

**AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK İLE GENEL YAPI ÇELİĞİNİN
SÜRTÜNME KAYNAK KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nihat KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2010

ANKARA

Nihat KAYA tarafından hazırlanan AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK İLE GENEL YAPI ÇELİĞİNİN SÜRTÜNME KAYNAK KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hakan ATEŞ

Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Adem KURT

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi



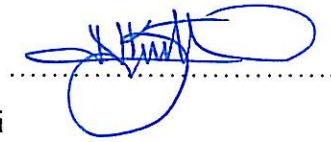
Doç. Dr. Hakan ATEŞ

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi



Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi



Tarih: 23/06/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Nihat KAYA

**AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK İLE GENEL YAPI ÇELİĞİNİN SÜRTÜNME
KAYNAK KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Nihat KAYA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2010

ÖZET

Son zamanlarda teknolojinin gelişmesi ve ihtiyaçların artması imalat yöntemleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kaynak tekniği de bu etkilenen işlemlerden birisidir. Sürtünme kaynak yöntemi ise özellikle 1950'li yıllarından sonra uygulamada kendisine yer bulmuş katı hal kaynak yöntemlerinden biridir. Sürtünme kaynak yöntemi ile çeşitli eksenel simetriye sahip parçalar ve demir esaslı olan ya da olmayan metaller kolaylıkla kaynaklanabilmektedir. Ayrıca maliyeti en aza indirilebilmek için farklı malzemelerin kaynağı büyük önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği ile St 60 genel yapı çeliğinin sürtünme kaynak kabiliyeti araştırılmıştır. Böylece maliyeti yüksek olan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin sarfiyatından tasarruf sağlanması amaçlanmıştır. Kaynak sonrası numunelerin mekanik davranışını belirlemek amacıyla çekme, sertlik deneyleri uygulanmış, deney numunelerinin mikro yapı incelemeleriyle birlikte EDS analizleri yapılarak optimum kaynak parametreleri saptanmaya çalışılmıştır.

Bilim Kodu : 710.3.019
Anahtar Kelimeler : Sürtünme kaynağı, AISI 304 paslanmaz çelik, genel yapı çeliği, mikroyapı
Sayfa Adedi : 139
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Hakan ATEŞ

**INVESTIGATION OF FRICTION WELDABILITY
OF AISI 304 STAINLESS STEEL TO STRUCTURAL STEEL**

(M.Sc. Thesis)

Nihat KAYA

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCES**

July 2010

ABSTRACT

In recent years, technological developments and demand rise have a huge impact on the methods of manufacturing. Technique of welding is one of these affected procedures. However, it is seen that friction welding method, which is one of solid phase welding techniques, took place especially at the end of 1950s. Parts having various axial symmetries and ferrous or non-ferrous metals can be welded easily by friction welding method. Moreover, welding of different materials is doable by friction welding and it comes into prominence by the meaning of decreasing the expenses.

In this investigation, exercise of friction weldability was applied on AISI 304 austenitic stainless steel and St 60 regular structural steel. Thus, it was aimed to reduce the waste of expensive material AISI 304 austenitic stainless steel. Tension and hardness tests were performed to observe mechanical behaviors of samples after the welding processes and then parameters of optimum welding condition were tried to determine by the help of both examining the micro structure and performing EDS analysis on experiment samples.

Science Code : 710.3.019

Key Words : Friction welding, AISI 304 Stainless steel, general construction steel, microstructure

