

Direnç nokta kaynak makinelerinin kullanıldığı sektörlerde değişen farklı istekler doğrultusunda farklı tipte, kapasitede ve donanımda nokta kaynak makineleri olabilir. Elektrik direnç nokta kaynağında kullanılan makineler otomasyon derecesine bağlı olarak basit, ucuz ve pahalı olabilir. Radyo, televizyon, elektronik ve oyuncak sanayi gibi alanlarda tam elektronik kumandalı hassas nokta kaynak makineleri gerekir. Yüksek güçlü kaynak makinelerinde ise, kademesiz kol aralığı ayarlanabilirliği, hidrolik elektrot hareketi, tam elektronik kumanda ile donatımları yanında, yüksek çalışma emniyeti de dikkate alınmaktadır. Gelişmiş tiplerde, programlı basınç akım şiddetleri ile tek ve çok impulsu kaynak işlemleri yapılmaktadır.

Kaynak makineleri üç temel prensipte imal edilir;

1. Pres tipi makineler
2. Seyyar makineler
3. Çok nokta kaynak makineleri

3.9.1. Pres tipi (sabit) kaynak makineleri

Bu makineler dikey olarak doğrusal bir şekilde hareket eden üst elektrotu taşıyan bir kaynak kafası ihtiva eder. Alt elektrot dikey olarak ayarlanabilir bir kol üzerine yerleştirilmiştir. Üst kafa kızaklar üzerinde hareket eder. Üst kafanın hareket ve kaynak basıncı, hava ve hidrolik silindirlerle sağlanır. Hidrolik silindirler çok yüksek (500 kVA'den daha büyük) kapasiteli makinelerde kullanılırlar. Hava silindirli makinelerde, hava bir selenoit vana vasıtasıyla silindirlere verilir. Hava silindirdeki pistonu ve buna bağlı olan kafayı aşağıya doğru iter, üst elektrot parçayı sıkıştırır. Elektrotlar üzerinde elde edilen kuvvet sabit veya kontrollü olabilir. Bugün kullanılan kaynak makinelerinin çoğunda kuvvet kontrollü sistemi vardır. Pres tipi makineler genel olarak nokta ve kabartma kaynağının her ikisini de yapabilecek şekilde elektrot kolları ve tablaları ile donatılmışlardır. Alt tabla dikey olarak ayarlanabilir [44,48]. Şekil 3.20'de pres tipi makinelere örnekler verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.20. (a) Mekanik elektrik direnç nokta kaynak makinesi (Mekanik ayak pedallı ve merkezi su soğutma sistemine sahip model olup 5+5 mm parça kalınlığına kadar kaynak yapabilir.), (b) Pnömatik elektrik direnç nokta kaynak makinesi (Pnömatik ayak pedallı ve merkezi su soğutma sistemine sahip model olup 5+5 mm parça kalınlığına kadar kaynak yapabilir.) [44]

3.9.2. Seyyar makineler (Kaynak penseleri)

Bu tip makineler parçanın makineye taşınmasının pratik olmadığı veya imkansız olduğu durumda kullanılırlar. Şekil 3.21’de seyyar makineler örnekler verilmiştir.



(a)



(b)

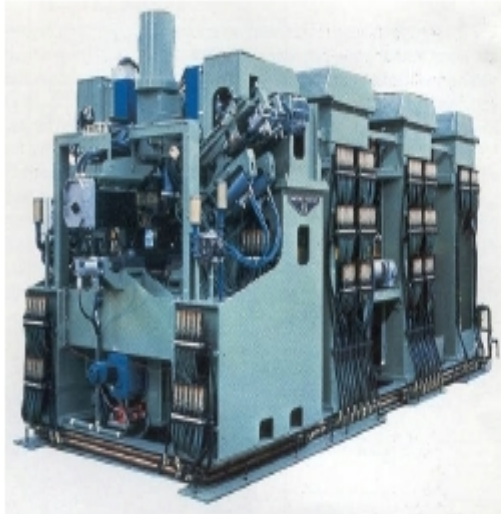
Şekil 3.21. (a) Kaportacı nokta kaynak makinesi (Kaporta düzeltme, tek ve çift taraflı nokta kaynağı, vida saplama, çekirme işlerinde kullanılır. Elle sıkmalı modelleri olup 2+2 mm parça kalınlığına kadar kaynak yapabilir.), (b) Elde taşınabilir nokta kaynak makinesi (Elle veya hava sıkmalı modelleri olup 1+1 mm parça kalınlığına kadar kaynak yapabilir.) [44]

Seyyar makinler genellikle dört ana elemandan oluşurlar;

1. Taşınılabilir kaynak pensesi
2. Kaynak noktaları ve zaman ayarlayıcısı gibi kontrol ünitesi
3. Kaynak transformatörü

3.9.3. Çok nokta kaynak makineleri

Bunlar özel maksatlı makinelerdir. Yüksek imalat hızlarına veya birleştirme çok fazla kaynakla yapılıyorsa kullanılırlar. Bu makinelerin ilk yatırım masrafları yüksek olmasına rağmen işletme masrafları tek nokta kaynağı makinelerinden daha düşüktür. Bu makinelerin çoğunda her bir kaynak kafası ayrı bir transformatöre bağlanmıştır. Kaynaklar aynı anda veya sıra ile gerçekleştirilir. İmal edilen mamul değiştirildiğinde bu makineler kullanılmaz hale gelirler. Bu nedenle bu gün makinelerin yerini programlanabilen robotlar almıştır [48]. Şekil 3.22’de çok nokta kaynak makinelerine örnekler verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.22. (a) Özel tasarımlı tam otomatik elektrik direnç nokta kaynak makinesi (Otomobil fabrikalarında kaporta seri üretiminde kullanılır.), (b) Elektrik direnç nokta kaynak robotu [44]

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Genel

Bu çalışmada, deney malzemeleri olarak seçilen ferritik ve ostenitik paslanmaz çelik saclar; ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik olmak üzere üç seri halinde elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Elektrik direnç nokta kaynak işlemi sırasında elektrot formu, elektrot malzemesi ve elektrot kuvveti sabit kalarak, ön çalışmalar sonucu belirlenen kaynak akımı ve kaynak zamanı değiştirilerek kaynaklı bağlantı numune serileri elde edilmiştir.

Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini saptamak için bütün seriler çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca mikroyapı incelemesi için üretilmiş olan numuneler bakalite alınarak zımparalama, parlatma ve dağlama işleminden sonra mikroskopta incelenmiş ve mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

4.2. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

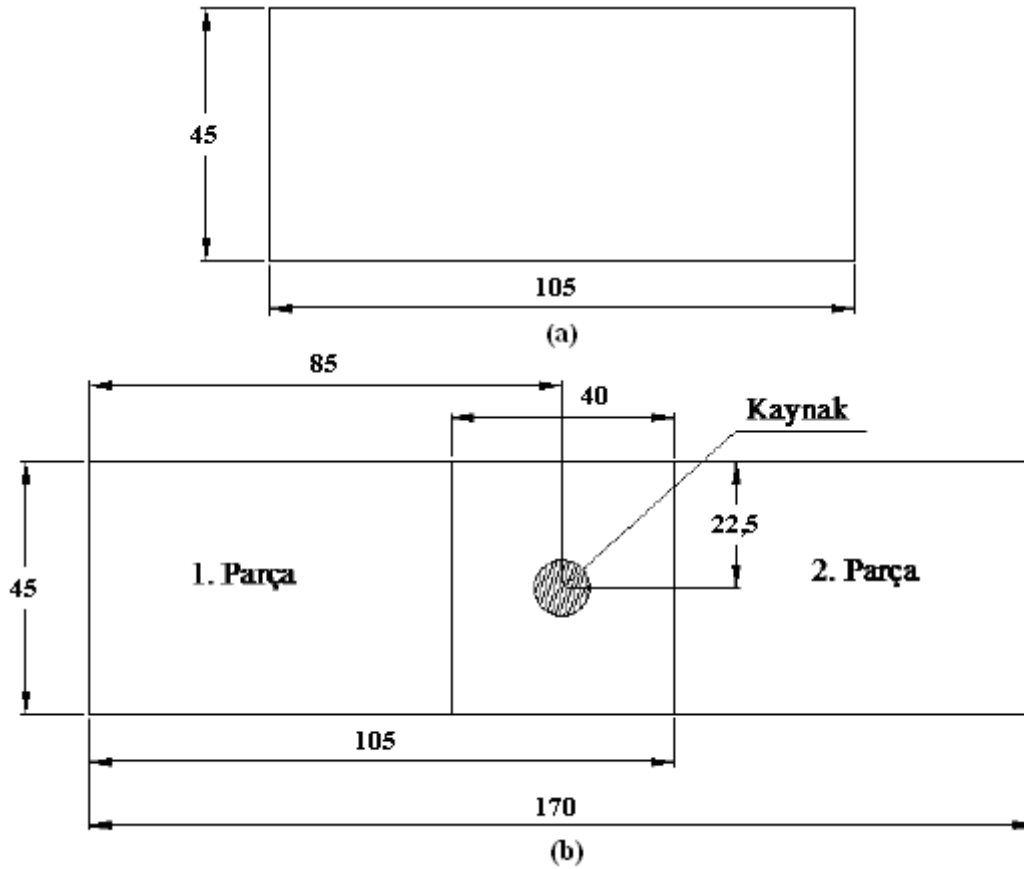
Yapılan deneysel çalışmalarda AISI 430 kalite ferritik ve AISI 310 kalite ostenitik paslanmaz çelik türleri kullanılmıştır. AISI 430 tipi paslanmaz çelikler ferritik grubunun temel alaşımı ve sertleştirilemeyen türü olup daha çok otomotiv sanayinde karoser parçaları ve tampon üretiminde kullanılır. Ayrıca gıda, kimya sanayi, mutfak ekipmanları ve iç mimaride geniş kullanım alanı bulur. AISI 310 tipi paslanmaz çelikler ise ostenitik grubu içerisinde yüksek sıcaklık malzemesi olarak kullanılmaktadır. Isı eşanjörleri, fırın parçaları, yanma odaları ve kaynak dolgu malzemelerinin üretimi başlıca kullanım alanlarıdır. Bu çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Denejde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri [23]

Malzeme (ASTM standardı)	Kimyasal Bileşim (%)						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
AISI 430	0.08	1.00	1.00	0.04	0.03	16-18	-
AISI 310	0.25	2.00	1.50	0.045	0.03	24-26	19-22

4.3. Denej Parçalarının Boyutları

Kaynak edilecek parçaların boyutları ISO/DIS 14273 uluslararası standardına göre saptanmıştır. 1 mm kalınlığında 45x105 mm'lik sac levhalar bindirme pozisyonunda kaynak edilecek şekilde hazırlanmıştır. Kaynak edilecek parçaların boyutları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1(a) Sac numune boyutu, (b) Nokta kaynağı yapıldıktan sonraki numune boyutları

Şekil 4.2’de elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş deney parçalarından bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş deney numunesi

4.4. DeneY Parçalarının Kaynağa Hazırlanması

Piyasadan temin edilen 1000x2000 mm ebatlarında 1 mm kalınlığındaki sac levhalar özel sipariş üzerine lazer kesim cihazlarında Şekil 4.1’de gösterilen numune boyutlarında kesilmiştir. Kesildikten sonra karışık şekilde bir kutu içerisine dağıtılan deney parçalarının yüzeyleri, kaynak işlemini olumsuz etkileyecek yağ, pas ve kir gibi yabancı maddelerden arındırılmak için etil alkol içinde iyice yıkanmış ve temiz pamuklu bir bez ile silinmiştir. Standarda uygun olarak bindirme mesafesi ile kaynak noktaları deney parçaları üzerinde işaretlenmiştir.

4.5. DeneYde Kullanılan Kaynak Makinesi

DeneYlerde, parçaların direnç nokta kaynağı ile birleştirmeleri için 320 kVA gücünde, elektronik akım ve zaman kontrollü, pnömatik basma tertibatlı Decomstar RWC-70P tipi direnç nokta kaynak makinesi kullanılmıştır. Elektrot kuvveti elektrotlar arasına yerleştirilen ve gelen hava basıncını kontrol eden manometreler vasıtasıyla ölçülerek istenilen değerde tutulmuştur.

Kaynak zamanı, sıkıştırma ve tutma zamanları makinenin kendi elektronik donanımları aracılığı ile ayarlanmıştır. Kullanılan direnç nokta kaynak makinesi özellikleri Tablo 4.2’de kaynak makinesi görüntüsü ise Şekil 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kullanılan direnç nokta kaynak makinesinin özellikleri

Makine Adı	Decomstar RWC-70P
Makine Gücü	320 kVA
Besleme Gerilimi	380 V (3 fazlı)
Punta Kollarını Besleyen Hava Basıncı	0-9 kN
Elektrot Çapı	Kesik konik uçlu, uç çapı 6 mm
Elektrotlar Arası Mesafe	25 mm
Elektrot Malzemesi	Kesik konik uçlu ticari saflıkta Cu (Bakır)



Şekil 4.3. Kaynaklı bağlantıların yapıldığı elektrik direnç nokta kaynak makinesi

4.6. Deneyde Kullanılan Elektrotlar

Deneylerde kesik konik uçlu, uç çapı 6 mm olan ticari saflıkta bakır elektrotlar kullanılmıştır. 16 mm kalınlıkta silindirik düz bakır elektrotlar deneyin yapıldığı firmada tornada işlenerek özel olarak kesik konik uçlu hale getirilmektedir.

4.7. Deneilerin Yapılışı

4.7.1. Elektrik direnç nokta kaynağının yapılışı

Öncelikle, deney parçalarının birleştirilebileceği, kaynak parametrelerini belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Ön çalışmalarda, direnç nokta kaynak işlem parametrelerinden; kaynak akımı ve kaynak zamanı değiştirilerek numunelerin birleştirilebildiği kaynak parametreleri belirlenmiştir. Elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının çok düşük ve çok yüksek olduğu ön deneylerde, yetersiz birleştirme ve fazla deformasyondan dolayı kabul edilebilir kaynak çekirdeği sınırları aşılmıştır. Ön deneylerin değerlendirilmesi sonucunda; elektrot kuvveti 6 kN olarak sabit alınıp, kaynak akımı olarak 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA ve kaynak zamanı olarak ise; 5, 15 ve 25 periyotun (1 periyot = 0.02 sn) uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Şekil 4.1'deki gibi boyutlandırılan ve yüzeyleri etil alkol içerisinde ultrasonik olarak temizlenmiş sac numuneler, üzerindeki işaretlemeler yardımıyla 40 mm bindirme mesafesi gözetilerek üst üste getirilmiş ve elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Kaynak süresince elektrot kuvveti sabit tutulup, kaynak akımı ve zamanı cihazın kontrol ünitesi tarafından istenilen parametrelere göre ayarlanmıştır. Deney esnasında kullanılan kaynak parametreleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Birleştirme işleminde kullanılan kaynak parametreleri

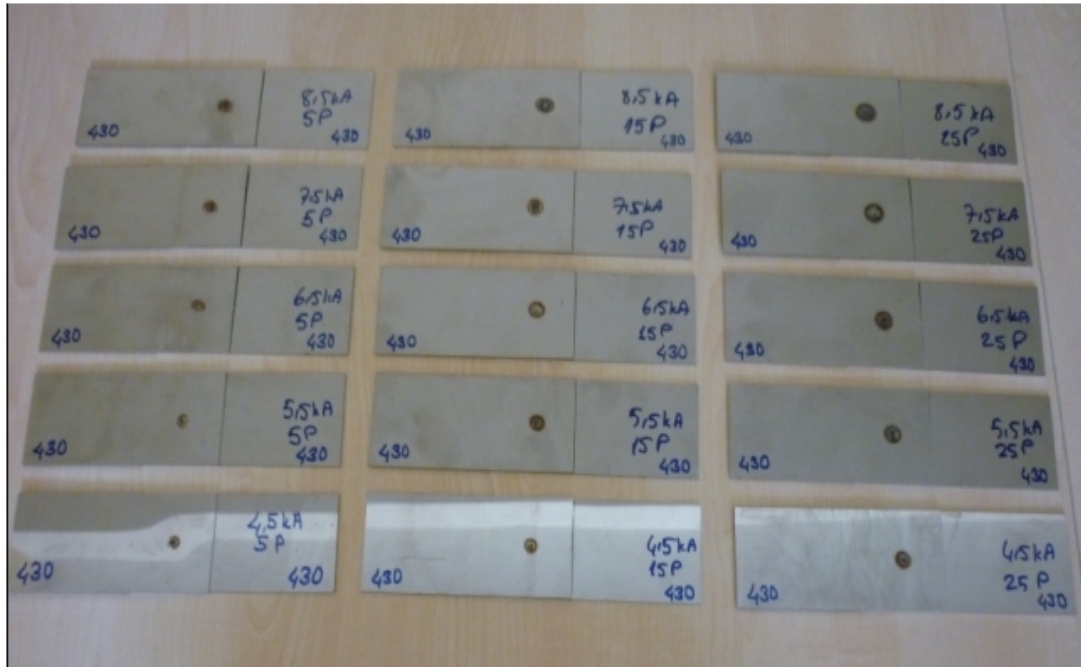
Elektrot Kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (A)	Sıkıştırma Zamanı (Periyot)	Kaynak Zamanı (Periyot)			Tutma Zamanı (Periyot)
6	4.5	20	5	15	25	20
	5.5					
	6.5					
	7.5					
	8.5					

Kaynak işlemleri her bir parametreden 5'er adet birleştirme yapılarak ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik halinde 3 seri olmak üzere toplam 225 adet

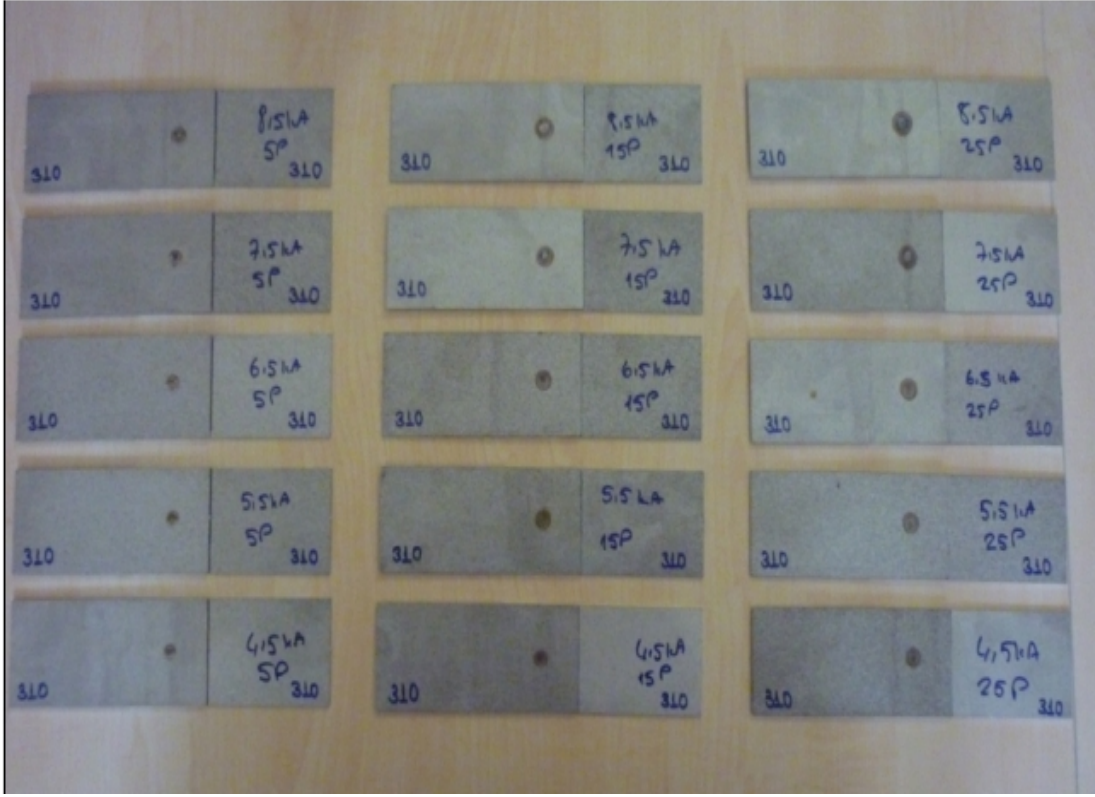
gerçekleştirilmiş ve kaynak işlemi biten numuneler üzerine kaynak parametreleri yazılarak soğumaya bırakılmıştır. Şekil 4.4’de kaynak işleminin uygulanması ve 4.5, 4.6 ile 4.7’de ise kaynaklı bağlantı numuneleri gösterilmiştir.