Page Number: 139

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Hakan ATES

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hem uygulamaya yarar getirmesi hem de üniversite – sanayi işbirliğinin gelişimine katkıda bulunması amacıyla bilgi ve tecrübeleriyle çalışmama ışık tutan, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Hakan ATEŞ’e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında gece gündüz demeden çalışan ve en az benim kadar emeği geçen sevgili kardeşim Hakan ADA’ya, çalışmalarım süresince gösterdikleri destek ve anlayışları için işverenlerim Murat İbrahim YETKİN ve Ferdi Murat GÜL’e, kıymetli dostum ve mesai arkadaşım Ümit SARI’ya, deneysel çalışmalar da her türlü imkanlarından faydalandığım Türk Traktör Fabrikası yöneticilerinden Ali Orhan ASLANTAŞ, Onur BÜYÜKFİDAN ve personeline, deney numunelerinin talaşlı imalat işlemlerinde emeği geçen Emeks Elektronik, Yiğitler Makine, NMT Makine, Nur Kalıp, Dizayn Mühendislik ve Teknik Grup firma yetkililerine sonsuz şükranlarımı belirtmek isterim. Ayrıca çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocalarım, Teknoloji Fakültesi Dekanı Prof.Dr. Cemil ÇETİNKAYA ve Prof.Dr. Adem KURT’a, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Yrd. Doç.Dr. Nizamettin KAHRAMAN’a, Metal Eğitimi bölümündeki tüm öğretim üyelerine, özellikle Yrd.Doç.Dr. Behçet GÜLENÇ, Yrd.Doç.Dr. Ahmet DURGUTLU, Yrd.Doç.Dr. Ahmet GÜRAL, Yrd.Doç.Dr. Tayfun FINDIK, Öğr.Gör. Hanifi ÇİNİCİ, Arş.Gör.Dr. Volkan KILIÇLI’ya teşekkürlerimi belirtmek isterim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca beni her zaman destekleyerek benimle gurur duyan ve bugünlere getiren babam Ergun KAYA ve annem Ayşe KAYA’ya, kardeşlerim Murat Kaya ve Fırat KAYA’ya, yengem Funda KAYA’ya, kadim dostlarım Osman KEKLİK, Murat SEZGİN, M.Akif SEÇKİN, Rıfat BEYTER, Barış BAYRAKTAR, Savaş ALTUNER, Orhan DEMİR ve Murat TORAMAN’a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ÜRETİM KAVRAMI VE KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER	2
2.1. Giriş.....	2
2.2. Üretim Yöntemleri	3
2.3. Kaynaklı Bağlantılar.....	5
2.4. Kaynak Yöntemleri	6
2.4.1. Ergitmeli yöntemler.....	6
2.4.2. Ergitmesiz yöntemler	10
3. SÜRTÜNME KAYNAĞI.....	14
3.1. Giriş.....	14
3.2. Sürtünme Kaynağı İşlem Basamakları	17
3.3. Sürtünme Kaynağı Metotları	19
3.3.1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı	19
3.3.2. Volan tahrikli sürtünme kaynağı	21

Sayfa

3.3.3. Kombine edilmiş sürtünme kaynağı.....	23
3.4. Sürtünme Kaynağı Parametreleri	24
3.5. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı.....	27
3.6. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri ve Malzemeler	29
3.7. Sürtünme Kaynağı Uygulama Alanları	33
3.8. Sürtünme Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları.....	37
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	39
5. ÇELİKLER	47
5.1. Genel Yapı Çelikleri.....	48
5.1.1. Genel yapı çeliklerinin sınıflandırılması	49
5.2. Paslanmaz Çelikler Ve Türleri	50
5.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler	53
5.2.2. Östenitik paslanmaz çelikler	55
5.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler	56
5.2.4. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler.....	58
5.2.5. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler	59
5.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler	60
5.3.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti.....	62
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	68
6.1. Malzeme ve Metod	68
6.1.1. Malzeme	68
6.1.2. Metod	70
6.2. Mikroyapı incelemeleri	72

Sayfa

6.3. Sertlik Deneyleri.....	75
6.4. Çekme Deneyleri	77
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	80
7.1. Kaynaklı Birleştirme Esnasındaki Gözlem Sonuçları	80
7.2. Mikroyapı Deney Sonuçları	80
7.3. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları	104
7.4. Sertlik Deneyi Sonuçları	113
7.5. Çekme Deneyi Sonuçları.....	121
8. SONUÇLAR	129
KAYNAKLAR	132
ÖZGEÇMİŞ	139

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. İmal usullerinin sınıflandırılması.....	4
Çizelge 3.1. Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri	27
Çizelge 3.2. Sürtünme kaynaklı malzeme ve malzeme kombinasyonları.....	32
Çizelge 5.1. Genel yapı çelikleri kalite denklik tablosu	49
Çizelge 5.2. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler	52
Çizelge 5.3. Martenzitik paslanmaz çeliklerin türleri ve kimyasal bileşimleri.....	57
Çizelge 5.4. Yaygın olarak kullanılan dubleks paslanmaz çelik türleri	59
Çizelge 6.1. Deneyleerde kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları.....	69
Çizelge 6.2. Deneyleerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri	69
Çizelge 6.3. Numunelerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametreleri.....	72
Çizelge 7.1. Sertlik deney sonuçları.....	115
Çizelge 7.2. Dikey eksenden alınan sertlik değerleri	120
Çizelge 7.3. Çekme deneyi sonuçları.....	122