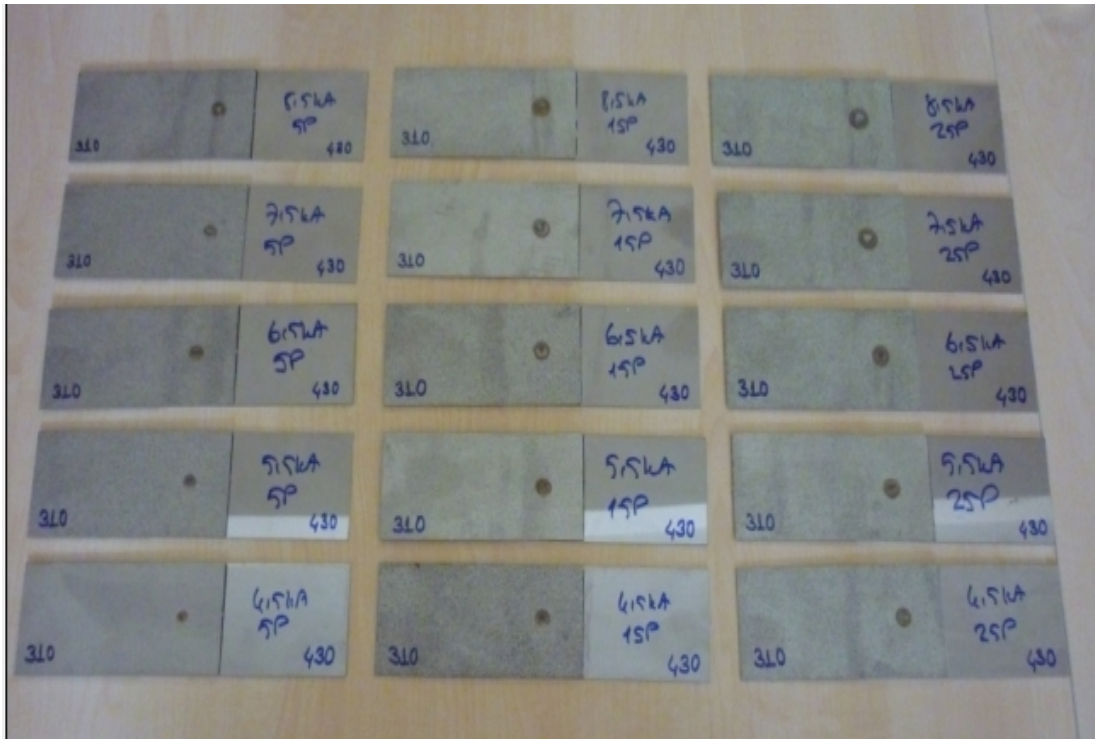
Şekil 4.4. Elektrik direnç nokta kaynak işleminin gerçekleştirilmesi



Şekil 4.5. Ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait kaynaklı bağlantı numuneleri



Şekil 4.6. Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftine ait kaynaklı bağlantı numuneleri



Şekil 4.7. Ferritik-ostenitik (430+310) çiftine ait kaynaklı bağlantı numuneleri

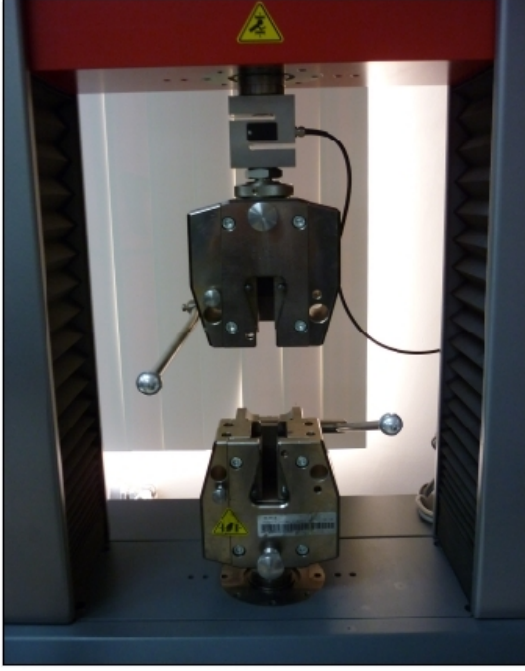
4.7.2. Çekme-makaslama deneyi

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen kaynaklı parçalar, mekanik özelliklerin tespiti için laboratuvar koşullarında çekme-makaslama deneyine tabi tutulmuşlardır. Deneyde Şekil 4.8’de resmi verilen, SAÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarındaki 5 ton kapasiteli Zwick Roell marka çekme testi cihazı kullanılmıştır. Direnç nokta kaynak yöntemi ile 15 farklı parametrede birleştirilmiş kaynaklı parçaları, çekme testi cihazının çenelerine aksel olarak bağlayabilmek için parçaların bir tarafına boyuna doğrultuda tam orta noktasından geçen bir çizgi çizilmiştir. Bu çizgi vasıtasıyla cihaza uygun şekilde bağlanan tüm parçaların 3 mm/dk sabit çekme hızında çekme makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme-makaslama kuvveti olarak verilen değerler, cihazın skalasından okunan maksimum değerlerdir. Çekme-makaslama deneyi, kaynak esnasında meydana gelebilecek kaynak hatalarının etkisini en az seviyede tutabilmek amacıyla, her bir parametreden 3 adet olmak üzere toplamda 135 adet parçaya uygulanmış ve grafikler bu üç sonucun ortalaması alınarak çizilmiştir.



Şekil 4.8. Çekme test cihazı ve donanımı

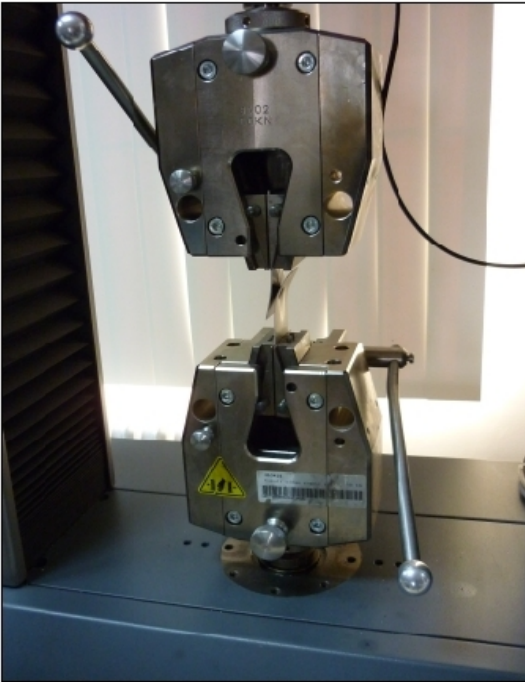
Deney parçalarının çekme test cihazına bağlanması ve çekme-makaslama deneyinin uygulanmasına ait resimler Şekil 4.9(a)- (d)'de verilmiştir.



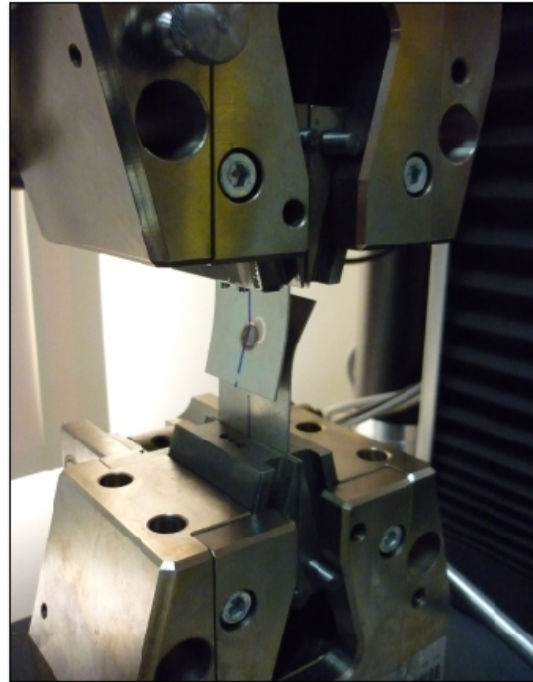
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.9(a)-(d) Çekme-makaslama deneyinin uygulanması

Çekme-makaslama deneyleri esnasında 3 değişik tipte kopma gerçekleştiği görülmüştür. Bunlar ayrılma, düğmelenme ve yırtılma şeklindeki kopmalardır. Çekme-makaslama deneyi sonucu elde edilen kopma tipleri, deney sonucu elde edilen kopma görüntüleri ile birlikte deney sonuçlarının irdelenmesi kısmında daha detaylı olarak incelenmiştir.

4.7.3. Kaynak bağlantılarının çekirdek çapının ölçülmesi

Direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmiş deney parçalarında, kaynak akımı ve kaynak zamanının kaynak çekirdek boyutuna etkilerini incelemek amacı ile tüm bağlantıların kaynak çekirdek çapları ölçülmüştür.

Farklı parametreler (6 kN elektrod kuvveti, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA kaynak akımı, 5, 15 ve 25 periyot kaynak zamanı) kullanılarak, direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numuneler üzerinde çekirdek çapı ölçümü dijital kumpas ile yapılmıştır. Yapılan ölçümler neticesinde kaynak çekirdek çapları saptanmış ve kaynak akımı ile kaynak zamanının çekirdek çaplarına etkisi deney sonuçlarının irdelenmesi kısmında grafiklerle gösterilerek daha detaylı olarak incelenmiştir.

4.7.4. Kaynak bağlantılarının sertlik değerlerinin ölçümü

Farklı kaynak parametrelerinde direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş parçalarda ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği üzerindeki sertlik değişimini tespit etmek amacıyla kaynaklı bağlantılardan metalografik muayene için seçilen toplam 24 adet parçaya mikrosertlik testi uygulanmıştır. Mikrosertlik deneyleri, SAÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarında bulunan Şekil 4.10'da resmi verilen Struers Duramin-A300 marka cihaz ile 0.5 kg yük altında 15 sn bekletilip izler oluşturularak yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri ile grafikler çizilerek, kaynak akımı ve kaynak zamanının etkileri incelenmiştir.



Şekil 4.10. Mikrosertlik ölçümünde kullanılan vickers ölçüm cihazı (Struers)

4.7.5. Kaynak bağlantılarının metalografik incelemesi

Direnç nokta kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilmiş parçalarda, kaynak akımı ve kaynak zamanının, kaynak bölgesindeki tane morfolojisine etkilerinin belirlenmesi amacıyla optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tüm kaynaklı bağlantılardan en gerçekçi sonuçları almak için metalografik deney numuneleri maksimum çekme-makaslama dayanımının elde edildiği parametrelerin bir altı ve bir üstü alınarak seçilmiştir. Yani tüm serilerde maksimum çekme-makaslama dayanımının elde edildiği 7,5 kA akım şiddeti 5, 15, 25 periyot kaynak zamanlarındaki numuneler ile çekme-makaslama dayanımının düşme gösterdiği 8,5 kA akım şiddeti 5, 15, 25 periyot kaynak zamanlarındaki numuneler ve maksimum çekme-makaslama dayanımına yakın değerlerin elde edildiği 6,5 kA kaynak akımı ve 15, 25 periyot kaynak zamanlarındaki numuneler seçilmiştir. Böylece ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik serilerinin her birinden 8'er adet olmak üzere toplamda 24 adet olan kaynaklı numune seçilmiştir. Seçilen numuneler mekanik olarak çekirdek ortasından kesilmiş ve kesme işleminden sonra bakalite alma cihazı ile bakalit içerisine gömülmüştür. Daha sonra Şekil 4.11(c)'de resmi verilen cihaz yardımıyla zımparalama ve parlatma işlemleri otomatik olarak yapılmıştır.

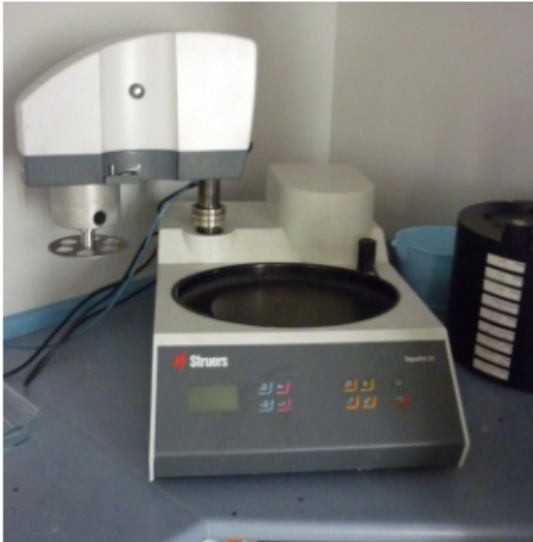
Zımparalama ve parlatma işleminden sonra numuneler mikroyapılarının görülebilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Ferritik parçalar %3'lük Nital ile dağlanırken ostenitik parçalar için özel çözeltiler hazırlanmıştır. Mikroyapı incelemesi Şekil 4.11(d)'de resmi verilen Axio Imager.A1m marka optik mikroskopta yapılmıştır. Şekil 4.11(a)-(d)'de kesme işleminden mikroskopta inceleme işlemine kadar kullanılan cihazların görüntüleri sırasıyla gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.11. Metalografi deneylerinde kullanılan cihazlar; (a) Kesme cihazı, (b) Bakalite alma cihazı, (c) Zımparalama ve parlatma cihazı, (d) Axio Imager A1m optik mikroskop

Şekil 4.12’de metalografik inceleme için seçilen kaynaklı bağlantıların kaynak çekirdeğinin ortasından kesildikten sonra bakalite almadan önceki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.12. Metalografik incelemeler için kesilen parçaların bakalite alınmadan önceki görüntüsü

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

5.1. Genel

Bu çalışmada biri ferritik diğeri ostenitik olmak üzere iki farklı tür paslanmaz çelik çifti; ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik şeklinde 3 farklı kombinasyonda ve farklı kaynak parametrelerinde direnç nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Birleştirme işlemi esnasında kaynak akımı, kaynak zamanı, elektrot formu ve malzemesi gibi kaynak parametrelerinin bağlantıların çekme-makaslama dayanımı, sertlik ve mikroyapı özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Deneylerde daha çok otomotiv sanayinde karoser parçaları ve tampon üretiminde kullanılan AISI 430 tipi temel ferritik kalite paslanmaz çelik ile ısı eşanjörleri, fırın parçaları ve yanma odaları imalatı gibi alanlarda kullanılan yüksek sıcaklık malzemesi AISI 310 kalite ostenitik paslanmaz çelikler kullanılmış ve deneyler laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

5.2. Bağlantıların Çekme-Makaslama Deneyi Sonuçları

Farklı kaynak parametrelerinde (6 kN elektrot kuvveti, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA kaynak akımı ve 5, 15 ve 25 periyot kaynak zamanında, toplam 15 farklı parametrede) direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmiş paslanmaz çelik parçalarda, farklı parametrelerin kaynak dikişinin mekanik özelliklere etkisinin tespiti için her parametreden 3'er adet olmak üzere 3 farklı kombinasyon (ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik) için toplamda 135 kaynaklı parçaya çekme-makaslama deneyi uygulanmıştır. Çekme-makaslama deneyi sonucunda elde edilen 3 değerın ortalamaları alınarak, parçaların çekme-makaslama dayanımları elde edilmiştir. Tablo 5.1'de ferritik-ferritik çiftine ait kaynaklı bağlantı numunelerinin çekme-makaslama deney sonuçları ile bu sonuçların ortalamaları alınarak bulunan çekme makaslama dayanımları verilmiştir.

Tablo 5.1. Ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait numunelerin çekme-makaslama deneyi sonuçları

Elektrot Kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (Periyot)	Çekme-Makaslama Dayanımı (daN)			
			1.Numune	2.Numune	3.Numune	Ortalama
6	4.5	5	598	585	610	597.67
		15	634	641	654	643.00
		25	661	658	674	664.33
	5.5	5	741	761	753	751.67
		15	811	805	844	820.00
		25	849	861	854	854.67
	6.5	5	806	828	825	819.67
		15	887	913	936	912.00
		25	963	960	965	962.67
	7.5	5	920	910	918	916.00
		15	1069	1085	1086	1080.00
		25	1052	1063	1054	1056.33
	8.5	5	891	882	880	884.33
		15	1015	998	1014	1009.00
		25	987	977	974	979.33

Tablo 5.1 genel olarak incelediğinde ferritik-ferritik çiftine ait kaynaklı bağlantılarda, kaynak akımı ve kaynak zamanının artmasıyla çekme-makaslama dayanımının belirli bir değere kadar arttığı tespit edilmiştir.

Bağlantılarda sabit tutulan her üç kaynak zamanında 4.5 kA gibi düşük akım şiddetlerinde küçük çekirdek kesiti olduğundan ayrılma tipinde kopma olmakta ve düşük mukavemet değerleri elde edilmektedir. Nitekim en düşük çekme-makaslama dayanımı 4.5 kA kaynak akımı ve 5 periyotluk kaynak süresinde elde edilmiştir. Arttırılan akım şiddeti ile 5 periyot olarak sabit tutulan kaynak süresinde düşük çekme-makaslama dayanımı değerleri elde edilirken, 15 ve 25 periyotluk kaynak sürelerinde ise çekirdek kesiti büyüdüğünden daha yüksek çekme makaslama dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek çekme-makaslama dayanımına 7.5 kA kaynak akımı ve 15 periyotluk kaynak süresinde ulaşılmıştır. Ancak 7.5 kA akım şiddetinde 25 periyotluk kaynak süresinden sonra çekme-makaslama dayanımı değerlerinde düşme başlamıştır. Özellikle 8.5 kA gibi yüksek akım şiddetlerinde seçilen tüm kaynak sürelerinde çekme-makaslama dayanımı değerleri düşmüştür.

Bunun nedeni ise yüksek akım şiddetlerinde saclar arasında kuvvetli bir fişkırmann yanı sıra sac üst yüzeylerinden de fişkıma oluşmakta ve dolayısı ile derin ve çirkin elektrot izleri kaynak kalitesini ve çekme-makaslama dayanımını değerlerini düşürmüştür. Şekil 5.1'deki örnekte yüksek akım şiddetinde saclar arasında oluşan fişkıma ve çirkin elektrot izleri çekme testinden sonra rahatlıkla görülebilmektedir.



Şekil 5.1. 7.5 kA kaynak akım şiddeti, 25 P kaynak zamanında ferritik-ferritik parçalarda sac arayüzünde oluşan fişkıma ve çirkin elektrot izleri

Tablo 5.2'de ostenitik-ostenitik çiftine ait kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama deney sonuçları ve bu sonuçların ortalamasına göre bulunan değerler verilmiştir.

Tablo 5.2. Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftine ait numunelerin çekme-makaslama deneyi sonuçları

Elektrot Kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (Periyot)	Çekme-Makaslama Dayanımı (daN)			
			1.Numune	2.Numune	3.Numune	Ortalama
6	4.5	5	660	634	664	652.67
		15	700	745	718	721.00
		25	794	757	777	776.00
	5.5	5	781	764	790	778.33
		15	868	860	780	836.00
		25	918	856	921	898.33
	6.5	5	858	867	886	870.33
		15	998	1012	1008	1006.00
		25	1042	1058	1052	1050.67
	7.5	5	1013	998	987	999.33
		15	1123	1136	1144	1134.33
		25	1152	1168	1187	1169.00
8.5	5	930	973	942	948.33	
	15	1051	1019	1067	1045.67	
	25	1096	1099	1030	1075.00	

Tablo 5.2 incelendiğinde ise ostenitik-ostenitik çiftine ait kaynaklı bağlantılarda ferritik-ferritik çiftine nazaran daha yüksek çekme-makaslama dayanımı değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu durum ferritik parçalara nazaran daha yüksek mukavemete sahip ostenitik parçaların direnç nokta kaynağı bağlantılarının daha yüksek çekme-makaslama dayanımına sahip olduklarını göstermektedir. Ostenitik-ostenitik çiftine ait parçaların kaynağında da artırılan kaynak akımının yanı sıra kaynak süresinin uzun tutulması, ısı girdisini arttırdığından kaynak çekirdeği kesiti büyümekte ve daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmektedir. Nitekim Tablo 5.2 incelendiğinde 4.5 kA kaynak akımı ve 5 periyotluk kaynak süresinde en düşük, 7.5 kA kaynak akımı ve 25 periyotluk kaynak süresinde ise en yüksek çekme-makaslama dayanımına ulaşılmıştır. 8.5 kA gibi yüksek akım şiddetlerinde ise tüm kaynak sürelerinde çekme-makaslama dayanımlarında bir düşüş olduğu görülmüştür. Bunun nedeni Şekil 5.1’de ferritik parçalarda gösterildiği gibi ostenitik parçaların gerek arayüzeylerinde gerekse parçaların yüzeylerinde fişkırmaların oluşması ve derin elektrot izleridir. Bu çalışmanın esas önemli kısmı olan ferritik-ostenitik çiftinin kaynaklı bağlantılarından elde edilen sonuçlar Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. Ferritik-ostenitik (430+310) çiftine ait numunelerin çekme-makaslama deneyi sonuçları

Elektrot Kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (Periyot)	Çekme-Makaslama dayanımı (daN)			
			1.Numune	2.Numune	3.Numune	Ortalama
6	4.5	5	642	649	627	639.33
		15	742	674	720	712.00
		25	744	754	760	752.67
	5.5	5	763	740	762	755.00
		15	847	858	844	849.67
		25	894	862	880	878.67
	6.5	5	842	841	835	839.33
		15	938	943	924	935.00
		25	974	973	931	959.33
	7.5	5	902	906	897	901.67
		15	1013	1092	1084	1063.00
		25	1088	1097	1094	1093.00
8.5	5	892	856	913	887.00	
	15	975	962	953	963.33	
	25	994	997	986	992.33	

Tablo 5.3’de verilen sonuçlara bakıldığında ise elde edilen çekme-makaslama dayanımı değerlerinin daha önce yapılan ferritik-ferritik ve ostenitik-ostenitik çiftine ait kaynaklı bağlantılardan elde edilen değerlerin arasında olduğu görülmüştür. Yani çekme-makaslama dayanımı ferritik parçalara göre biraz artmış ostenitik parçalara göre ise biraz azalmıştır. En yüksek çekme-makaslama dayanımı değerine 7.5 kA kaynak akımı ve 25 periyotluk kaynak süresinde ulaşılmıştır. En düşük değere ise yine daha önceki çalışmalarda görüldüğü gibi 4.5 kA kaynak akımı ve 5 periyotluk kaynak süresinde ulaşılmıştır.