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir eritme kaynağı bağlantısının oluşumu	6
Şekil 3.1. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı	17
Şekil 3.2. Sürtünme kaynağı işlem basamakları	18
Şekil 3.3. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı cihazının şematik resmi.....	20
Şekil 3.4. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı kaynak	20
Şekil 3.5. Volan tahrikli sürtünme kaynağı cihazının şematik resmi.....	22
Şekil 3.6. Volan tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı kaynak	22
Şekil 3.7. Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri	30
Şekil 5.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları.....	54
Şekil 5.2. Fe-Cr-C alaşımları faz diyagramı	62
Şekil 5.3. Schaeffler diyagramı.....	64
Şekil 5.4. De Long diyagramı	65
Şekil 5.5. WRC-92 diyagramı.....	66
Şekil 6.1. St 60 çelik ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten üretileen kaynak numunesi.....	70
Şekil 6.2. Yatay doğrultuda sertlik değerlerinin alındığı bölgeler	77
Şekil 6.3. Dikey doğrultuda sertlik değerlerinin alındığı bölgeler.....	77
Şekil 6.4. Çekme numunesi ölçüleri (ASTM E 8M).....	78
Şekil 7.1. Tane yapılarındaki farklılıkların şematik gösterimi.....	81
Şekil 7.2. 1, 2 ve 3 numaralı deneylere ait yatay eksenindeki sertlik değişimi.....	116
Şekil 7.3. 4, 2 ve 5 numaralı deneylere ait yatay eksenindeki sertlik değişimi.....	117
Şekil 7.4. 6, 2 ve 7 numaralı deneylere ait yatay eksenindeki sertlik değişimi.....	118

Şekil	Sayfa
Şekil 7.5. Tüm numunelerin yatay eksenindeki sertlik değişimleri	119
Şekil 7.6. Dikey eksenden alınan sertlik değerleri	121
Şekil 7.7. 1 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 30 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 5 sn).....	124
Şekil 7.8. 2 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 5 sn).....	124
Şekil 7.9. 3 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 50 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 5 sn).....	125
Şekil 7.10. 4 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 50 MPa, t: 5 sn).....	125
Şekil 7.11. 5 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 70 MPa, t: 5 sn).....	126
Şekil 7.12. 6 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 3 sn).....	126
Şekil 7.13. 7 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 7 sn).....	127

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Sürtünme kaynağı	16
Resim 3.2. Kaynağı zor olan metal çiftleri a) 6061-T61 alüminyumu ETP 110 bakıra b) 304/304L paslanmaz çeliği-2219 alüminyuma	31
Resim 3.3. Otomotiv endüstrisinde sürtünme kaynağı uygulamaları a) Sürücü ve yolcu tarafı otomobil hava yastığı pompaları, b) Kompresör pistonları, c) Gövde montajı d) Egsoz subapları	34
Resim 3.4. Hidrolik silindir.....	35
Resim 3.5. Havacılık ve uzay endüstrisinde sürtünme kaynağı uygulamaları a) Ticari helikopter rotor gövdesi-2024 alüminyum b) MK 48 ateşleyici montajı c) Roket yakıt sisteminde kullanılan geçiş bağlantıları d) Mars Lander basınç depo fittingsleri.....	36
Resim 6.1. a) St 60 genel yapı çeliği mikroyapı fotoğrafı (x10) b) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik mikroyapı fotoğrafı (x10)	69
Resim 6.2. Deneyleerde kullanılan sürtünme kaynak makinesi	70
Resim 6.3. Kaynak makinesi bağlama mekanizması.....	71
Resim 6.4. Polyester reçineye gömülmüş numune	73
Resim 6.5. Mikroyapı görüntüleme işlemlerinde kullanılan optik mikroskop	74
Resim 6.6. Deneyleerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu ve EDS bağlantısı	75
Resim 6.7. Deneyleerde kullanılan mikrosertlik cihazı.....	76
Resim 6.8. Çekme numunesi fotoğrafı.....	78
Resim 6.9. Deneyleerde kullanılan çekme cihazı fotoğrafı	79
Resim 7.1. a) 4 numaralı numune birleşme hattı (x50) b) 3 numaralı numune birleşme hattı (x50)	82

Resim	Sayfa
Resim 7.2. a) St 60'da yönlenme (x20), b) AISI 304'de yönlenme (x20).....	82
Resim 7.3. 1 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	83
Resim 7.4. 2 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	83
Resim 7.5. 3 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	84
Resim 7.6. 4 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	84
Resim 7.7. 5 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	84
Resim 7.8. 6 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	85
Resim 7.9. 7 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri....	85
Resim 7.10. 1 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 30 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 5 sn).....	87
Resim 7.11. 2 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 5 sn).....	88
Resim 7.12. 3 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 50 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 5 sn).....	89
Resim 7.13. 4 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 50 MPa, t: 5 sn).....	91
Resim 7.14. 5 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 70 MPa, t: 5 sn).....	92
Resim 7.15. 6 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 3 sn).....	94
Resim 7.16. 7 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 7 sn).....	95
Resim 7.17. 1 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 30 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 5 sn).....	97
Resim 7.18. 2 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 5 sn).....	98
Resim 7.19. 3 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 50 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 5 sn).....	99

Resim	Sayfa
Resim 7.20. 4 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 50 MPa, t: 5 sn).....	100
Resim 7.21. 5 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 70 MPa, t: 5 sn).....	101
Resim 7.22. 6 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 3 sn).....	102
Resim 7.23. 7 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P ₁ : 40 MPa, P ₂ : 60 MPa, t: 7 sn).....	103
Resim 7.24. St 60 ana metal SEM fotoğrafı ve EDS analiz sonucu (x2500).....	104
Resim 7.25. AISI 304 ana metal SEM fotoğrafı ve EDS analiz sonucu (x2500)	104
Resim 7.26. 3 numaralı deney numunesinin SEM ve EDS alınan bölgeleri.....	105
Resim 7.27. 3 numaralı deney, 1) birleşme bölgesi 0,5 mm St 60 tarafı 2) birleşme bölgesi 3) birleşme bölgesi 0,5 mm AISI 304 tarafı.....	106
Resim 7.28. 1, 2 ve 3 numaralı deneylere ait EDS analiz sonuçları	108
Resim 7.29. 4, 2 ve 5 numaralı deneylere ait EDS analiz sonuçları	110
Resim 7.30. 6, 2 ve 7 numaralı deneylere ait EDS analiz sonuçları	112
Resim 7.31. St 60 tarafından kopmuş deney numunesi	123
Resim 7.32. AISI 304 tarafından kopmuş deney numunesi.....	123

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simge	Açıklama
$C_{eş}$	Karbon eşdeğeri
$Ni_{eş}$	Nikel eşdeğeri
σ	Sigma fazı
λ	Çeliğin özgül ısısı

Kısaltmalar

AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
EDS	Energy dispersive spectrometer
HV	Hardness vickers
ITAB	Isının tesiri altındaki bölge
MIG	Metal inert gas
MAG	Metal active gas
SEM	Tarama elektron mikroskobu
TIG	Tungsten inert gas
EİK	Elektron ışın kaynağı

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla ilerleyen teknoloji, artmakta olan taleplere karşılık vermek zorundadır. Bu da ancak, zamanla eksiklikleri saptayıp gidermek ve kendini sürekli yenilemekle mümkündür.

Bugün çok sayıda kullanılabilir birleştirme tekniği vardır ve günümüzdeki sorun birleştirmenin nasıl yapılacağı değil, en iyi birleştirme yönteminin nasıl seçileceğidir. Her yöntemin kendine has özellikleri vardır ve en uygun seçim için birçok hususun değerlendirilmesi gerekir. Mukavemet, üretim kolaylığı, maliyet, ömür, korozyon dayanımı ve görünüş gibi faktörlerin göreceli önemi, büyük ölçüde göz önüne alınan uygulamaya bağlıdır.

Sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak benzer ve benzer olmayan, hatta bir çok karmaşık malzemenin birleştirilebilmesi imalat sektöründe enerji ve materyal tasarrufu sağlamıştır. Alaşımli çelik ile normal karbonlu çeliğin birleştirilmesi ile üretim yapma, ham madde maliyetini düşürdüğü için imalat sektöründe kullanılmaktadır. Günümüzde, otomotiv sektöründe, supaplar, bendiks dişlileri, aks milleri, dişli-mil parçaları, turboşarj pervane milleri, çatal-mil bağlantıları, vb. parçalar alaşımli çelik ile normal karbonlu çeliğin sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmesi ile üretilmektedir [Özdemir, 2002; Otmanbölük, 1997].

Bu çalışmada, sürtünme kaynak yöntemi kullanılarak iki farklı malzemenin (St 60 kalitesinde genel yapı çeliği ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik) birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Farklı sürtünme süresi, sürtünme basıncı ve yığma basıncı ile birleştirilen parçalardan alınan numunelere EDS analizi, çekme ve sertlik deneyleri ile mikroyapı incelemesi yapılarak numunelerin kaynak kabiliyetleri test edilmiş ve en uygun kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. ÜRETİM KAVRAMI VE KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER

2.1. Giriş

Metaller insanlar tarafından binlerce yıldan beri kullanılmakla birlikte, ilk yararlı metalin nasıl üretildiği kesin olarak bilinmemektedir. Metallerin erken çağlardan itibaren kullanılmış olduğu bakır alaşımından (bronz) yapılmış aletlerin ortaya çıkarılması ile kanıtlanmıştır. Fakat metalin bir başka metale birleştirilmesi yöntemi bundan çok sonraları bulunabilmiştir. Küçük metal parçacıkların birleştirilerek daha büyük ve daha karmaşık parçaları üretmedeki yetersizlik, mühendislikteki gelişmeyi 19. yüzyılın başlarına kadar ertelemiştir. Cıvatalama, perçinleme, lehimleme ve son olarak da kaynak gibi birleştirme tekniklerinin ticari boyutlarda ortaya çıkışı ancak makineye bağlı endüstriyel devrimin gerçekleşmesiyle mümkün olmuştur.