Ferritik-ostenitik çiftinin kaynaklı bağlantılarında özellikle 8.5 kA kaynak akım şiddetinde, 15 ve 25 periyotluk kaynak sürelerinde parçaların arayüzeylerinde hem ferritik hem de ostenitik taraftan fişkirmalar meydana gelmekte ve toplam fişkırmalar miktarı arttığından mukavemet değerleri daha önce yapılan ferritik ve ostenitik çiftlerinin kaynağına nazaran biraz daha fazla düşmektedir. Özellikle 25 periyotluk kaynak süresinde parçaların arayüzeylerinde fişkırmaların oluşumunun yanısıra parçaların üst yüzeyinde (ostenitik çelikte) aşırı tav rengi ile elektrot basma yüzeyinden fişkırmalar oluşmaktadır.

Ferritik-ostenitik çiftinin kaynaklı bağlantılarında çekme-makaslama deneyinin uygulanmasında göze çarpan önemli bir hususta akım şiddetinin artmasına bağlı olarak düğmelenme tarzında kopmaların oluşmasının yanısıra ferritik parçada çekirdek dibinden başlayarak yırtılma olmasıdır. Bunun sebebi olarak da ferritik paslanmaz çeliklerin direnç nokta kaynağında çekirdeğe komşu ITAB’da iri taneli yapının gevrekliği görülmektedir.

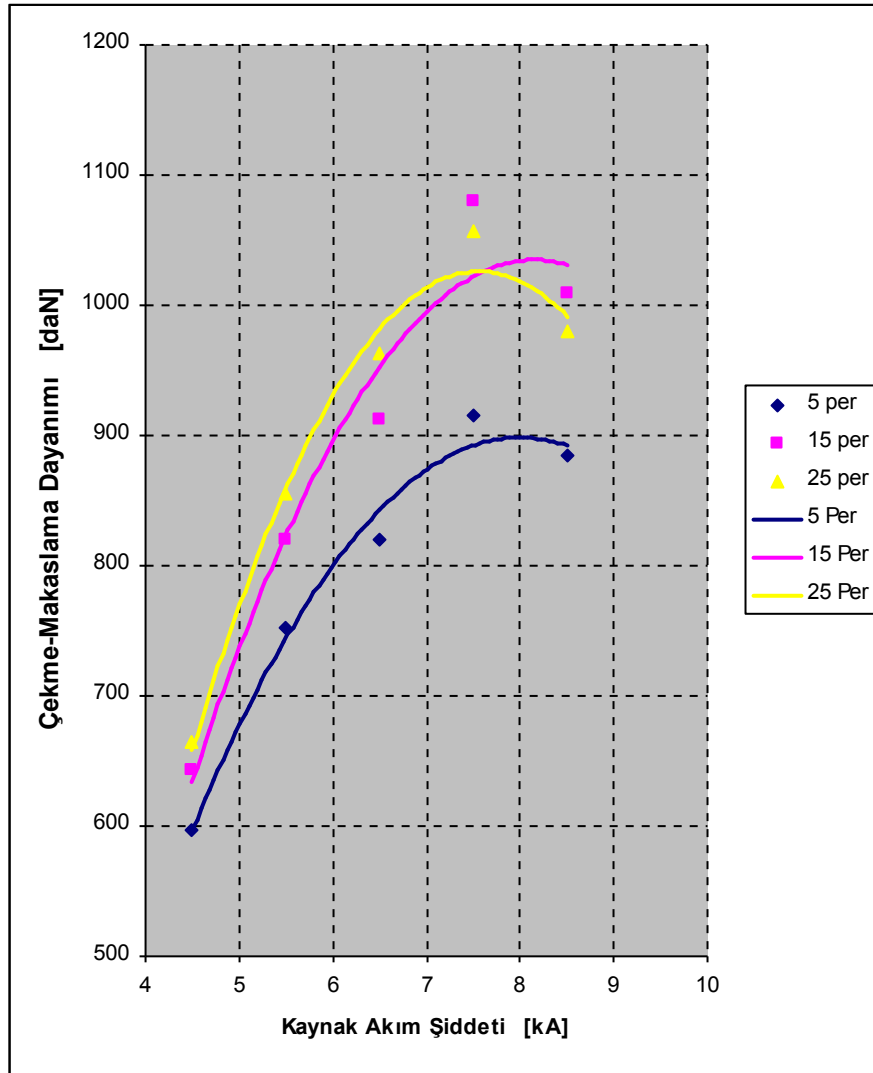


Şekil 5.2. 7.5 kA kaynak akım şiddeti, 15 P kaynak zamanında ferritik-ostenitik parçalarda çekme-makaslama deneyinde ferritik parçalarda görülen çekirdek dibinden yırtılma

Bu çalışmada “kaynak akım şiddeti” ve “kaynak zamanı” bağlantıların mukavemetini etkileyen iki önemli parametre olarak ele alınmıştır. Aşağıda bu parametrelerin bağlantıların çekme-makaslama dayanımına olan etkileri grafik olarak gösterilmiştir.

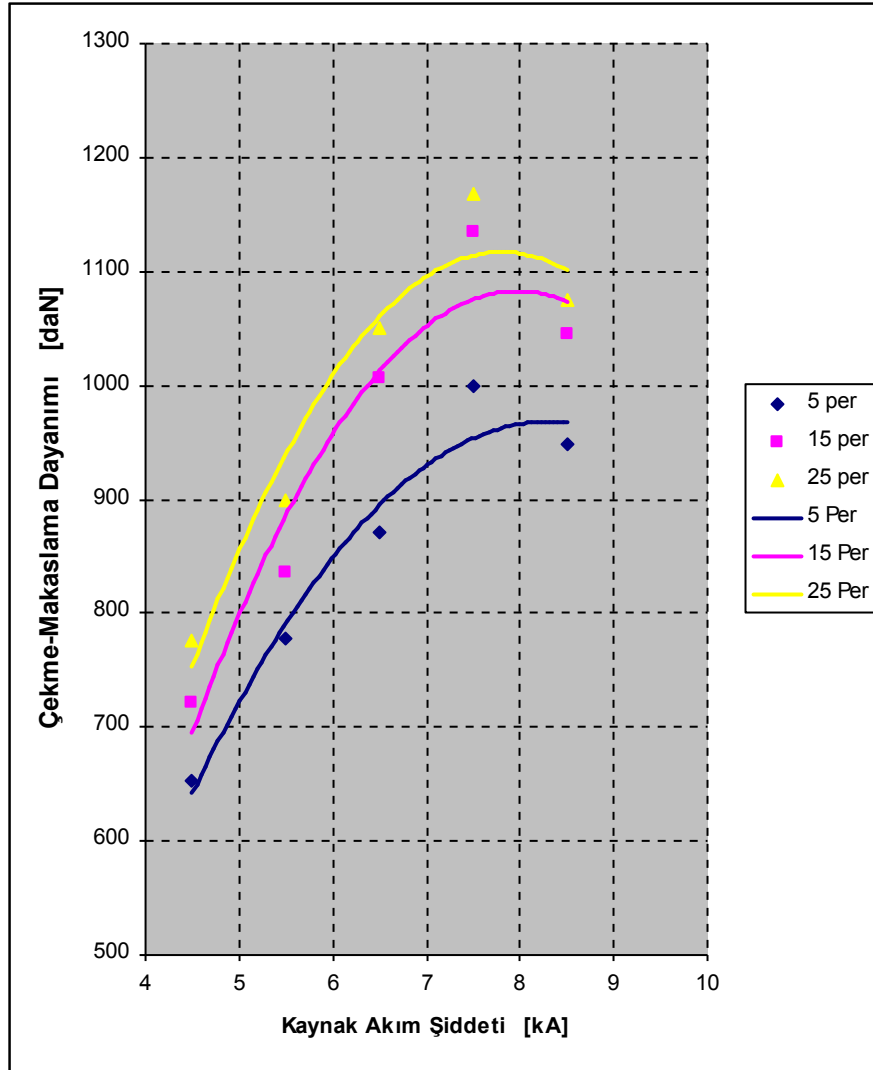
5.2.1. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak akım şiddetinin etkisi

Şekil 5.3’de ferritik-ferritik çiftine ait kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak akım şiddetinin etkisi grafik olarak gösterilmiştir.



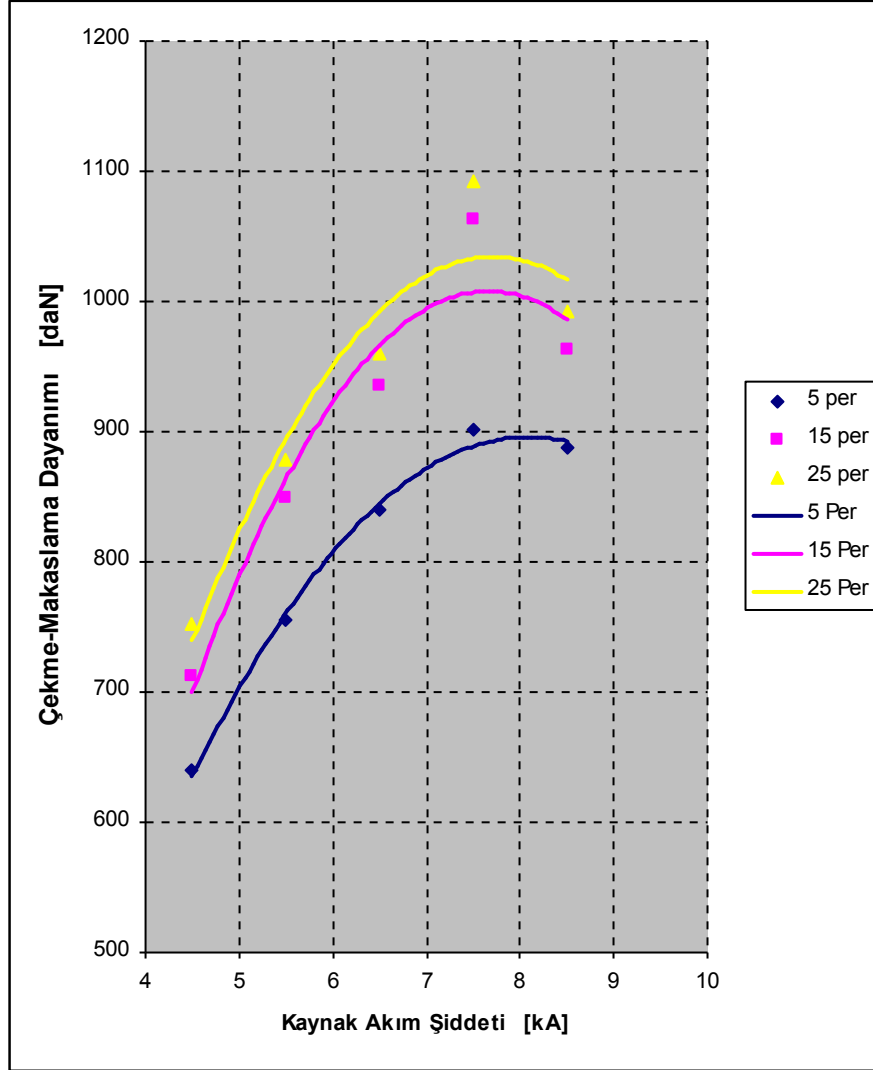
Şekil 5.3. Ferritik-ferritik (430+430) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 5.4’de ostenitik-ostenitik çiftine ait kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak akım şiddetinin etkisi grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 5.5’de ise bu çalışmanın esas önemli kısmını oluşturan ferritik-ostenitik çiftine ait kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak akım şiddetinin etkisi verilmiştir.



Şekil 5.5. Ferritik-ostenitik (430+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak akım şiddetinin bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Direnç nokta kaynağında kaynak akımının, kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına etkisi Şekil 5.3-5.5’deki grafiklerden incelenecek olursa, kaynak akımı artışına paralel olarak, çekme-makaslama dayanımının arttığı görülmektedir. Anık [46], Anık ve arkadaşları [47], artan kaynak akım değerlerinin direnç kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımını arttıracaklarını bildirmişlerdir.

Anık ve Gülbahar [58], 1.5 mm kalınlığındaki ferritik paslanmaz çelik sacları, 5 kN elektrot kuvvetinde 5, 15, 25 ve 50 periyot kaynak zamanlarında ve 5.5-14.5 kA (1 kA artışla) kaynak akımlarında direnç nokta kaynağı ile birleştirmiş ve bütün kaynak zamanlarında akım şiddeti arttıkça kaynak çekirdek çapının arttığı ve yassılaştığı, bununla birlikte çekme-makaslama mukavemetinin arttığını ancak belirli bir değerden sonra nufuziyetin azaldığı ve mukavemetin düştüğünü bildirmişlerdir.

Özyürek [16], 1 mm kalınlıklı 304L ostenitik paslanmaz çelik sacları, 4, 7 ve 9 kA kaynak akımlarında, 8 bar elektrot kuvvetiyle, atmosfer ve nitrojenli ortamda direnç nokta kaynağı ile birleştirmiştir. Sonuçta artan kaynak akımı ile ısı girdisinden dolayı çekirdek boyutunun büyüdüğünü ve kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımının arttığını bildirmiştir.

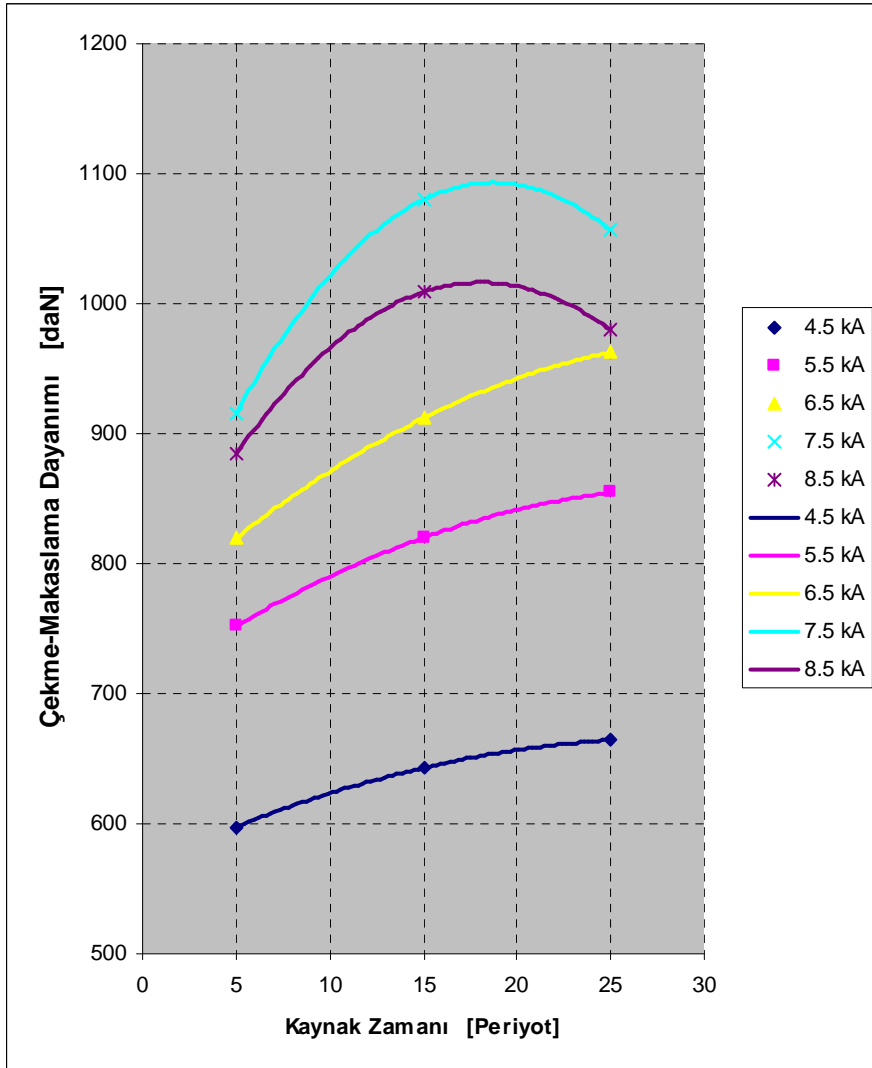
Benzer çalışmalarında Fukumoto et al. [59], 0.2-0.5 mm kalınlığında, 25 mm uzunluğunda ve 8 mm genişliğinde çeşitli ostenitik paslanmaz çelik levhaları, (302, 304, 310S, 316L ve 347) direnç nokta kaynağı ile birleştirmişler ve kaynak akımının artışıyla çekirdek genişlemesinden dolayı çekme-makaslama dayanımının arttığını rapor etmişlerdir.

Marashi et al. [60], 1 mm kalınlığında düşük karbonlu galvanizli çelik ile 1.2 mm kalınlığında ostenitik paslanmaz çelik malzemeleri direnç nokta kaynağı ile birleştirmiş ve düşük kaynak akımlarında bağlantıların, küçük ergime bölgesi boyutuna ve ara yüzey boyunca düşük çekme-makaslama dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, aşırı yüksek kaynak akımlarında ise kaynaklı bağlantılarda, daha geniş ergime bölgesi oluşmasına rağmen ara yüzey boyunca düşük çekme-makaslama dayanımına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

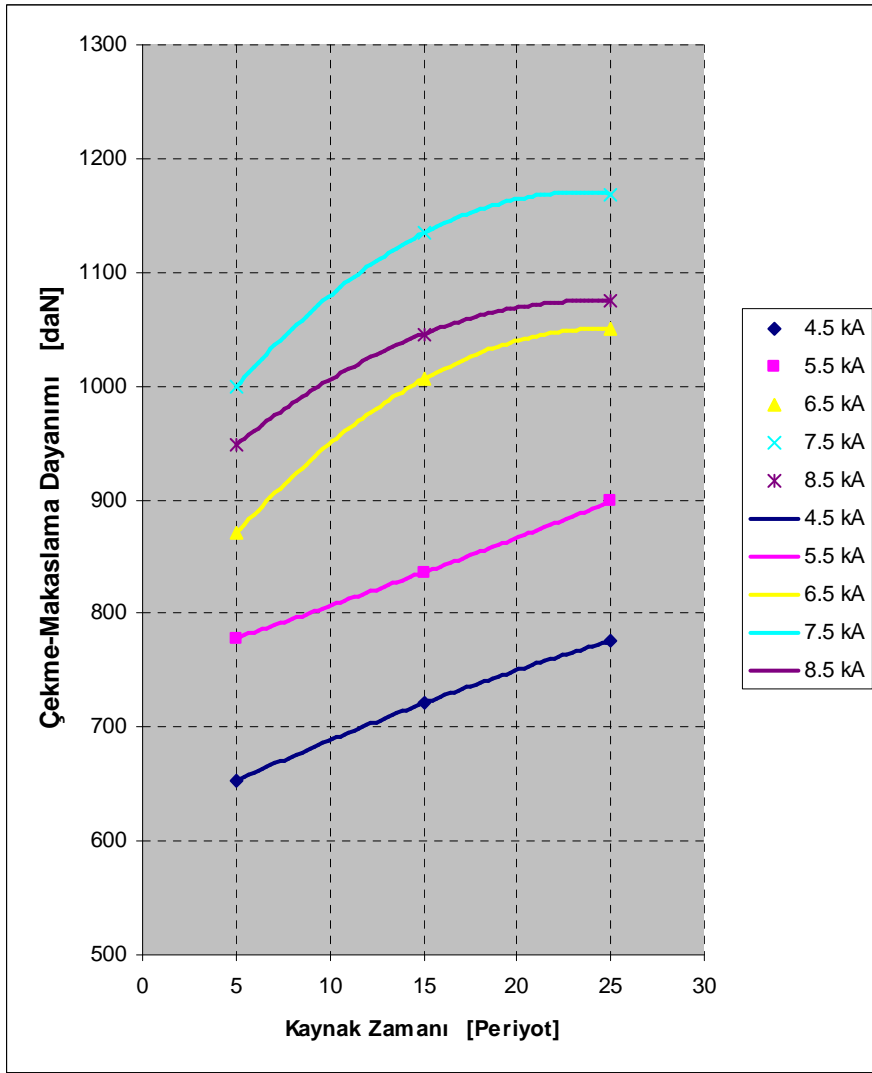
Vural ve Akkuş [61], farklı kalınlıklardaki galvanizli çelik ve ostenitik paslanmaz çelik sacları, 5.5-13 kA (0.5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 3.4 kN elektrot kuvvetinde direnç nokta kaynağı ile birleştirmişler ve kaynak akımı arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapının arttığı, kaynak çekirdeği çapı arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin arttığını rapor etmişlerdir.