Bugün çok sayıda kullanılabilir birleştirme tekniği vardır ve günümüzdeki sorun birleştirmenin nasıl yapılacağı değil, en iyi birleştirme yönteminin nasıl seçileceğidir. Bronz çağı insanı birleştirme yöntemi olarak sadece kama kullanma veya deri şeritle bağlama arasında seçim yapmak zorunda iken, günümüzde bir tasarım mühendisi, aynı derecede uygun dört veya beş değişik birleştirme tekniğinin olduğu durumlarla kolaylıkla karşılaşabilir. Her yöntemin kendine has özellikleri vardır ve en uygun seçim için birçok hususun değerlendirilmesi gerekir. Mukavemet, üretim kolaylığı, maliyet, ömür, korozyon dayanımı ve görünüş gibi faktörlerin göreceli önemi, büyük ölçüde göz önüne alınan uygulamaya bağlıdır.

Bir köprü tasarımcısı, köprü platformunda hareket eden vasıtaların oluşturduğu değişken yükleri taşıyacak levhaları birbirine birleştirecek yöntemler arar. Buna karşılık, köprüden geçen otomobillerin imalatçısı ise üretim hattında kullanılabilmeye uygun güvenilirlik, tekrarlanabilirlik ile birlikte yüksek üretim hızına sahip birleştirme tekniklerini araştırır. Genellikle büyük iş gücü gerektiren bu yöntemler mümkün olduğunca yarı kalifiye operatörler tarafından uygulanmaya müsait olmalıdır. Bu ise, üretim düzeninin kurulması, kontrolü veya izlenmesi için uzman personel gerektirir. Birleştirme işlemlerini mümkün olduğu kadar çabuk

yapmak her ne kadar arzulanır ise de, bu her uygulama için birinci dereceden önemli değildir. Geçekte bazı bağlantıların yerinde yapılması zorunlu bir faktör olarak karşımıza çıkabilir [Gourd, 1995].