5.2.2. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak zamanının etkisi

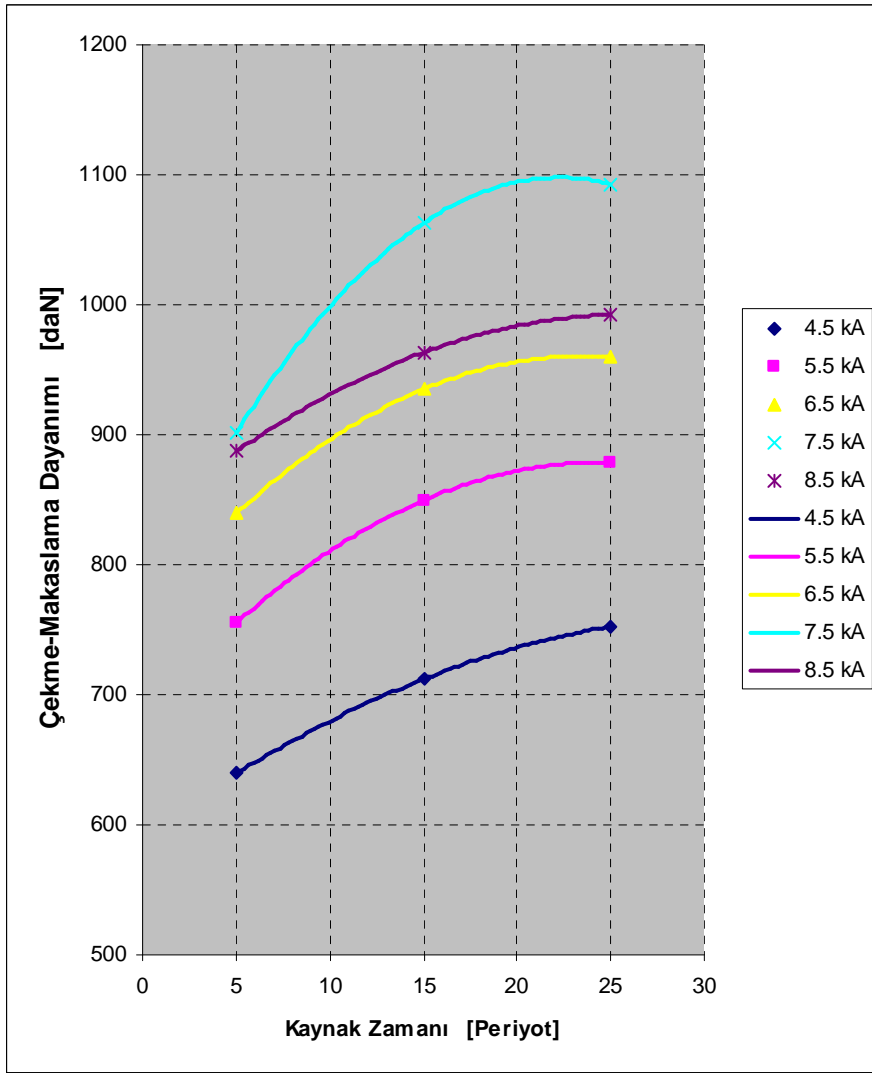
Kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına kaynak zamanının etkisi Şekil 5.6-5.8’de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Ferritik-ferritik çiftinin (430+430) elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanının bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi



Şekil 5.7. Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanının bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi



Şekil 5.8. Ferritik-ostenitik (430+310) çiftinin elektrik direnç nokta kaynağında kaynak zamanının bağlantının çekme-makaslama dayanımına etkisi

Şekil 5.6-5.8'deki grafikler incelendiğinde yapılan çalışmalar sonucunda artan kaynak zamanının da, kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımına etkili olduğu görülmektedir. Kaynak akımının artışıyla olduğu gibi, kaynak zamanının artmasıyla da kaynaklı bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarının arttığı görülmüştür.

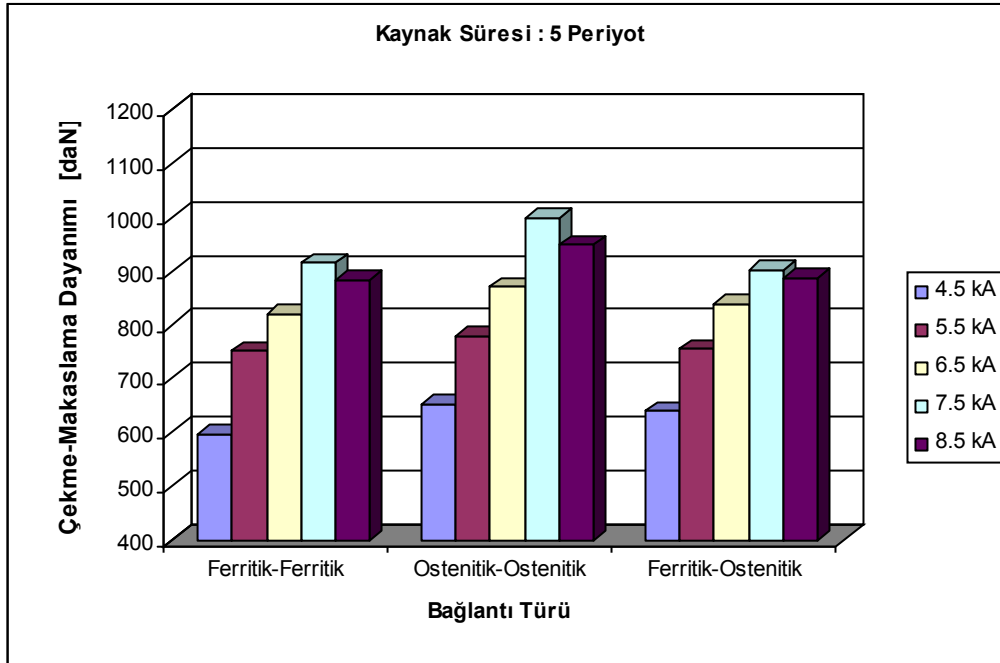
Hayat [55], Hasanbaşoğlu [17], Aslanlar ve arkadaşları [14] ve Chuko and Gould [62], yaptıkları çalışmalarda, artan kaynak zamanının ısı girdisi üzerinde, akım şiddeti artışı gibi etki göstererek, benzer ve farklı malzeme çiftlerinin direnç nokta

kaynaklı birleştirmelerin dayanımlarını arttırdığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde Kocabekir ve arkadaşları [15], Hayat ve arkadaşları [64], yaptıkları çalışmalarda, artan kaynak zamanına bağlı olarak, birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımlarının arttığını bildirmişlerdir.

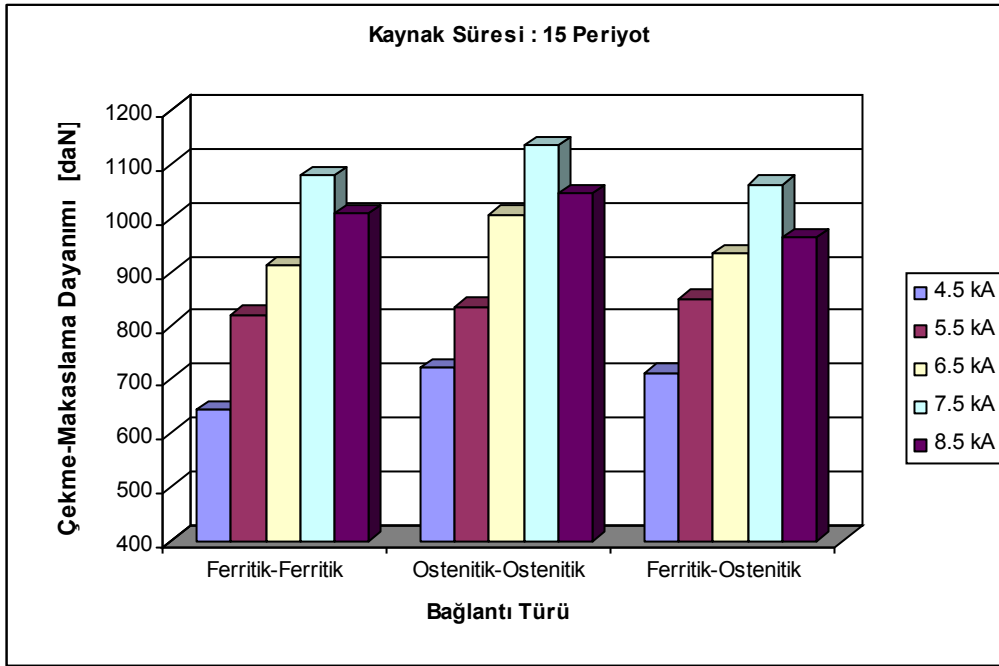
Benzer çalışmalarında Martin et al. [64], 0.8 mm kalınlığında 304 ostenitik paslanmaz çelik sacları, 1.5 – 6.5 kA (0.5 kA artışla) kaynak akımlarında ve 1 ve 1.5 kN elektrot kuvveti kullanılarak direnç nokta kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, kaynak zamanı ve akımın artışı ile ısı girdisi artmış ve kaynak çekirdeği genişlemiş, bundan dolayı çekme-makaslama mukavemeti artmış, fakat kaynak zamanı ve kaynak akımı değerlerinin aşırı artışının akmaya neden olduğunu bildirilmişlerdir.

5.2.3. Bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarına göre karşılaştırılması

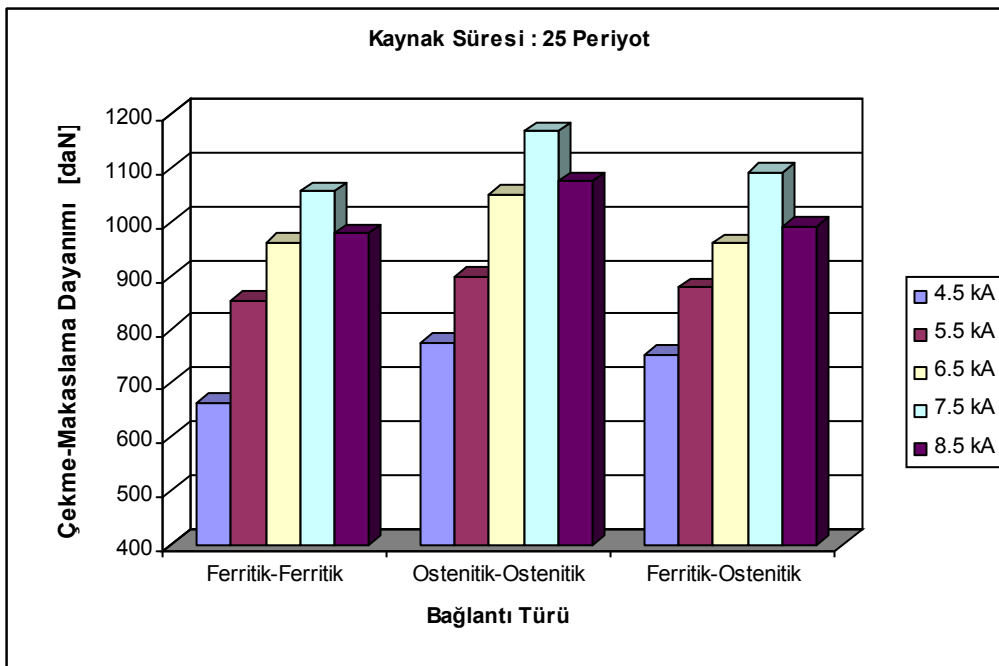
Çekme-makaslama dayanımı değerleri Şekil 5.9- 5.11’de verilen grafikler üzerinde gösterilerek, çekme makaslama dayanımlarına göre bağlantı türleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.9. 5 periyot kaynak süresinde çekme-makaslama dayanımlarına göre bağlantıların karşılaştırılması



Şekil 5.10. 15 periyot kaynak süresinde çekme-makaslama dayanımlarına göre bağlantıların karşılaştırılması



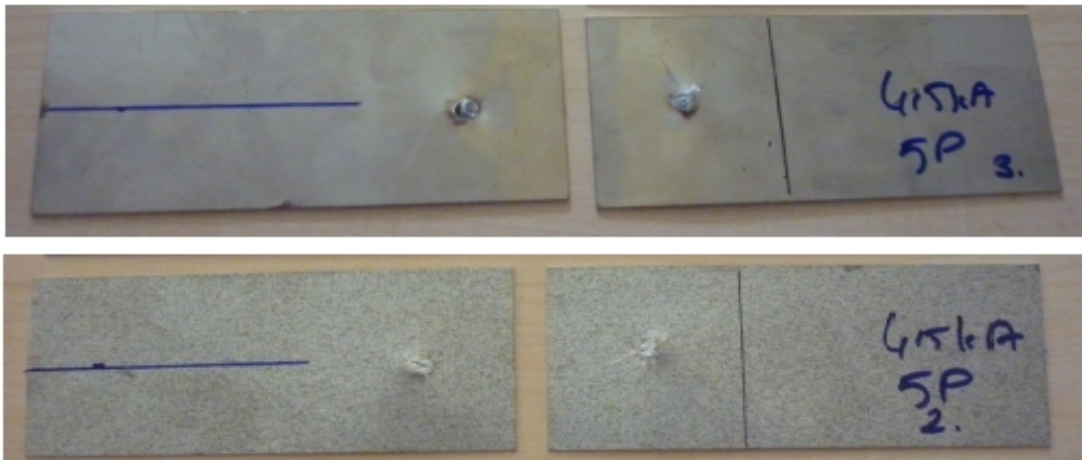
Şekil 5.11. 25 periyot kaynak süresinde çekme-makaslama dayanımlarına göre bağlantıların karşılaştırılması

Şekil 5.9-5.11'deki grafikler incelendiğinde elektrik direnç nokta kaynağında en yüksek çekme-makaslama dayanımına ostenitik-ostenitik çiftinin, en düşük çekme makaslama dayanımına ise ferritik-ferritik çiftinin kaynağında ulaşılmıştır. Bunun sebebi ise ostenitik paslanmaz çeliklerin, ferritlere nazaran daha yüksek çekme-makaslama dayanıma sahip olmasıdır. Ferritik-ostenitik çiftinin kaynağında elde edilen çekme-makaslama dayanımları ise ferritik-ferritik çiftine göre biraz artmış, ostenitik-ostenitik çiftine göre ise biraz azalmıştır.

5.2.4. Bağlantıların çekme-makaslama deneyi sonucu oluşan kopma tipleri

Çekme-makaslama deneyi yapılan numunelerdeki kopma türleri incelenerek, kriterlere uygun olup olmadığı ve kaynaklı bağlantılarda kaynak akımı ve kaynak zamanının kopma türüne etkisi incelenmiştir. Kopma görüntüleri incelendiğinde birleştirmelerin tümünde kopmanın ITAB'da ve genelde birleştirmenin ITAB bölgesindeki tane irileşmesinin olduğu yerden başlayarak meydana geldiği görülmektedir. Kaynaklı bağlantılarda düğme, ayrılma ve yırtılma türü olmak üzere üç tip kopma görülmüştür.

Ayrılma tipi kopma, Şekil 5.12'de görüldüğü üzere kaynak parametrelerinin yetersiz olduğu, düşük kaynak akımından dolayı oluşan düşük ısı girdisine bağlı olarak meydana gelen yetersiz kaynak çekirdeği çapı ve kaynak bölgesinin oluştuğu kopma tipidir ve çekme-makaslama dayanımı esas metal dayanımından daha düşüktür.



Şekil 5.12. Ayrılma tipi kopma görüntüleri

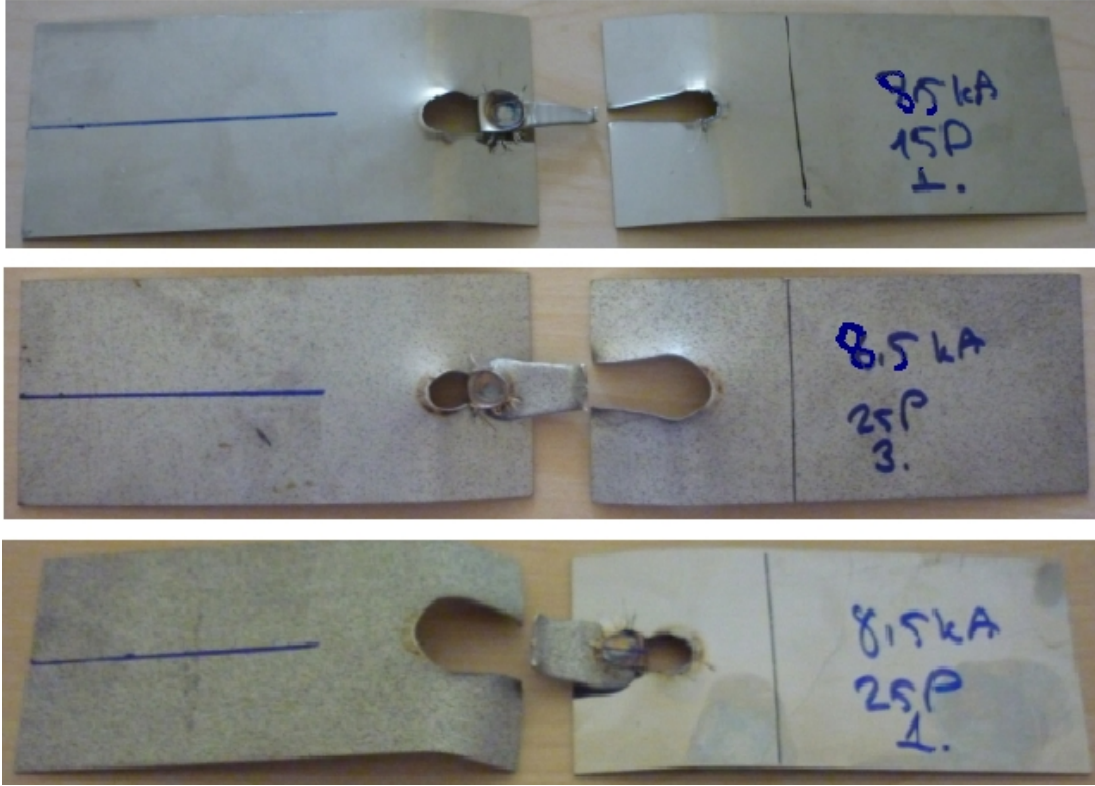
Düğme tipi kopma, Şekil 5.13’de görüldüğü gibi kaynak parametrelerinin uygun olduğunu gösteren, kaynak zamanı artışıyla ısı girdisinde artış meydana gelen, buna bağlı olarak, kaynak çekirdeği çapı ve kaynak bölgesinde artış görülen ve çekme-makaslama dayanımında da yükselmenin görüldüğü kopma türüdür. Kaynaklı bağlantılardan istenilen tür, kopma şeklidir.



Şekil 5.13. Düğme tipi kopma görüntüleri

Düğme kopma türünde, çekme-makaslama deney sonucunda, bağlantının kopma tipi kaynaklı bölgeden kopmadan, malzemedan yırtılmaya doğru gitmektedir. Bunun nedeni çekirdek bölgesinin çekme-makaslama değerinin esas malzemenin çekme-makaslama değerinden daha yüksek olmasıdır.

Yırtılma tipi kopma ise Şekil 5.14. görüldüğü üzere kaynak parametrelerinin aşırı olduğu, aşırı kaynak akımı artışından dolayı oluşan aşırı ısı girdisine bağlı olarak meydana gelen aşırı ergime ve fişkırmadan dolayı, çekme-makaslama dayanımında düşüş görülen kopma tipidir. Kaynaklı bağlantılarda istenilmeyen kopma türüdür.



Şekil 5.14. Yırtılma tipi kopma görüntüleri

5.3. Bağlantıların Kaynak Çekirdeği Çapı Ölçüm Sonuçları

Farklı kaynak parametrelerinde direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numuneler üzerinde çekirdek çapı ölçümü dijital kumpas kullanılarak enine ve boyuna olarak ölçülmüştür. Değişen kaynak parametrelerinin çekirdek çapına etkisi incelenmiştir.