2.2. Üretim Yöntemleri

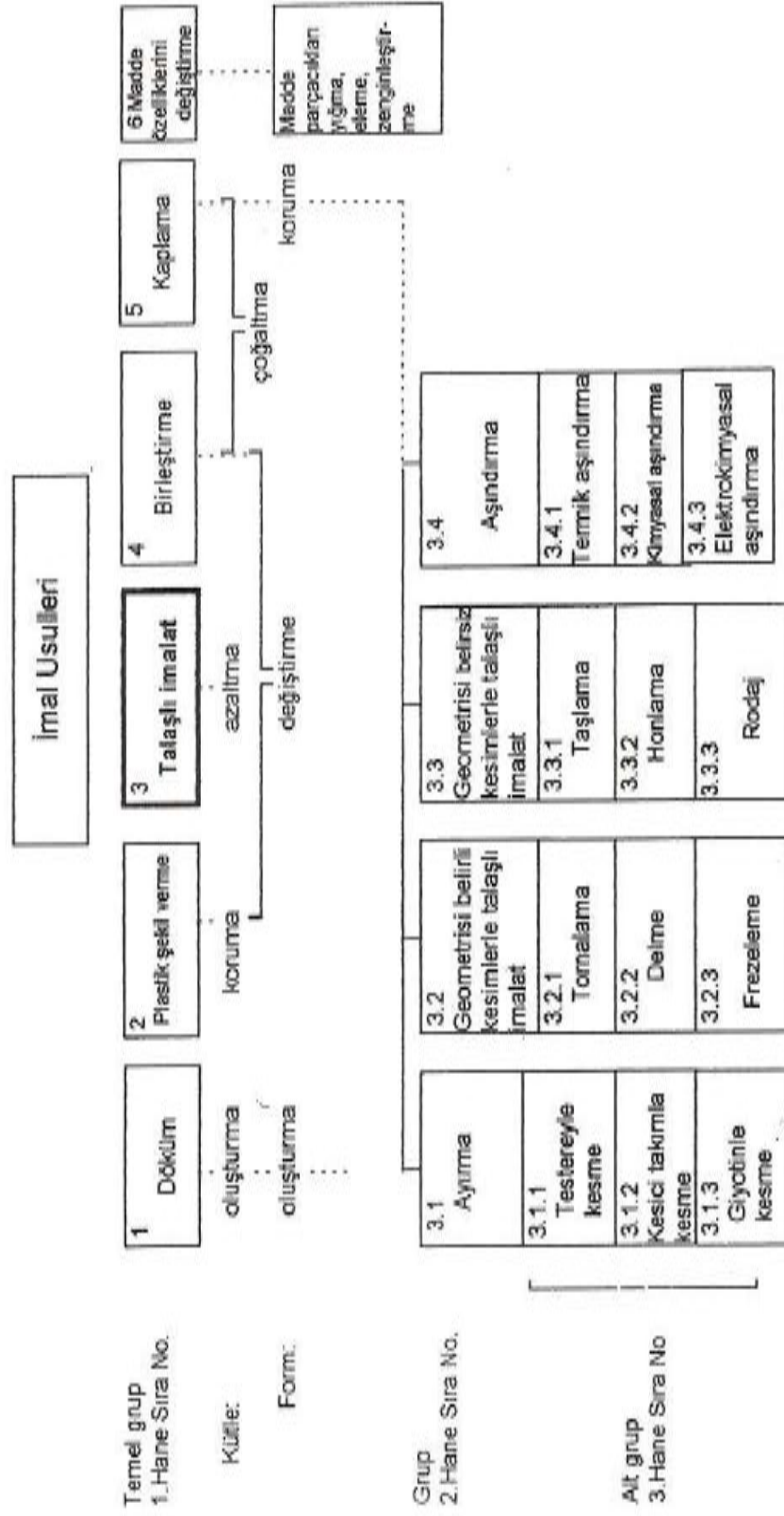
İmalat teknolojisinin amacı, teknik resimlerde veya başka tür bilgi ortamlarında oluşturulan parçaların ekonomik olarak imal edilmesidir. Konstrüksiyon aşamalarında, parçaların imalatını mümkün kılan prosedürler ve özellikler tespit edilir. Bunlar arasında parçanın boyutları, malzemeleri, gerekli ölçü toleransları, imalat sırasındaki veya sonrasındaki yüzey kalitesi ve bunun için gerekli muayene ve ölçü aletleri bulunur. Doğaldır ki, işletmenin olanakları da göz önünde tutularak parçanın imalatında gerekli olan imal usulleri de önceden tespit edilmek zorundadır.

Birim zamanda imal edilecek parça sayısı ve ayrıca işletme ve personel giderleri, imalatın otomasyon derecesini belirler. Günümüzde imalat olanakları, elle kontrol edilen universal makinelerden, işlenecek bilginin programlar şeklinde iletiildiği nümerik kontrollü tezgâhlara ve çok sayıda CNC tezgâhın kullanıldığı esnek imalat sistemlerine kadar uzanmaktadır [Sönmez, 2007].

Değişik standartlarda, imal usullerinin sistematik şekilde sınıflandırılmaları verilmiştir. Çizelge 2.1, DIN 8580'in sıralama sisteminde örnek olarak talaşlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılışını göstermektedir. Bu standartta temel sınıflandırma prensibi, malzeme kütesinin değiştirilmesine dayanmaktadır. Ya bir katı cismin parçacıklarından ya da karmaşık bir yapı elemanının parçalarından oluşan kütle, aşağıdaki temel prensiplerden biriyle değiştirilir:

- Kütleli oluşturarak (Döküm)
- Kütleli koruyarak (Plastik şekil verme)
- Kütleli azaltarak (Talaşlı imalat)
- Kütleli çoğaltarak (Kaplama)

Çizelge 2.1. İmal usüllerinin sınıflandırılması [Anık ve ark., 1999]