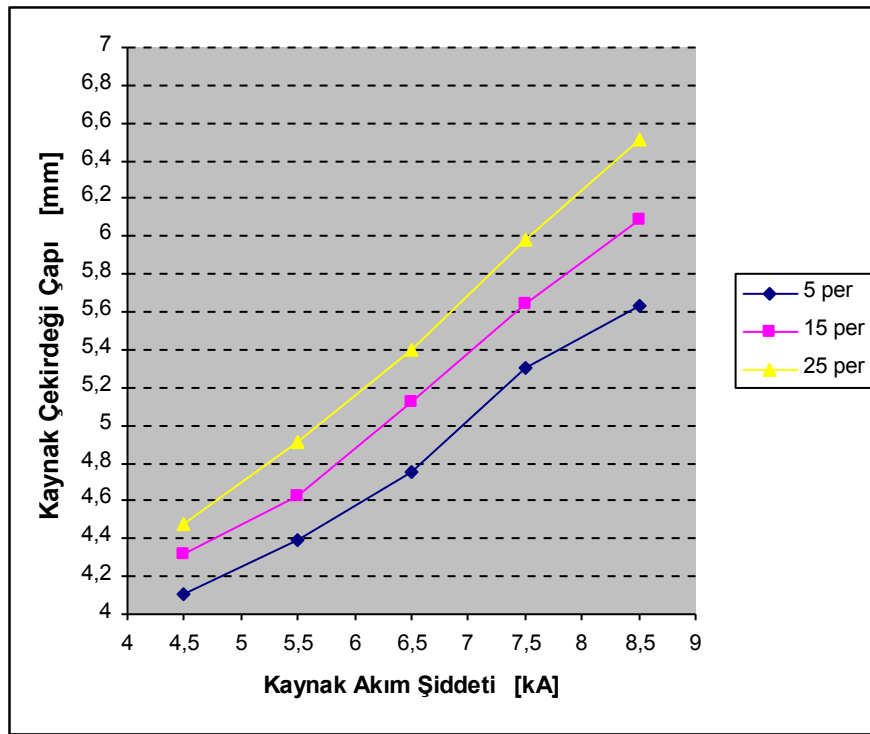
Literatürde [54], istenilen kaynak çekirdeği çapı; kaynak akımı ve kaynak zamanının uygun bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Zaman kısa tutulursa kaynak çekirdek çapı küçülür; aksine uzun tutulursa ergiyen hacim fazlaşır ve ergiyiğin dışarı çıkacağı bildirilmiştir. Dolayısıyla ergiyiğin dışarı çıkması sebebiyle uzun kaynak sürelerinde kaynak çekirdek çapının büyüdüğü görülmüştür.

Dijital kumpas yardımıyla enine ve boyuna olarak ölçülen çekirdek çaplarının ortalama değerleri alınarak bağlantıların kaynak çekirdeği çapları elde edilmiştir. Buna göre en büyük kaynak çekirdeği çapı; 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında ostenitik-ostenitik çiftine ait numunede 6.81 mm olarak

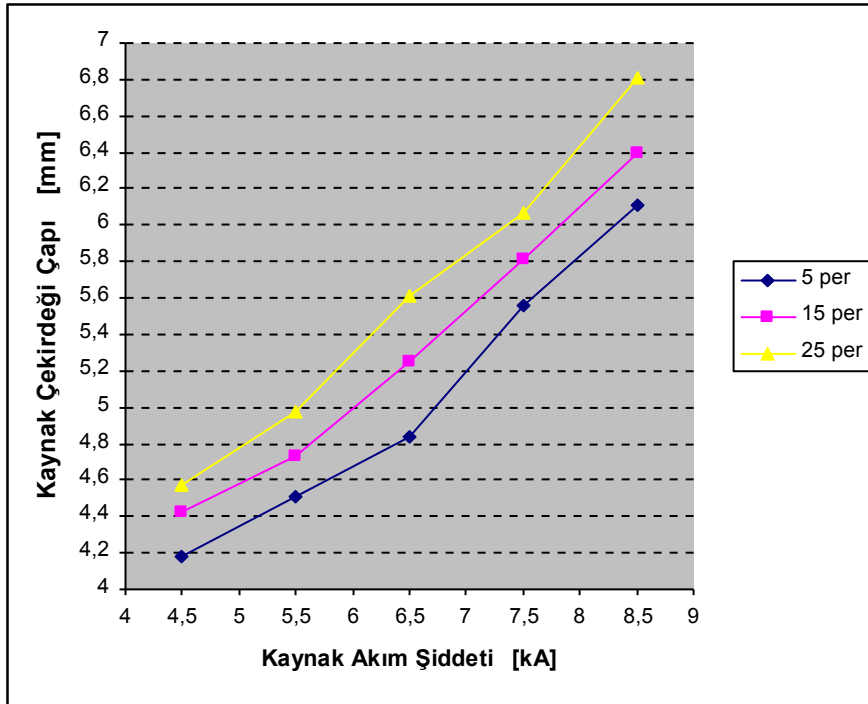
ölçülmüştür. En küçük kaynak çekirdeği çapı ise 4.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında ferritik-ferritik çiftine ait numunede 4.11 mm olarak ölçülmüştür. Bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak akımı ve kaynak zamanının etkisi aşağıda verilmiştir.

5.3.1. Bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi

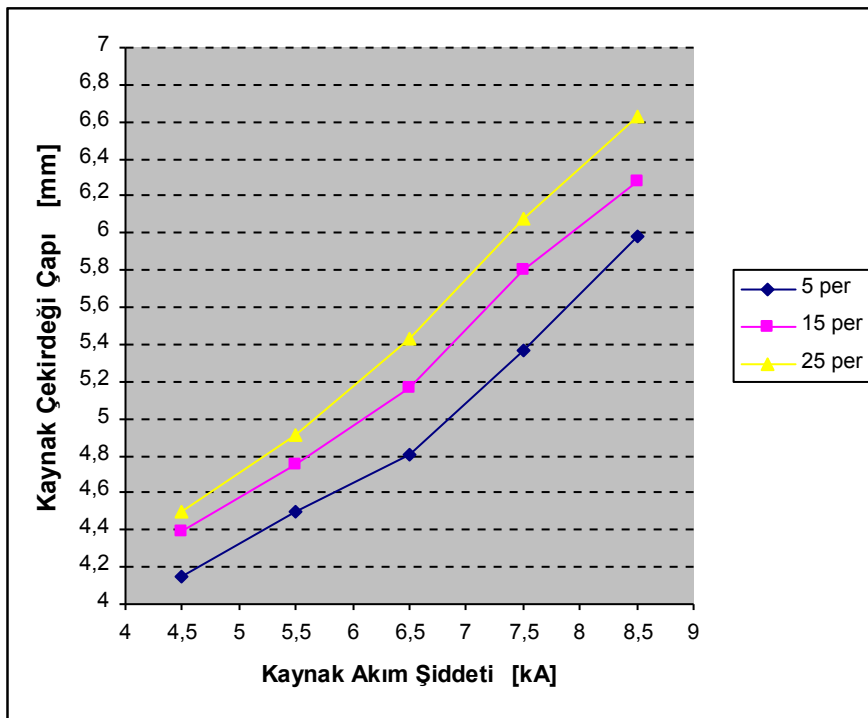
Kaynak akımı ve kaynak zamanının bağlantıların kaynak çekirdeği çapına etkisi Şekil 5.15-5.17'de grafik olarak gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde kaynak akımı ve kaynak zamanının artması ile ısı girdisi artmış ve dolayısıyla kaynak çekirdeği çapı da artmıştır.



Şekil 5.15. Ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi



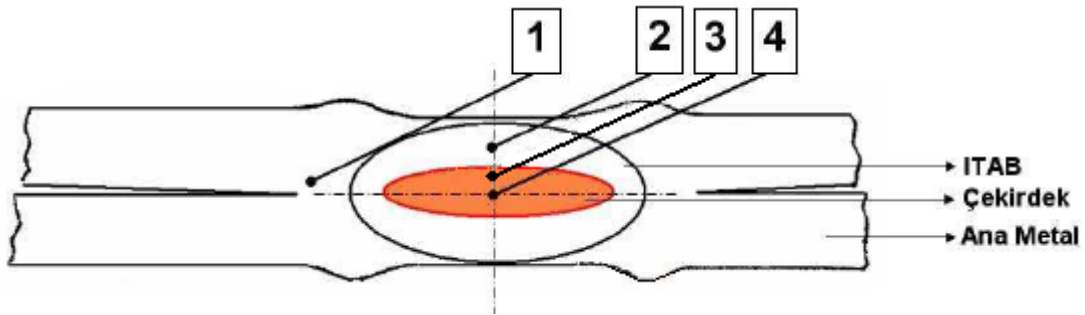
Şekil 5.16. Ostenitik-ostenitik (310+310) çiftine ait bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi



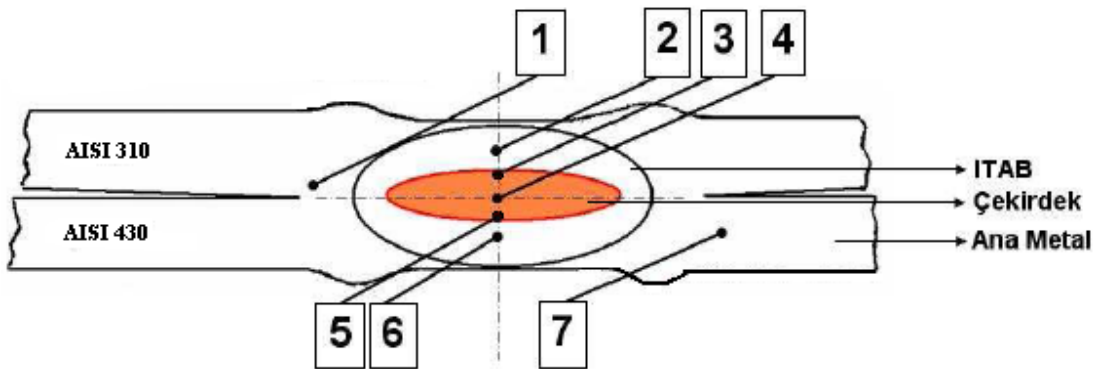
Şekil 5.17. Ferritik-ostenitik (430+310) çiftine ait bağlantıların kaynak çekirdeği çapına kaynak parametrelerinin etkisi

5.4. Bağlantıların Sertlik Değerleri

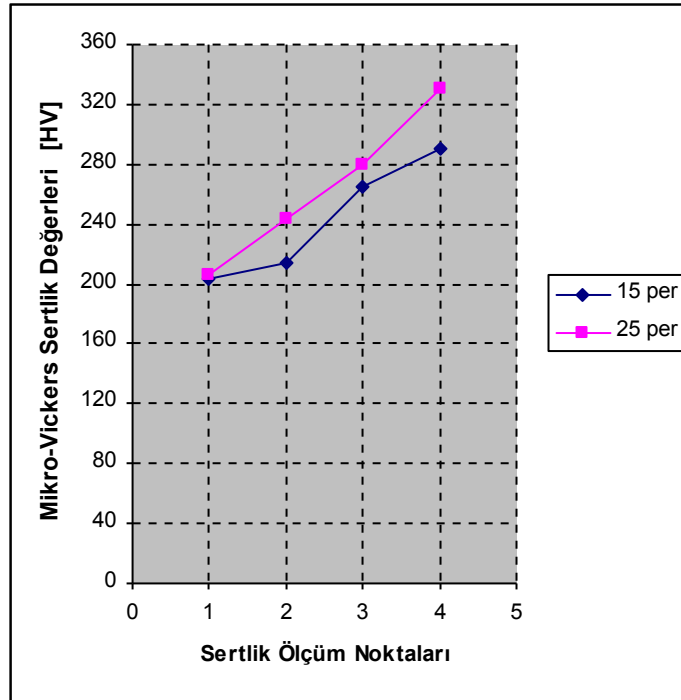
Elektrik direnç nokta kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik çiftine ait bağlantıların kaynak bölgesindeki (ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimini, belirlemek amacıyla kaynaklı bağlantılardan metalografik inceleme için seçilen toplam 24 adet numuneye sertlik testleri uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerdeki sertlik taramaları, aynı malzemelerin kaynağında (ferritik-ferritik ve ostenitik-ostenitik çifti) Şekil 5.18’de, farklı malzemelerin kaynağında ise Şekil 5.19’da şematize edildiği biçimde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.18 ve 5.19’da gösterildiği gibi enine doğrultuda sertlik taraması yapılan numunelerin sertlik değerleri Şekil 5.20-5.28’de grafikler üzerinde gösterilmiştir.



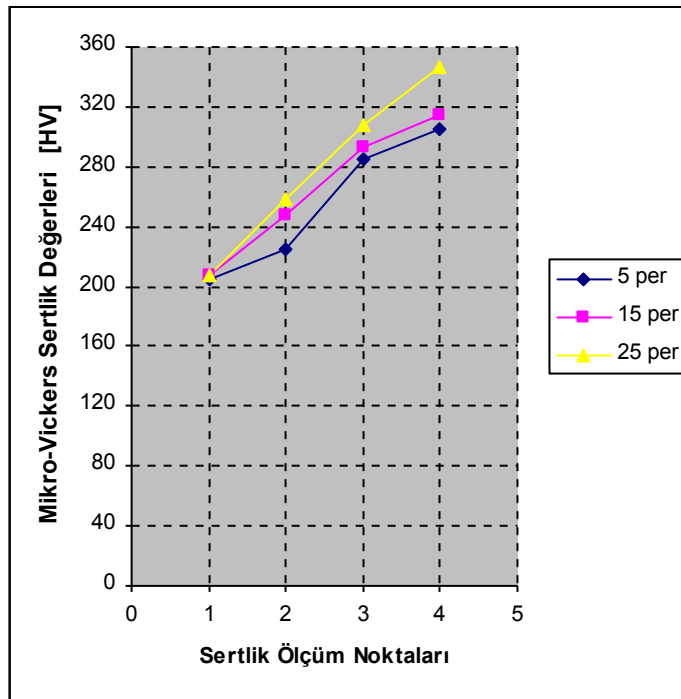
Şekil 5.18. Ferritik-ferritik ve ostenitik-ostenitik çiftine ait bağlantılarda enine doğrultuda yapılan mikrosertlik ölçüm noktaları



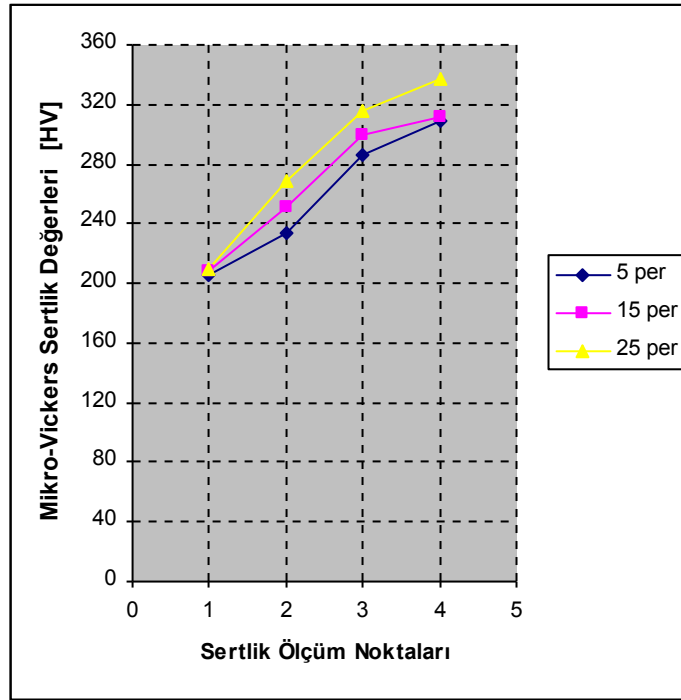
Şekil 5.19. Ferritik-ostenitik çiftine ait bağlantılarda enine doğrultuda yapılan mikrosertlik ölçüm noktaları



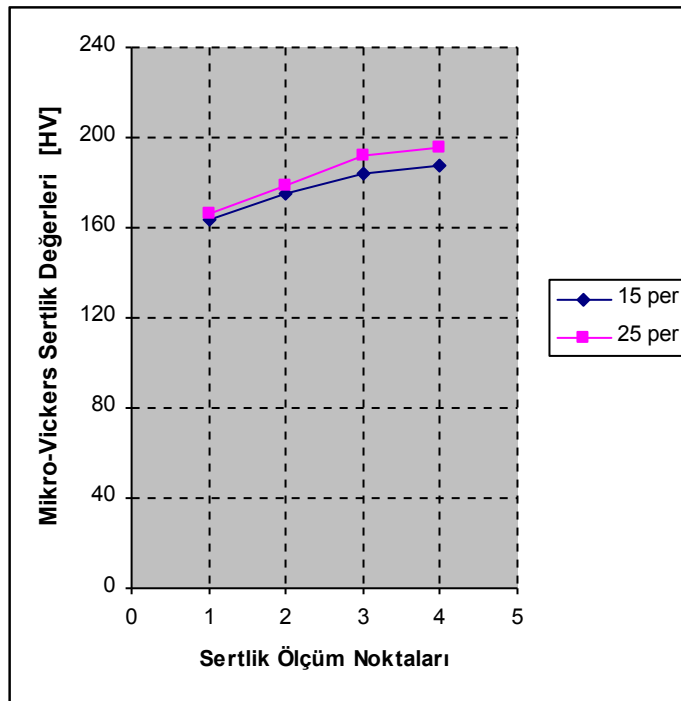
Şekil 5.20. 6.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunelerin sertlik değerleri



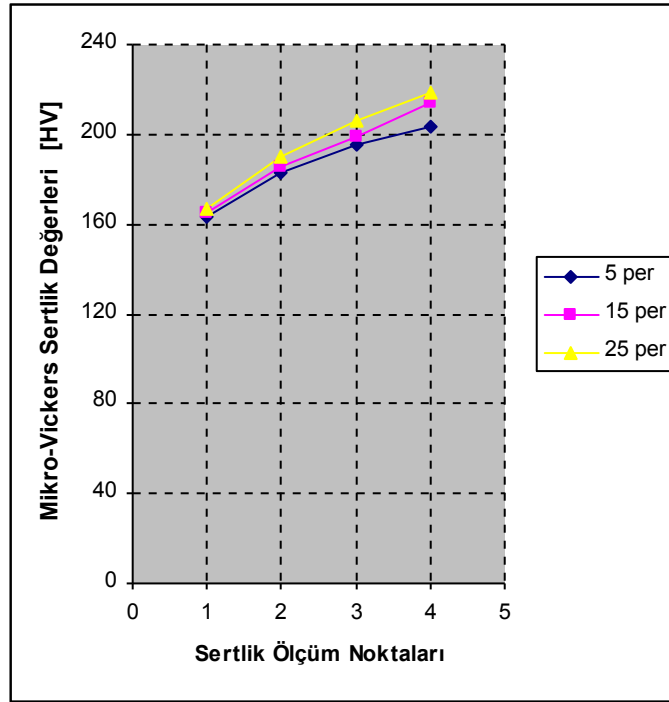
Şekil 5.21. 7.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunelerin sertlik değerleri



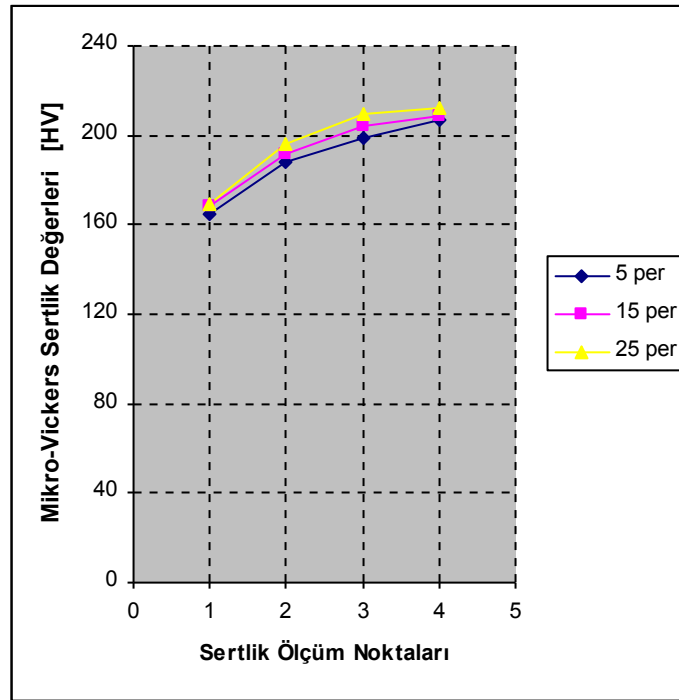
Şekil 5.22. 8.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunelerin sertlik değerleri



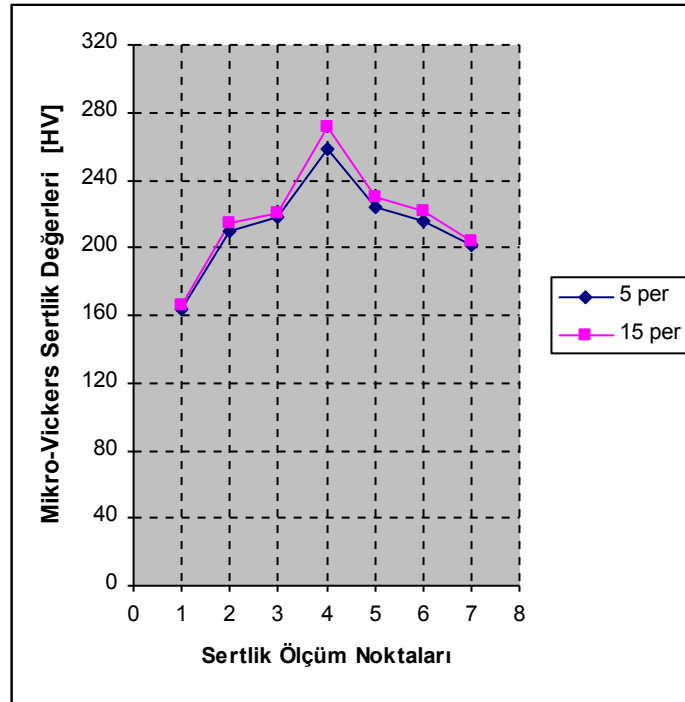
Şekil 5.23. 6.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunelerin sertlik değerleri



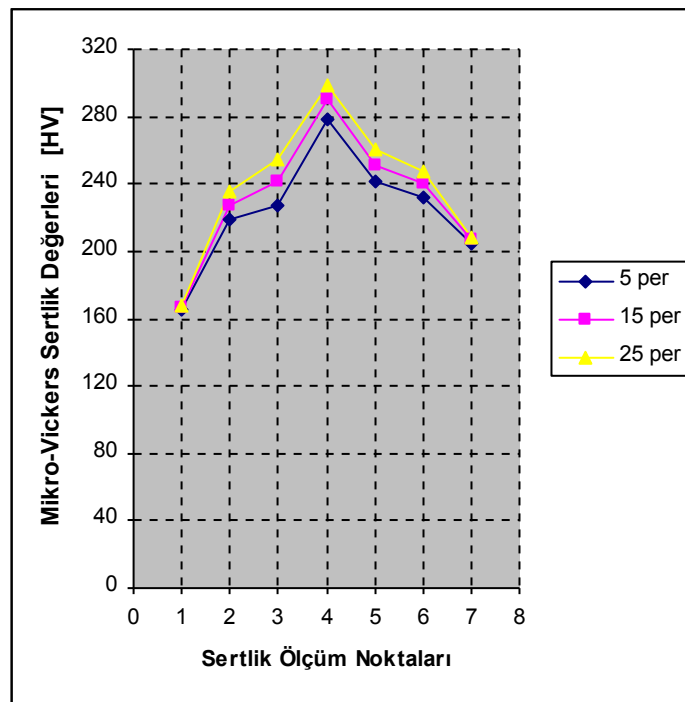
Şekil 5.24. 7.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunelerin sertlik değerleri



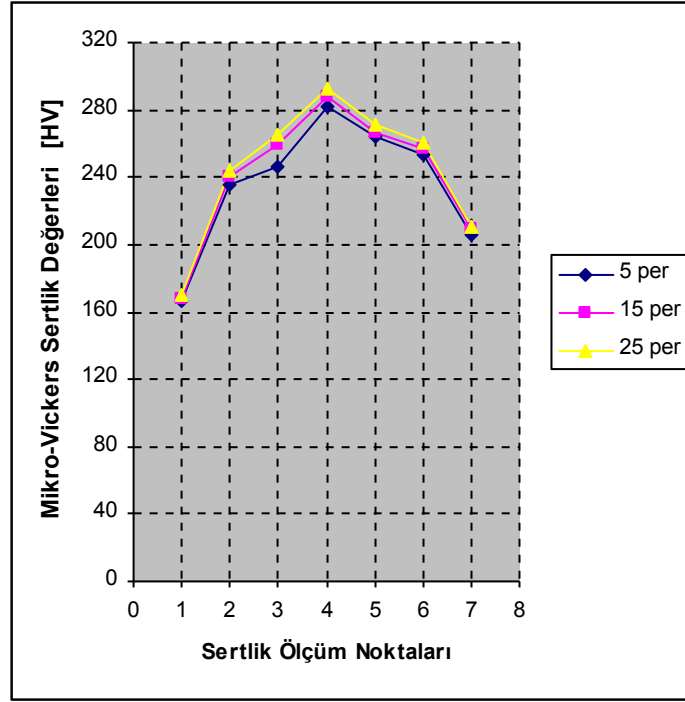
Şekil 5.25. 8.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunelerin sertlik değerleri



Şekil 5.26. 6.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunelerin sertlik değerleri



Şekil 5.27. 7.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunelerin sertlik değerleri



Şekil 5.28. 8.5 kA kaynak akım şiddetinde birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunelerin sertlik değerleri

Grafikler genel olarak incelendiğinde; kaynak çekirdeğinden esas metale doğru sertlikte bir düşüş olduğu görülmektedir. Burada en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinden ölçülürken, onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Ayrıca farklı kaynak parametreleri (kaynak akımı ve kaynak zamanı) ile birleştirilen numunelerden elde edilen en düşük ve en yüksek sertlik değerleri ana malzeme, ITAB ve çekirdek bölgesi olmak üzere Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Bağlantıların en düşük ve en yüksek sertlik değerlerine göre karşılaştırılması

Kaynak Çifti	Sertlik Değerleri [HV]					
	Ana Malzeme		ITAB		Kaynak Çekirdeği	
	En Düşük	En Yüksek	En Düşük	En Yüksek	En Düşük	En Yüksek
Ferritik-ferritik (430+430)	204	209	214	269	291	347
Ostenitik-ostenitik (310+310)	164	169	175	196	188	219
Ferritik-ostenitik (430+310)	202 / 163	210 / 170	216 / 210	260 / 244	258	298

Kaynak parametrelerinden kaynak akımı ve kaynak zamanının, kaynaklı bağlantıların sertlik değişimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; gerek artan kaynak akımı ve gerekse kaynak zamanının artmasıyla, kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin çok belirgin olmamakla beraber artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgelerinden ölçülen sertlik değerlerinin esas metalden daha yüksek olduğu, ayrıca kaynak parametre değerlerinin artmasıyla da, sertlik değerlerinde bir miktar artış olduğu tespit edilmiştir. Buradan, kaynak esnasında kaynak bölgesine verilen ısının sertlik artışında etkili olduğu sonucu çıkarılabilir. Kaynak işlemi esnasında kaynak akımı ve kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısı miktarı artmaktadır. Yüksek ısı girdisiyle birlikte kaynak bölgesinde ısı daha uzun süre kalmakta, bu da sertliğin azda olsa yükselmesine neden olmaktadır. Ayrıca artan kaynak zamanıyla ITAB'daki sertlik değerlerindeki artış, ısı girdisindeki artışla birlikte ITAB'da tane irileşmesiyle açıklanabilir.

Kaynaklı birleştirmelerin tümünde, kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile ısı girdisi artmış ve kaynak çekirdeği genişlemiştir. Bu nedenle kaynak çekirdeğinin sertlik değerinin, tutma zamanı boyunca elektrot baskı kuvvetinin sebep olduğu deformasyon sertleşmesinden dolayı esas metal ve ITAB'dan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

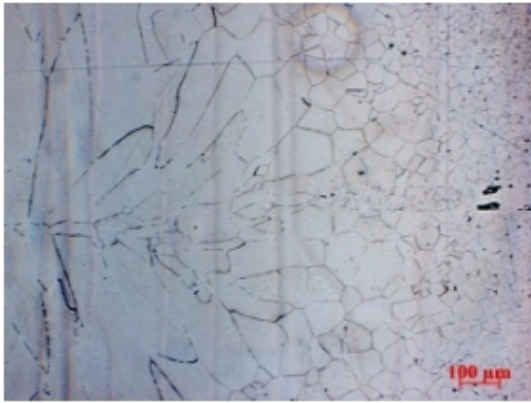
Martin et al. [64], 304 östenitik paslanmaz çelik sacları direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve benzer sonuçları rapor etmişlerdir.

Vural ve Akkuş [61], galvanizli çelik ile östenitik paslanmaz çelik sacları direnç nokta kaynağı ile birleştirmişler ve mikrosertlik ölçümleri sonucunda en büyük sertlik değerinin kaynak çekirdeğinin ortasında 350 HV olarak ölçüldüğünü rapor etmişlerdir.

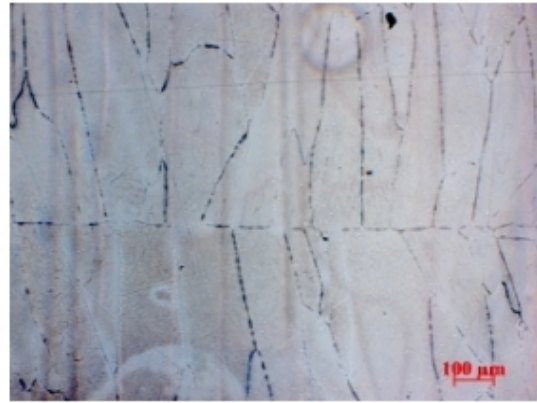
Bak [65], IF çeliklerini direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirmiş ve tüm kaynaklı numunelerde kaynak bölgesinin mikrosertlik değerlerinin ITAB ve ana malzemenin sertlik değerlerinden fark edilir oranda yüksek olduğunu bildirmiştir.

5.5. Bağlantıların Mikroyapılarının Optik Mikroskopla İncelenmesi

Farklı kaynak parametrelerinde direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik çiftine ait bağlantılardan mikroyapı incelemeleri için hazırlanan toplam 24 adet numunenin kaynak kesitlerine optik mikroskop kullanılarak x100 büyütme yapılmış ve ITAB ile kaynak çekirdeği bölgesinde oluşan mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Ferritik-ferritik çiftine ait numuneler %3'lük Nital, ostenitik-ostenitik çiftine ait numuneler ise özel olarak hazırlatılan Kalling ayırıcı (5 gr CuCl_2 , 100 ml HCl, 100 ml etil alkol, 100 ml saf su) ile dağlanmış. Çekilen mikroyapı görüntüleri Şekil 5.29-5.44'de verilmiştir.

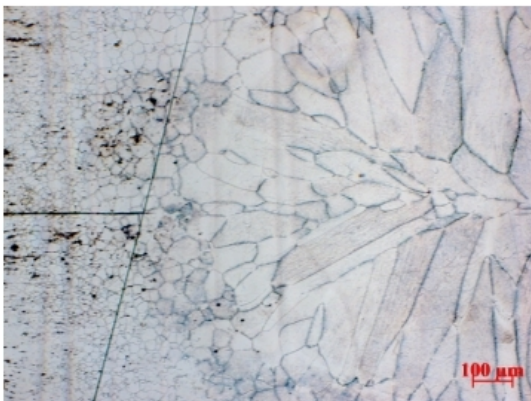


(a) ITAB bölgesi

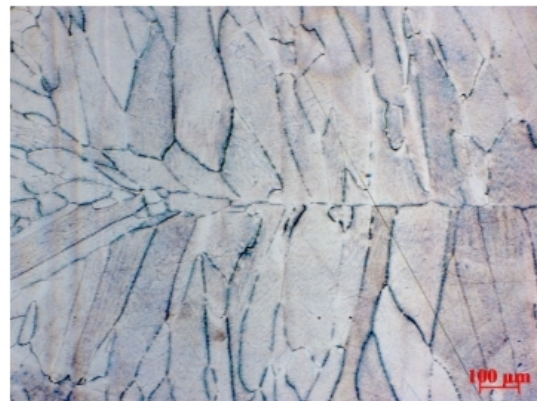


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.29. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik (430+430) çiftine ait numunenin mikroyapı görüntüsü



(a) ITAB bölgesi

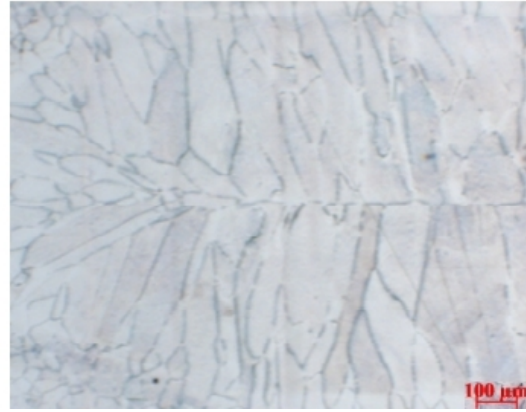


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.30. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

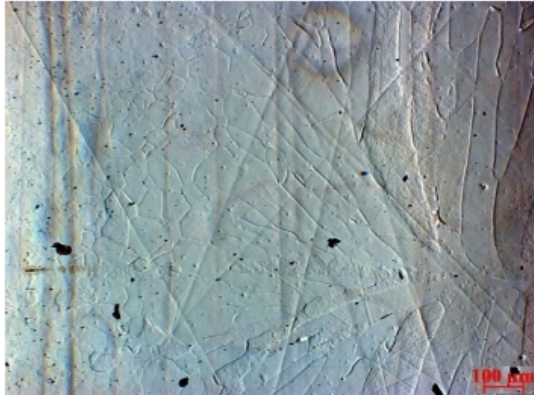


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.31. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

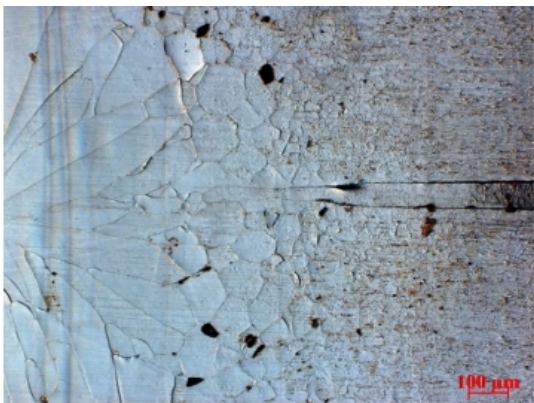


(a) ITAB bölgesi

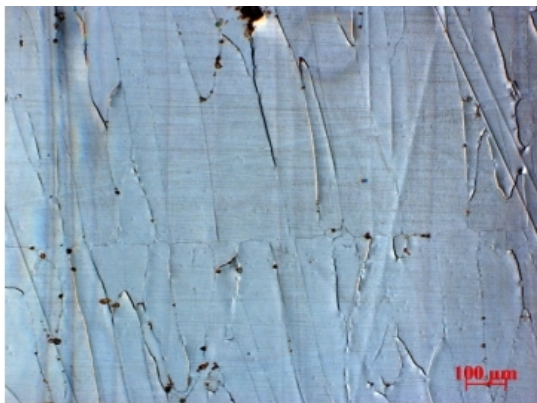


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.32. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

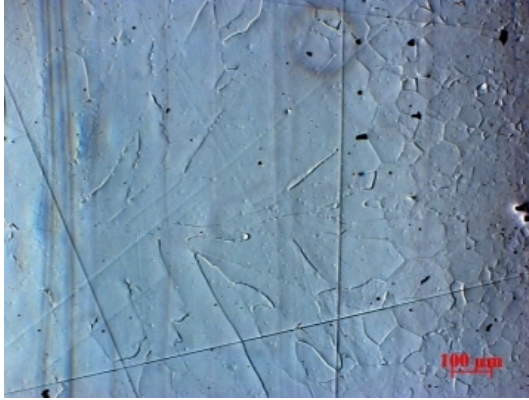


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.33. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

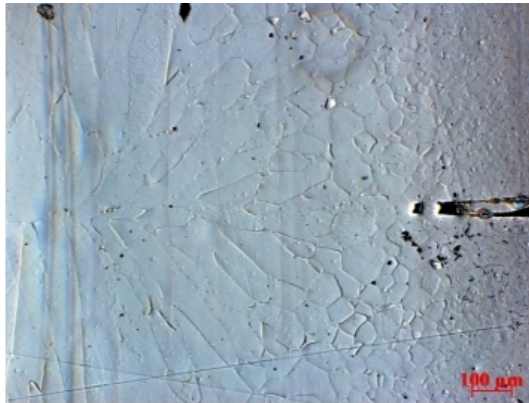


(a) ITAB bölgesi

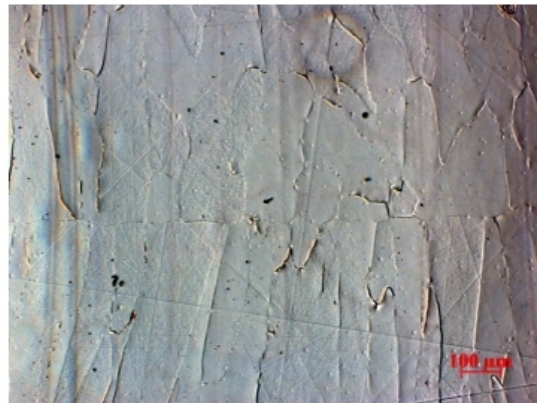


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.34. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü



(a) ITAB bölgesi

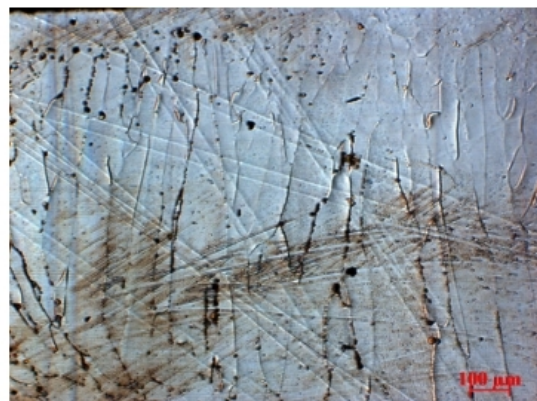


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.35. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

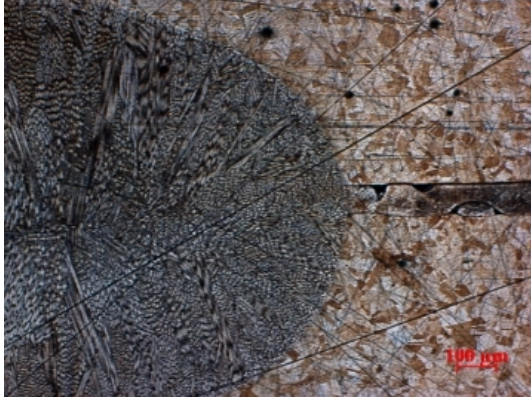


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.36. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ferritik çiftine (430+430) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

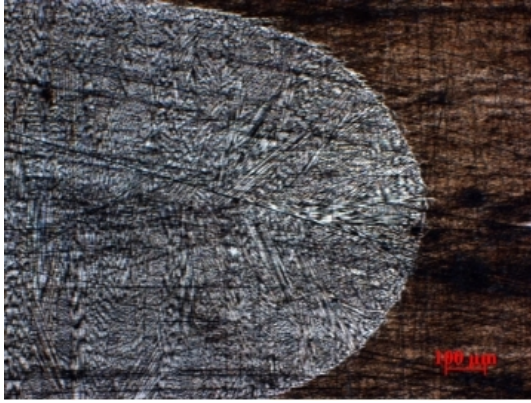


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.37. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

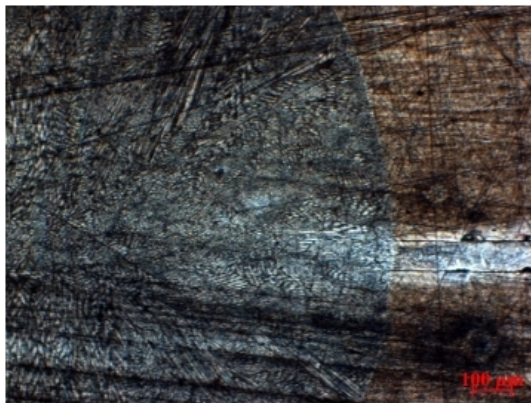


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.38. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü



(a) ITAB bölgesi

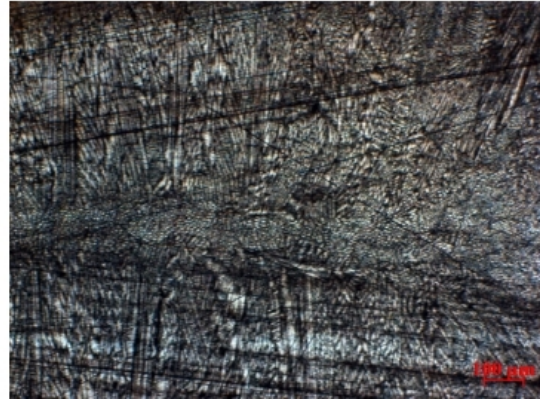


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.39. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

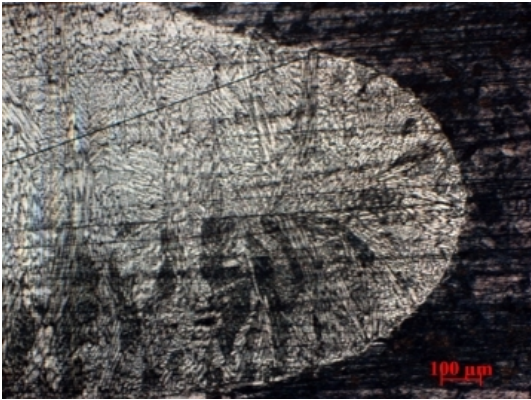


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.40. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

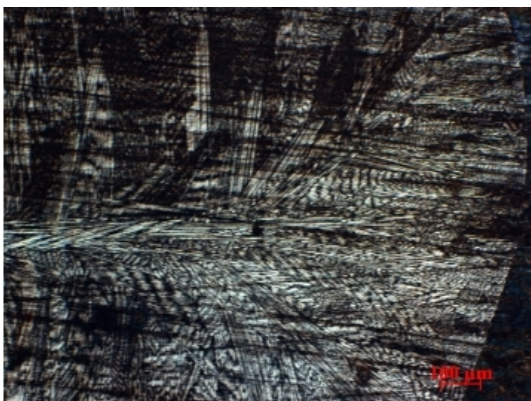


(a) ITAB bölgesi

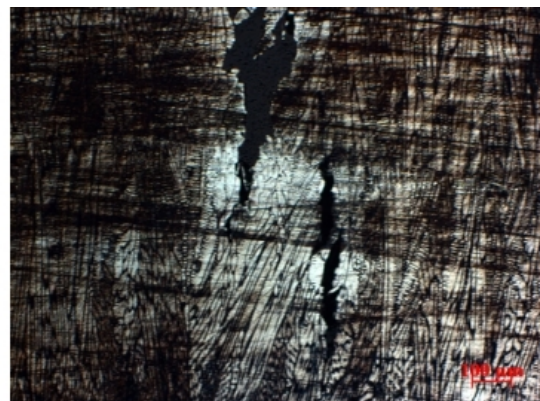


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.41. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü



(a) ITAB bölgesi

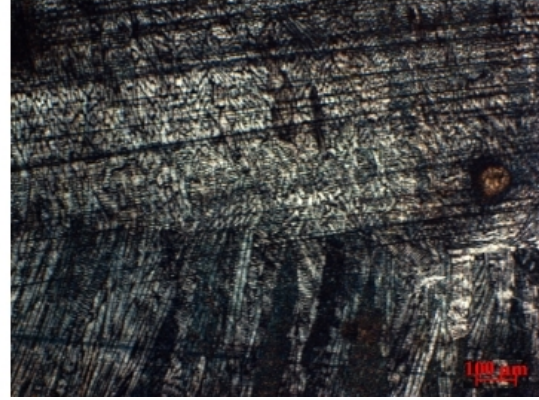


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.42. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

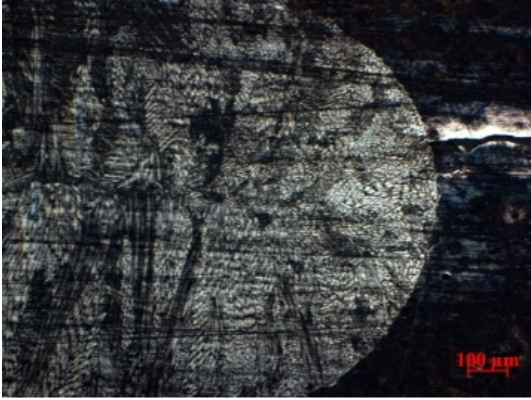


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.43. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü



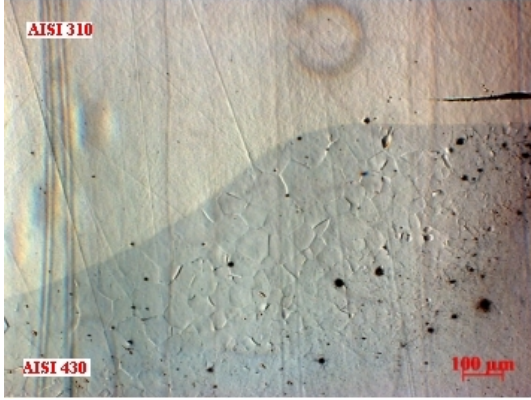
(a) ITAB bölgesi



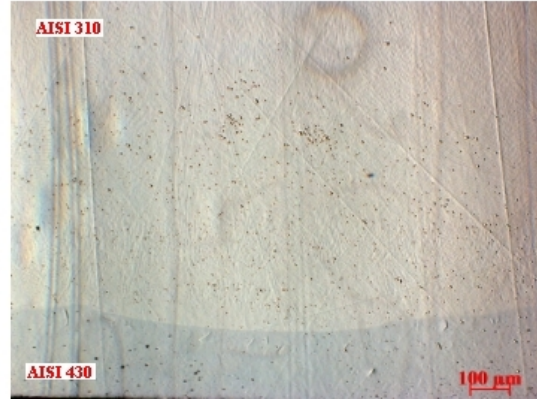
(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.44. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ostenitik-ostenitik çiftine (310+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü

Ferritik-ostenitik çiftine ait numunelerde her iki yapıyı aynı anda dağlayabilen bir çözelti bulunamadığından, önce tüm numunelerin %3'lük Nital çözeltisi ile ferritik kısımları dağlanarak mikroyapı görüntüleri çekilmiş sonra numunelerin yüzeyleri tekrardan zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutularak Kalling ayırıcı ile ostenitik kısımları dağlanarak mikroyapı görüntüleri çekilmiştir. Kalling ayırıcı ile dağlanan numunelerde ferritik kısımları hemen oksidasyona uğrayarak tamamen karardığı görülmektedir. Bu durum Ni ve Mn içeren ostenitik paslanmaz çeliklerin korozif çözeltilere ve dolayısıyla oksidasyona ne kadar dayanıklı olduğunun bir göstergesidir. Çekilen mikroyapı görüntülerinden %3'lük Nital ile dağlananlar Şekil 5.45-5.52'de (şekil açıklamasında Nital yazılarak) verilmiştir.

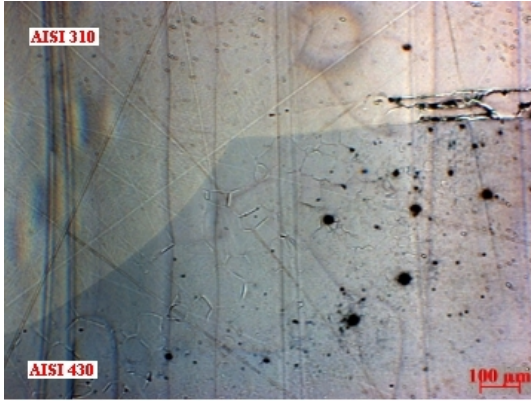


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.45. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

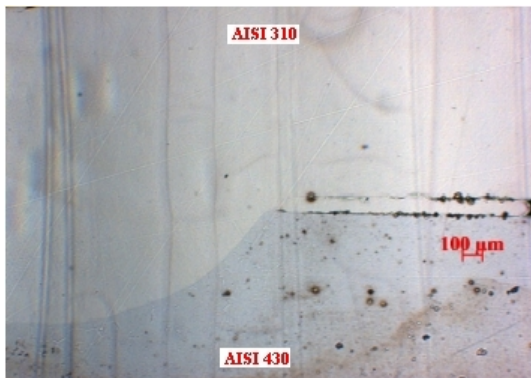


(a) ITAB bölgesi

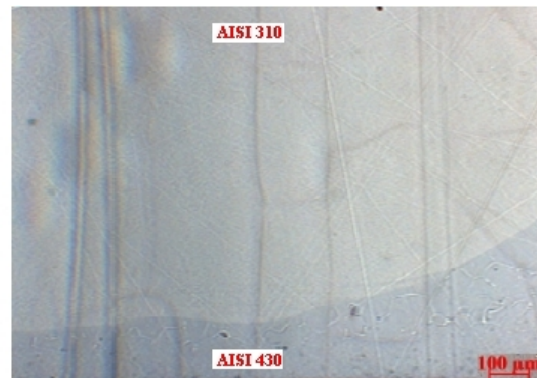


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.46. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

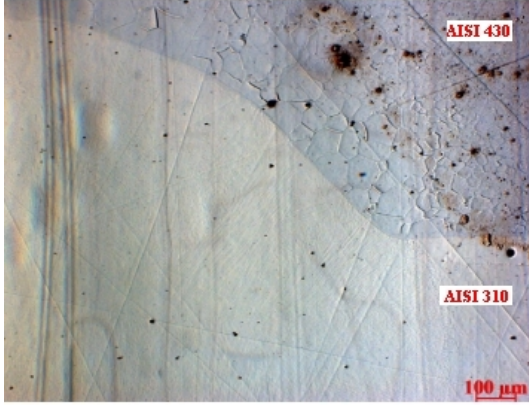


(a) ITAB bölgesi

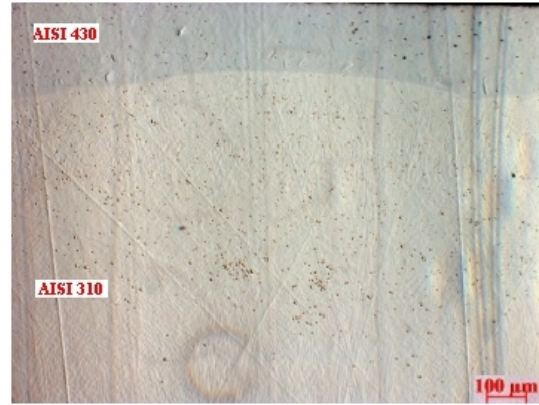


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.47. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

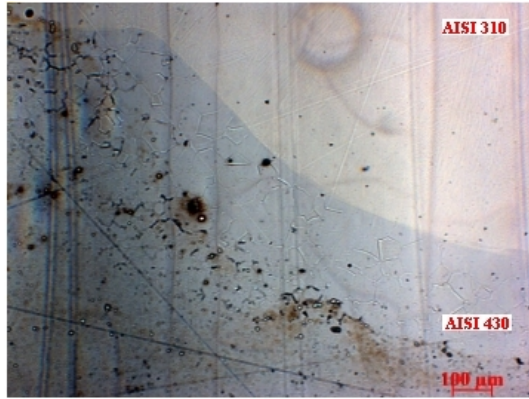


(a) ITAB bölgesi

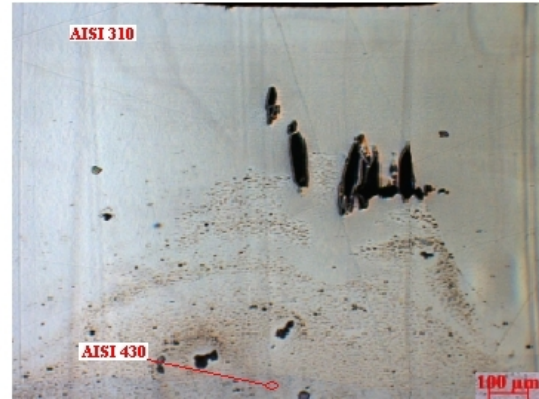


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.48. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

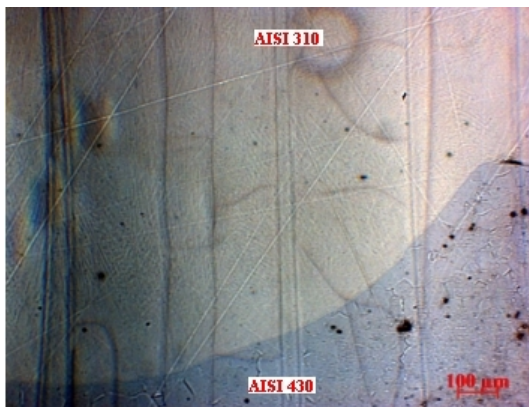


(a) ITAB bölgesi

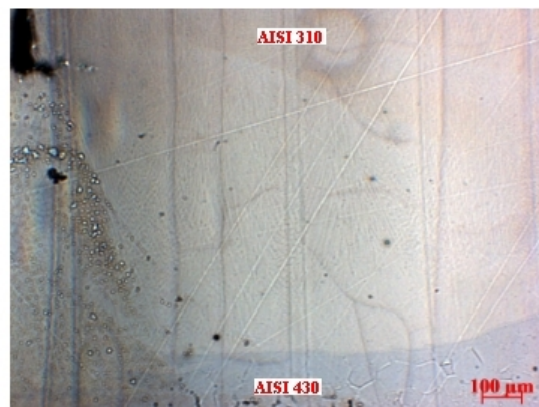


(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.49. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

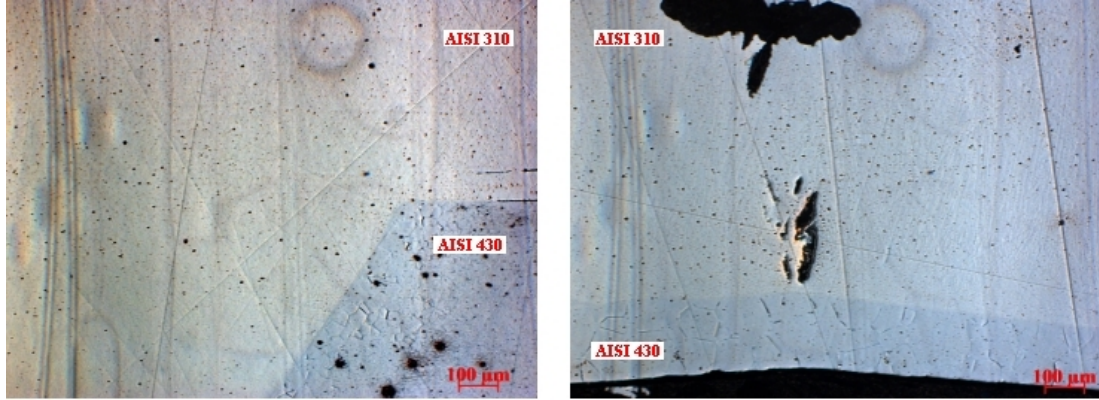


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

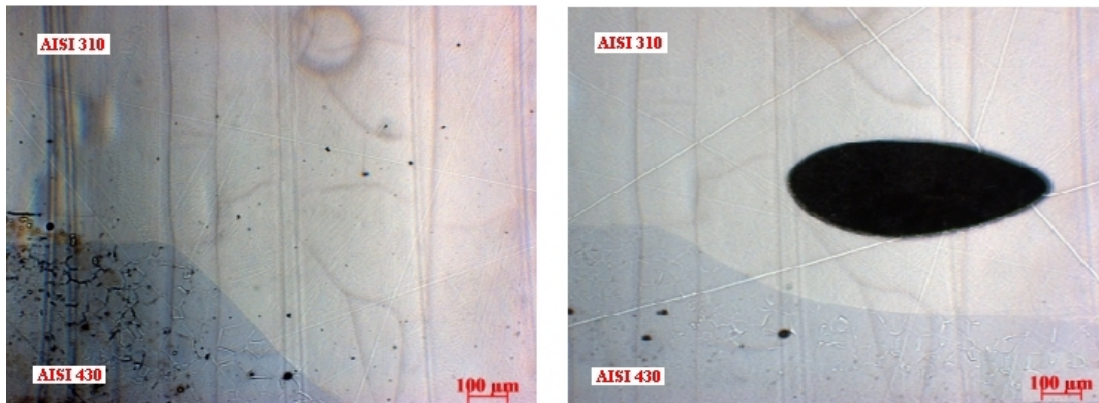
Şekil 5.50. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)



(a) ITAB bölgesi

(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.51. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

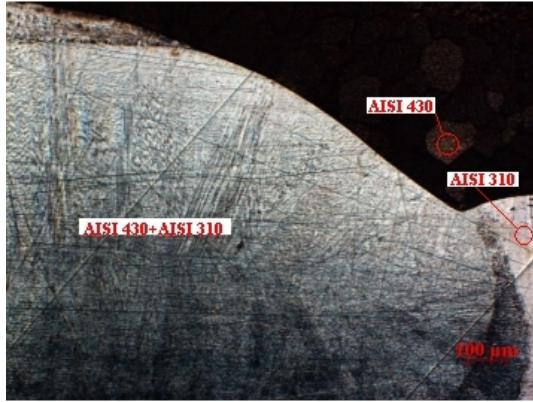


(a) ITAB bölgesi

(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.52. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Nital)

Ferritik-ostenitik çiftine ait numuneler %3'lük Nital çözeltisi ile dağlanıp mikroyapı görüntüleri çekildikten sonra daha öncede belirtildiği gibi tekrardan zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutularak Kalling ayırıcı ile ostenitik-ostenitik çiftine nazaran daha kısa süreli dağlanarak mikroyapı görüntüleri çekilmiştir. Dağlama işlemi kısa süreli olmasına rağmen çekilen mikroyapı görüntülerinde ferritik kısım tamamen oksidasyona uğrayarak kararmış, ostenitik kısım ise nispeten biraz dağlanmış ve tane sınırları ortaya çıkmış, kaynak çekirdeğinin ise tamamen ortaya çıktığı görülmüştür. Çekilen mikroyapı görüntüleri Şekil 5.53-5.60'da (şekil açıklamasında Kalling yazılarak) verilmiştir.

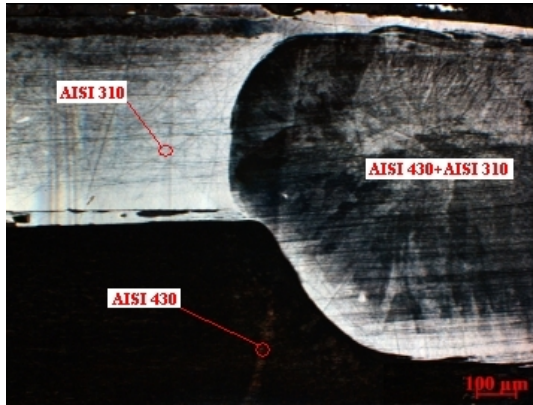


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.53. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)

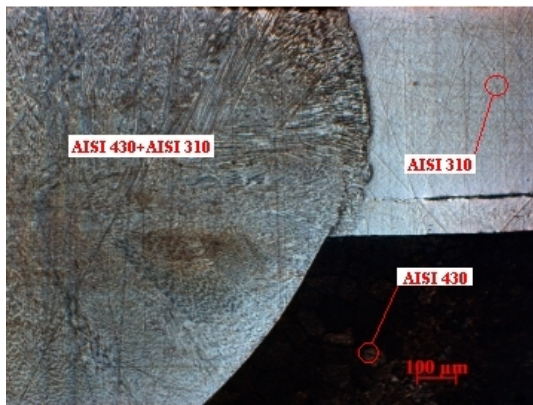


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.54. 6.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)

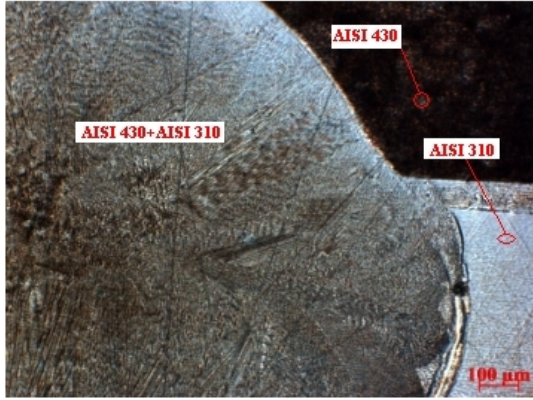


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.55. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)



(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.56. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)

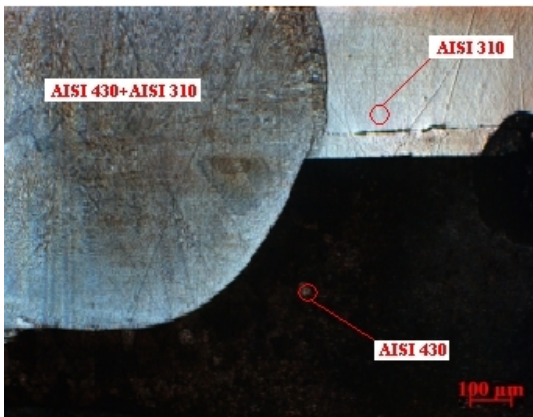


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.57. 7.5 kA kaynak akım şiddeti ve 25 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)

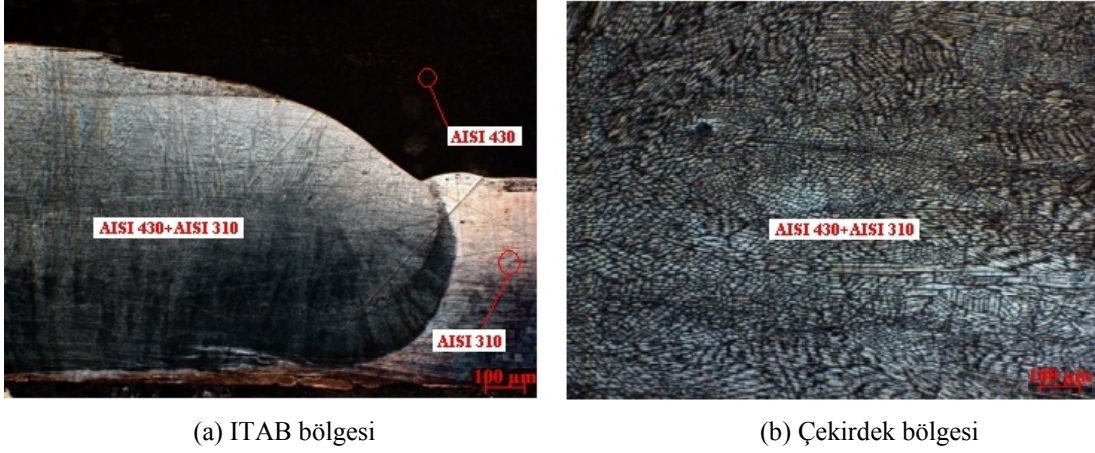


(a) ITAB bölgesi



(b) Çekirdek bölgesi

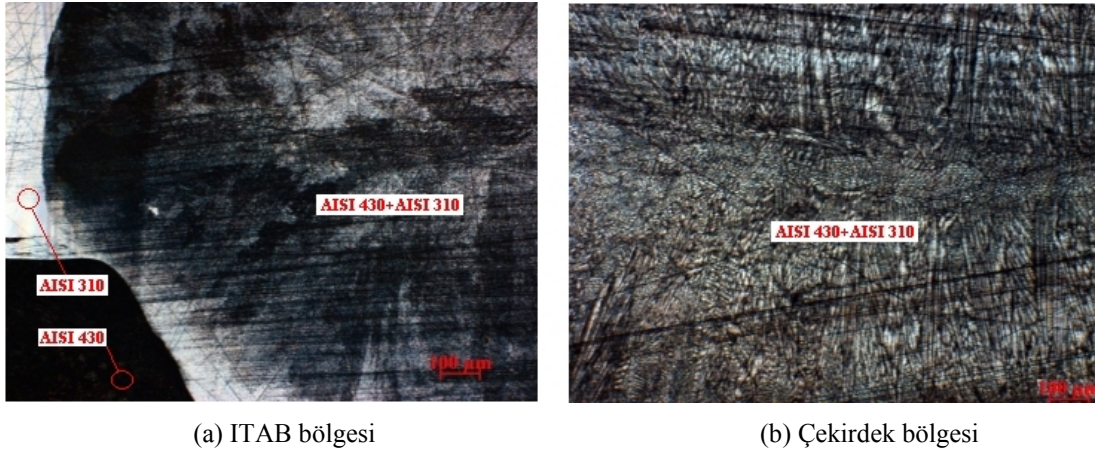
Şekil 5.58. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 5 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)



(a) ITAB bölgesi

(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.59. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)



(a) ITAB bölgesi

(b) Çekirdek bölgesi

Şekil 5.60. 8.5 kA kaynak akım şiddeti ve 15 periyot kaynak zamanında elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ferritik-ostenitik çiftine (430+310) ait numunenin mikroyapı görüntüsü (Kalling)

Çekilen tüm mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ferritik-ferritik çiftinde daha belirgin olmak üzere tüm kaynak çiftlerinde kaynak çekirdeğinin mikroyapısı esas malzemeninkinden oldukça farklıdır. Kaynak çekirdeğine bakıldığında taneler ısı merkezine doğru yönlendirilmiştir. Ayrıca yapılan kaynak ile arayüzeyde yeni taneler oluşmuş ve bu tanelerin kaynak süresince uygulanan ısı girdisine bağlı olarak, orijinal tanelerden daha büyük olduğu ve ısı akış yönüne paralel yönlendirilerek oluştuğu görülmüştür. Ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin ısı iletimi düşük olduğundan kaynak esnasındaki ısı, kaynak bölgesinde daha uzun süre kalmakta ve bu da tanelerin daha fazla irileşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca çekirdek bölgesinde

kaynak süresince uygulanan basınçtan (elektrot kuvveti) dolayı yer yer ikizlenmelerin olduğu görülmüştür.