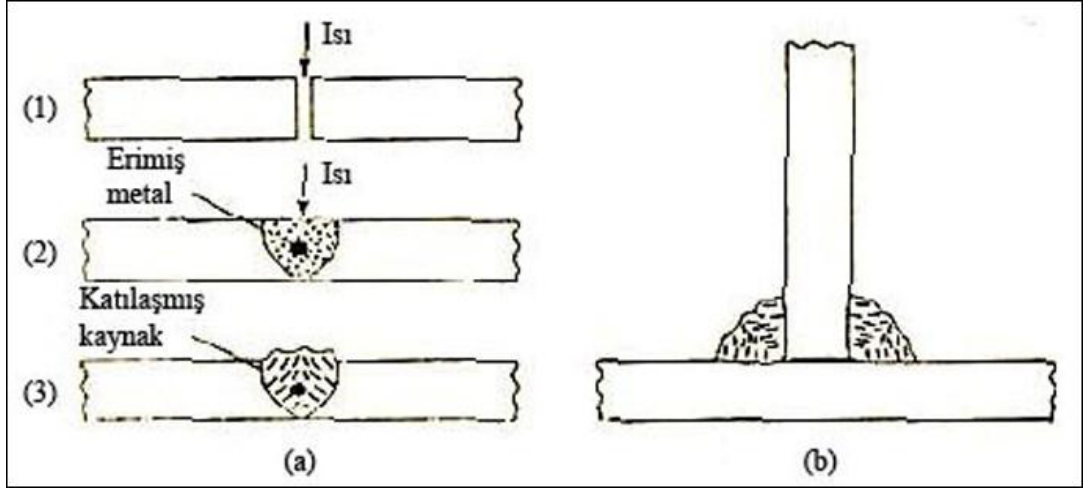


Tespit edilen imal usullerinin sonradan iyileştirilmesi, karmaşık işlemlere göre daha kolaydır. Bu nedenle endüstriyel imalatta döküm veya plastik şekil verme ile ön şekillendirilmiş parçalar sonradan bir talaşlı imalatla son ölçülerine getirilir. Klasik imalat sırası, böylece maliyetin düşürülmesi ile eşzamanlı olarak bitmiş parçanın kalitesinde ulaşılabilecek en yüksek kalite taleplerine ulaşmayı amaçlar.

Geleceğe yönelik imalat stratejileri, bilinen taleplere ek olarak daha yüksek verimlilik ve imalatın esnekliğini ve güvenilirliğini de dikkate almaktadır [Sönmez, 2007].

2.3. Kaynaklı Bağlantılar

Kaynaklı bağlantıların çoğu, bağlantı yerinin her iki tarafındaki esas malzemeyi ergiterek yapılır. Ergimiş metal her iki eleman arasında bir sıvı banyosu şeklinde toplanır. Banyo katılaştığı zaman, bağlantının iki elemanı arasında yük taşıyabilen metalden bir köprü oluşur. Olayların oluşum sırası, bir sac metaldeki bağlantının kesitini gösteren Şekil 2.1.a'da görülebilir. Birbirine dik açıda düzenlenmiş iki metal parçası arasındaki bağlantı halinde Şekil 2.1.b'de elemanların yüzeyinden ergiyen metal bir köprü oluşturmak için yeterli olmayabilir. Bu durumda yeterli mukavemete sahip bir metal köprü sağlanması için dolgu metali adı verilen ilave metal kullanımı gerekir.



Şekil 2.1. Bir ergitme kaynağı bağlantısının oluşumu a) Alın kaynağı, b) İç köşe kaynağı

Diğer birleştirme yöntemlerinden farklı olarak, kaynaklı birleştirmelerde başarı, işlemi gerçekleştiren kişinin ustalığına büyük ölçüde bağlıdır. Cıvatalama, perçinleme, yumuşak ve sert lehimleme ve özellikle de nokta kaynağı standart hale getirilebilen, üretim ve kontrol açısından mekanize edilebilen işlemlere sahiptirler. Bu, bazen ergitme kaynağı için de mümkün olmakla birlikte bazı çalışma faktörleri otomatik kaynağın geniş ölçüde kullanılmasını imkânsız hale getirmiştir. Ancak kaynakçının sahip olduğu ustalık ona, küçük çaplı ince cidarlı boru sistemlerinden gemilere ve köprülere kadar değişen ürünlerin imalatında kullanabileceği değişik, çok yönlü teknikleri sağladığından, bunun daima bir sakınca olduğunu düşünmemek gerekir. Kaynağın farklı üretimlere uyum sağlama yeteneği ve büyük yatırımlar yapmadan iş tipini değiştirmeye uygunluğu da aynı derecede önemlidir [Gourd, 1995].

2.4. Kaynak Yöntemleri

2.4.1. Ergitmeli yöntemler

Malzemeyi yalnız sıcaklığın etkisi ile eritip bölgesel olarak ek kaynak malzemesi ile birlikte birleştirme teknikleridir. Bu yöntemlerde kaynak sıcaklığı birleştirilecek malzemelerin ergitme sıcaklıklarından daha yüksektir [Anık ve ark., 1991].

Gaz ergitme kaynağı

Gaz ergitme kaynağı, en eski kaynak yöntemlerinden biridir; ancak, TIG kaynağı gibi modern kaynak yöntemleri için öncülük etmiştir.

Oksi-asetilen kaynağı olarak da bilinen gaz kaynağında, ısı membaı olarak bir alev kullanılır. Alevin oluşturulması ve sürdürülmesi için oksijen gibi bir yakıcı gaz gerekir. Alev, hem esas metali hem de kaynak bölgesine sevk edilen çubuk şeklindeki ilave metali ergitir. Gaz ergitme kaynağı düşük yatırım maliyetiyle üniversal bir uygulama kabiliyetine sahiptir [Anık ve ark., 1999].