Tüm mikroyapı görüntülerine bakıldığında genel itibari ile artan kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanı ile tanelerin irileştiği görülmüştür. Artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile tanelerin irileşmesinin sebebi artan ısı girdisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca artan ısı girdisi artışına bağlı olarak kaynak çekirdeğinin genişlediği görülmüştür. Kaynak işleminde kullanılan ısı girdisi, gerek kaynak çekirdeği gerekse ITAB'da oluşan mikroyapılar üzerinde direkt etkilidir.

Hayat [55], Almus [54], Kocabekir [15], Hayat et al. [63], kaynak zamanı artışına bağlı olarak, Vural ve Akkuş [61], Hasanbaşoglu [17], kaynak akımı artışıyla ısı girdisinde artış tespit etmişler ve artan ısı girdisinin etkisiyle, birleştirmelerde tane büyümesi olduğunu bildirmişlerdir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde özellikle otomotiv, kimya ve gıda endüstrisinde sık kullanılan AISI 430 tipi temel ferritik kalite ile yüksek sıcaklık malzemesi olarak bilinen AISI 310 kalite ostenitik paslanmaz çelik sacların gerek kendi aralarında gerekse birbirleriyle olan elektrik direnç nokta kaynaklı bağlantılarında kaynak parametrelerinin bağlantıların mekanik özelliklerine etkisi önemlidir. Bu amaçla yapılan bu deneysel çalışmada, 1 mm kalınlıkta, 45x105 mm boyutlarındaki AISI 430 ferritik ve AISI 310 kalite ostenitik paslanmaz çelik saclar direnç nokta kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak önce kendi aralarında daha sonra birbirleri ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri; 6 kN elektrot kuvveti, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA kaynak akımı ve 5, 15 ve 25 periyot kaynak zamanı olmak üzere 15 farklı parametrede gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerine etkilerini tespit etmek amacıyla birtakım deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Farklı parametreler kullanılarak elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerin tümünde birleşme gerçekleşmiştir.
2. Çekme-makaslama diyagramları incelendiğinde artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile belirli bir kritik akım değeri ve kaynak zamanına kadar çekme-makaslanma dayanımlarının arttığı görülmüştür. Ferritik-ferritik çiftine ait bağlantılarda en yüksek çekme-makaslanma dayanımına 7.5 kA kaynak akımı ve 15 periyot kaynak zamanında, ostenitik-ostenitik ve ferritik-ostenitik çiftine ait bağlantılarda ise en yüksek çekme makaslama dayanımına 7.5 kA kaynak akımı ve 25 periyot kaynak zamanında ulaşılmıştır. Bu kritik akım ve kaynak zamanı değerleri aşıldığında çekme-makaslanma dayanımlarında düşüş olduğu görülmüştür. Maksimum çekme-makaslanma dayanımı istenen bağlantılarda, yukarıda bahsedilen değerlerde kaynak yapılmalıdır.

3. Çekme-makaslama dayanımlarında kritik akım ve kaynak zamanı değerlerinden sonra düşüş görülmesinin nedeni, artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile ısı girdisinin yükselmesi ve elektrot kuvvetinin etkisiyle malzemeye elektrotun dalması dolayısıyla malzeme yüzeyinden fişkırmaların fazla olması olarak düşünülmektedir. Çekme-makaslama dayanımlarına göre kaynak çiftleri karşılaştırıldığında en yüksek çekme makaslama dayanımı değerinin 7.5 kA kaynak akımı ve 25 periyot kaynak zamanında ostenitik-ostenitik çiftinde, en düşük çekme-makaslama dayanımı değerinin ise 4.5 kA kaynak akım ve 5 periyot kaynak zamanında ferritik-ferritik çiftinde olduğu görülmüştür. Ferritik-ostenitik çiftine ait bağlantıların çekme-makaslama dayanımları ise yalnız ferritik ve yalnız ostenitik çiftine ait bağlantıların çekme-makaslama dayanımlarına göre orta seviyelerde yer almaktadır.
4. Çekme-makaslama testi sonrası oluşan kopma görüntüleri incelendiğinde birleştirmelerin tümünde kopmanın ITAB'da ve genelde birleştirmenin ITAB bölgesindeki tane irileşmesinin olduğu yerden başlayarak meydana geldiği görülmektedir. Kaynak parametrelerinin yetersiz olduğu bağlantılarda ayrılma tipi, uygun olduğu bağlantılarda düğme tipi ve aşırı olduğu bağlantılarda ise yırtılma tipi kopma görülmüştür. Ancak düğme kopma türünde bağlantının kopma tipi kaynaklı bölgeden kopmadan, malzemedan yırtılmaya doğru gitmektedir. Bunun nedeni ise çekirdek bölgesinin çekme makaslama değerinin esas malzemeninkinden daha yüksek olmasıdır.
5. Artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile ısı girdisi artmış ve buna bağlı olarak da kaynak çekirdeği çapının arttığı tespit edilmiştir.
6. Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir. Kaynak çekirdeği, ITAB ve ana malzeme şeklinde sıralanmak üzere; en yüksek sertlik değerleri 347-269-209 HV ile ferritik-ferritik çiftinde, en düşük sertlik değerleri ise 188-175-164 HV ile ostenitik-ostenitik çiftinde ölçülmüştür.

7. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, yapılan kaynak ile arayüzeyde yeni taneler oluşmuş ve bu tanelerin kaynak süresince uygulanan ısı girdisine bağlı olarak, orijinal tanelerden daha büyük olduğu ve ısı akış yönüne paralel yönlendirilerek oluştuğu görülmüştür. Ayrıca çekirdek bölgesinde kaynak süresince uygulanan basınçtan (elektrot kuvveti) dolayı yer yer ikizlenmelerin olduğu görülmüştür. Genel olarak artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile tanelerin irileştiği görülmüş olup, kaynak işleminde kullanılan ısı girdisinin gerek kaynak çekirdeği gerekse ITAB'da oluşan mikroyapılar üzerinde direkt etkili olduğu söylenebilir.

Yapılan çalışmamalar ve elde edilen sonuçlar ışığında bu konuda bundan sonra yapılacak araştırmalar için şu öneriler yapılabilir;

1. Bu çalışmada mevcut imkan ve olanaklar doğrultusunda yalnızca kaynak parametrelerinden kaynak akımı ve kaynak zamanının mekanik özelliklere etkisi incelenebilmiştir. Eğer daha büyük bütçe ve imkanlar sağlanabilirse elektrot kuvveti, elektrot bileşimi, malzeme ve yüzey durumu gibi diğer tüm kaynak parametrelerinin dahil edildiği geniş kapsamlı bir çalışma yapılarak paslanmaz çeliklerin direnç nokta kaynağında endüstri için ideal bir başvuru kaynağı oluşturulabilir.
2. AISI 430 ferritik ve AISI 310 ostenitik paslanmaz çeliklerin bu çalışmadaki kaynak parametrelerinde yorulma davranışları incelenebilir. Ayrıca korozyon deneyleri uygulanarak kaynaklı bağlantılarda, tanelerarası korozyonun oluşup oluşmadığı görülebilir.
3. Ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi dışında, özellikle son yıllarda otomotiv endüstrisinde kullanılmaya başlanan ve direnç nokta kaynağına rakip olarak görülen sürtünme karıştırma nokta kaynağı gibi farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilerek, yapılan bu çalışmalarla karşılaştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ODABAŞ, C., “Paslanmaz Çelikler; Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri”, Askaynak, 2.Baskı, Tavaslı Matbaası, Şubat 2004, İstanbul.
- [2] ANIK, S., “Kaynak Tekniği”, Cilt 3 , İ.T.Ü Matbaası, Sayı 1030, 1975.
- [3] OĞUZ, B., “Karbonlu ve Alaşımli Çeliklerin Kaynağı”, OERLIKON A.Ş. Yayını, 1985.
- [4] CEYHUN, V., “Ferritik ve Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Karbonlu Çelik ile Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Çekme Makaslama Dayanımına ve Tanelerarası Korozyona Etkisi”, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.1-29, 1992.
- [5] TABAN, E., “Yapısal Uygulamalar için Geliştirilen Modifiye 12 Cr Paslanmaz Çeliğinin Özellikleri ve Kaynak Kabiliyeti”, Doktora Tezi, KOÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2007.
- [6] TÜLBENTÇİ, K., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Kaynak Dünyası, Sayı 11, İstanbul 1985.
- [7] KOTECKI, D.J., “Welding of Stainless Steel”, ASM Handbook Volume 6, Welding and Brazing and Soldering, s.677-709, 1993.
- [8] KALUÇ, E., “Ferritik-Ostenitik Çelik Çiftinin Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Çekme-Makaslama Mukavemetine ve Tanelerarası Korozyona Etkisi”, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1988.
- [9] KALUÇ, E., TABAN, E., “İleri Kaynak Teknolojisi Ders Notları”, Elektrik Direnç Kaynak Yöntemleri, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 138, s.56-61, 2004.
- [10] TEKNODROM, “Robotik Otomasyon Sistemleri”, www.teknodrom.com/punta.html, (Ziyaret tarihi: 10 Kasım 2010)
- [11] EURO INOX (The European Stainless Steel Development Association), www.euro-inox.org/fla_126_EN.html, www.euro-inox.org/fla_161_EN.html, (Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2010)

- [12] VURAL, M., “Galvanizli Çelik Saçların Karbonlu ve Ferritik Paslanmaz Çelikler ile Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Davranışına ve Bağlantının Dayanımına Etkisi”, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1992.
- [13] GÜLBAHAR, B., “%17 Kromlu Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Tanelerarası Korozyon ve Çekme Makaslama Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1989.
- [14] ASLANLAR, S., OĞUR, A., ÖZSARAÇ, U., İLHAN, E., “Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding”, *Materials and Design*, Volume 29, 1427-1431, 2008.
- [15] KOCABEKİR, B., KAÇAR, R., GÜNDÜZ, S., HAYAT, F., “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*, Volume 195, 327-335, 2008.
- [16] ÖZYÜREK, D., “An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel”, *Materials and Design*, Volume 29, 597-603, 2008.
- [17] HASANBAŞOĞLU, A., KAÇAR, R., “Resistance spot weldability of dissimilar materials (AISI 316L–DIN EN 10130-99 steels)”, *Materials and Design*, Volume 28, 1794-1800, 2007.
- [18] DAVIS, J.R., Davis & Associates, editors, *ASM Specialty Handbook,- Stainless Steels*, American Society for Metals Materials Park, 1994.
- [19] KARLSSON, L., “Stainless Steels- Past, Present and Future”, *Svetsaren*, 1, 47- 52, 2004.
- [20] OATES, W.R., SAITTA, A.M., - Editors, “Materials and Applications Part 2”, *Welding Handbook Vol. 4- AWS*, Ohio, Amerika, 621 pages, 1998.
- [21] SOURMAIL, T., BHADSHIA, H.K.D.H., “Stainless Steels”, *Lecture Notes*, University of Cambridge, 2002, www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002, February 2007.
- [22] LIPPOLD, J.C., KOTECKI, D.J., “Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels”, *John Wiley&Sons*, Amerika, 87, 2005.
- [23] ARAN, A., TEMEL, M.A., “Paslanmaz Çelik, Yassı Mamuller, Üretimi-Kullanımı-Standartları”, *Sarıtaş Teknik Yayın No:1, 2. Baskı, Acar Matbaacılık A.Ş.*, İstanbul, 2004.

- [24] LADANOVA, E., “Microstructural Transformations and Carbide Precipitation in the HAZ of Supermartensitic Stainless Steels”, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, 2003.
- [25] CARROUGE, D., “Transformations in Supermartensitic Stainless Steels”, PhD thesis, University of Cambridge, 195 pages, 2002.
- [26] FOLKHARD, E., “Welding Metallurgy of Stainless Steels”, Wien- New York: Springer-Verlag, 1984.
- [27] SMITH, W.F., “Paslanmaz Çelikler”, Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri, Bölüm 5, Cilt 1., Çeviri: Erdogan, M., Ankara, s.169-214, 2000
- [28] KRAUSS, G., “Steels: Heat Treatment and Processing Principles”, American Society for Metals International Materials Park, 1989.
- [29] KALUÇ, E., TABAN, E., “Krom-Nikelli Paslanmaz Çelikler ve Modifiye Edilmiş Türleri” Metal Dünyası, 163, s.124-133, Aralık 2006.
- [30] KORG, H., “Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Robot Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007.
- [31] CAVAZOS, J.L., “Characterization of precipitates formed in a ferritic stainless steel stabilized with Zr and Ti additions”, Materials Characterization, 56, s.96-101, 2006.
- [32] TEKİN, A., “Çeliklerin Metalurjik Dizaynı”, Doyuran Matbaası, s.215-225, İstanbul, 1981.
- [33] AKITA, M., NAKAJIMA, M., TOKAJI, K., SHIMIZU, T., “Fatigue Crack Propagation of 444 Stainless Steel Welded Joints in Air and in 3%NaCl Aqueous Solution”, Materials and Design, 27, 92–99, 2006.
- [34] GÜLEÇ, Ş., “Malzeme Ders notları”, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 1980.
- [35] TÜLBENTÇİ, K, KALUÇ, E, SARI, N.Y., “Dubleks ve Süper Doubleks Paslanmaz Çelikler ve Kaynağı”, III. Balıkesir Mühendislik Mimarlık Sempozyumu Bildiri Özetleri, 1995.
- [36] CLARK, C.A., GUHA. P., “Welding Characteristic of Duplex Satainless Steels, Duplex Satainless Steels”, Conference Proceedings American Society For Metals, Ohio, pp.632, 1982.
- [37] GUNN, R.N., “The Influence of Composition and Microstructure on the Corossion Behaviour of Commercial Duplex Alloy”, 8th Annual North American Welding Research Conference, TWI,Cambridge,UK, pp.1, 1992.

- [38] ATKINSON, R.F., KING, R.W., “The Properties and Applications of Two Cast Duplex Stainless Steels, Duplex Stainless Steels”, Conference Proceedings American Society For Metals, Ohio, pp. 399-413, 1982.
- [39] NOBLE, D.N., “Oil and Gas Industry Experience with Duplex Stainless Steel Fabrication”, 8th Annual North American Welding Research Conference, Arco Alaska, pp. 1-2, 1992.
- [40] N.N., “Metals and Their Weldability”, Welding Handbook, Volume 4, 7th Edition, American Welding Society, Miami, 1982.
- [41] KALUÇ, E., “Ostenitik Krom-Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Gedik Kaynak Dünyası, Sayı:2, s.18-21, 1996.
- [42] KALUÇ, E. “Örtülü Elektrodla ile Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kaynak Ağzları ve Kaynağın Uygulanması”, Gedik Kaynak Dünyası , Sayı:3, 1991.
- [43] YENER, S., “Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Elektrodu Ömrünün Deneysel Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.13-37 1999.
- [44] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), “Metal Teknolojisi-Elektrik Direnç Nokta Kaynağı Ders Notları”, Ankara, 2007.
- [45] GÜRDAŞ, M., “Kaynaklı Konstrüksiyonlarda Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.4-65, 1999.
- [46] ANIK, S., “Kaynak Tekniği El Kitabı, Yöntemler ve Donanımlar”, Kansa Matbaacılık, 1991.
- [47] ANIK, S., ANIK, E., VURAL, M., “1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt 1”, Birsan Yayınevi, İstanbul, s.186-195, 1993.
- [48] AKTAŞ, S., “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Dual Faz Sacların Direnç Nokta Kaynağında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2008.
- [49] ERYÜREK, B., “Elektrik Direnç Kaynağı”, Mühendis ve Makine, Sayı 279, s22-31, 1983.
- [50] KAHRAMAN, N., GÜLENÇ, B., “Modern Kaynak Teknolojisi”, Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti., Ankara, s.1-99, 2009.
- [51] “Welding, Brazing and Soldering, Resistance Spot Welding”, 9th Edition ASM Metals Handbook, U.S.A., s.469-493, 1983.

- [52] ERYÜREK, İ.B., BODUR, O., DİKİCİOĞLU, A., “Kaynak Teknolojisinin Esasları”, Birsen Yayınevi, İstanbul, s.190-192, 1996.
- [53] GÜLTEKİN, N., “Kaynak Tekniği” Yıldız Üniversitesi Yayınları, s.1-27, İstanbul, 1985.
- [54] ALMUS, Z., “Nokta Direnç Kaynağında Ara Bağlayıcının Birleşme Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s.3-63, 2006.
- [55] HAYAT, F., “Çift-Fazlı Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağında Mho İle Kaynak Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s.28-49, 2005.
- [56] KAYA, Y., “Titanium Sacların Nokta Direnç Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s.39-55, 2010.
- [57] AKKUŞ, A., Galvanizli ve Ostenitik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Kaynaklı Bağlantılarının Yorulma Dayanımlarının Araştırılması, Doktora Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [58] ANIK, S., GÜLBAHAR, B., “%17 Kromlu Ferritik Paslanmaz Çelik Sacların Nokta Direnç Kaynağında Çekme-Makaslama Kuvveti İle Çekirdek Boyutları Arasındaki İlişkinin Etüdü”, II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı, s.94-105, İstanbul, 1989.
- [59] FUKUOMOTO, S., FUJIWARA, K., TOJI, S., and YAMAMOTO, A., “Small-scale resistance spot welding of austenitic stainless steels”, Materials Science and Engineering A-492 (1-2), 243-249, 2008.
- [60] MARASHI, P., POURANVARI, M., AMIRABDOLLAHIAN, S., ABEDI, A., and GOODARZI, M., “Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels”, Materials Science and Engineering A-480, 175-180, 2008.
- [61] VURAL, M., and AKKUŞ, A., “On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets”, Journal of Materials Processing Technology, (1-6), 153-154, 2004.
- [62] CHUKO, W. L., and GOULD, J. E., “Development of appropriate resistance spot welding practice for transformation-hardened steels”, Supplement to the welding journal, 1-5, 2002.
- [63] HAYAT, F., DEMİR, B., ve ASLANLAR, S., “Nokta direnç kaynak süresinin IF 7114 çeliği birleştirmelerinin mekanik özelliklerine etkisi”, 4. Demir Çelik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Karabük, s.243-248, 2007.

- [64] MARTIN, O., TIEDRA, P. D., LOPEZ, M., SAN-JUAN, M., GARCIA, C., MARTIN, F., and BLANCO, Y., “Quality prediction of resistance spot welding joints of 304 austenitic stainless steel”, *Materials and Design*, 30 (1): 68-77, 2008.
- [65] BAK, A., “Arayer Atomu İçermeyen (IF) Çeliklerde ve Bu Çeliklerin Nokta Direnç Kaynaklı Bağlantılarında Deformasyon Yaşlandırmasının Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s.99-101, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa BAYTEMİR, 10.12.1983 tarihinde Denizli'nin Çivril İlçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Çivril'de tamamladıktan sonra lise öğrenimini 1998-2002 yılları arasında Aydın Söke Ziraat Teknik Lisesi-Tarım Makineleri Bölümünde tamamladı. 2002 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında mezun oldu. 2006 yılında lisans öğrenimi esnasında Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Sakarya İl Müdürlüğü emrinde Teknisyen olarak işe başladı. Halen bu görevine devam etmektedir. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek öğrenim hayatına başladı ve halen öğrenimine devam etmektedir.