Ark kaynağı

Temel ilkeleri elektrik arkından elde edilen ısıya dayanan ark kaynak teknikleri elektriğin bulunmasıyla geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüze kadar çok sayıda ark kaynak tekniğı geliştirilmiş olup metal koruyucu altındaki kaynak da bu yöntemlerdendir [Ateş, 2003].

Elektrik ark kaynağı

Bu yöntemde ark, ergiyen bir çubuk elektrod ile iş parçası arasında yanar. Ark ve kaynak banyosu, havanın zararlı etkilerinden, elektrod tarafından sağlanan gazlar ve\veya cüruf ile korunur [Anık ve ark., 1999].

Gazaltı ark kaynağı

Gazaltı ark kaynağı, kaynak bölgesinin bir koruyucu gaz yardımıyla korunduğı kaynak yöntemleri grubudur. Kullanılan koruyucu gaz türüne göre ve elektrodun ark taşıyıcı olup olmadığına göre alt gruplara ayrılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan kaynak yöntemidir.

TIG kaynağı, “Tungsten Inert Gas” kelimelerinin baş harflerinin alınması ile meydana gelmiştir. TIG kaynağında tungsten elektrod ile iş parçası arasında ark oluşturulur ve bu ark havanın etkisinden argon ve helyum gazı atmosferi ile korunur. Kaynak işlemi için ayrıca ilave metale ihtiyaç vardır. SIGMA kaynağı olarak da bilinen MIG kaynağı, asal gaz atmosferi altında ergiyen elektrodla yapılır. Genellikle argon gazının kullanıldığı bu yöntem adını “Metal Inert Gas” kelimelerinin baş harflerinden almıştır. Ergiyen elektrodla karbondioksit atmosferi altında yapılan MAG kaynağı adını “Metal Active Gas” kelimelerinin baş harflerinden almıştır. MIG kaynağından tek farkı kullanılan koruyucu gazdır [Anık, 1991; Anık ve Vural, 1996].

Tozaltı ark kaynağı

Tozaltı ark kaynağı, yüksek ergitme gücü ve yüksek kalitede kaynaklı bağlantılar sağladığından, kaynaklı imalat yapan işletmelerde sabit bir konumda uygulanır.

Tozaltı kaynağında ark, ergiyen bir elektrot ile parça arasında gözle görülmeyecek şekilde yanar. Ark ve kaynak bölgesi, bir toz yığını arasında bulunur. Kaynak banyosu, atmosferin etkilerinden, tozun oluşturduğu cüruf tarafından korunur [Sönmez, 2007].

Elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynağı (EİK) yoğunlaştırılmış ve yönlendirilmiş elektron demetinin sahip olduğu enerjinin metallerin ergitilerek kaynak edilmesini sağlayan bir işlemdir. Elektron demetinin sahip olduğu kinetik enerjinin kaynak yapılacak parçaların küçük bir bölgesinde yoğunlaştığı için, kaynak bölgesinde enerji yoğunluğu 10^8 W/cm² değerine erişebilmektedir. Bu yöntemde kaynak işlemi yüksek vakum, düşük vakum ve vakumsuz ortamda yapılmaktadır.

Elektron ışın kaynağı ile kaynak yapılacak parçalar genellikle ilave metal kullanılmaksızın birleştirilir ve birleştirilecek iki parçanın arasındaki boşluğun 10⁻² mm'den daha fazla olmaması gerekmektedir. Elektron ışın kaynağında kaynak dikiş

formu diğer yöntemlere göre farklıdır. Bu yöntemde, kaynak dikişinin (derinlik/genişlik) oranı yüksektir (25/1). Bu durum kalın parçaların tek pasoda kaynak yapılmasını sağladığı gibi kaynak banyosunun küçük olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu kaynak yapılan parçanın birim uzunluk başına ısı girdisi diğer kaynak yöntemlerine göre düşüktür. Dolayısıyla dar kaynak bölgesi, daha az distorsiyon ve hatasız kaynak imkanı ortaya çıkmaktadır.

Tam yoğun malzemelerin elektron ışın kaynağında yüksek derinlik/genişlik oranı kaynak dikişinde gözenek ve kök kısmında boşluk oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca ışınların odaklandığı bölgede yüksek sıcaklığın etkisiyle alaşım elemanlarının buharlaşması ortaya çıkabilir. Bu durum kaynak bölgesinde kimyasal kompozisyon farklılıklarına neden olacaktır [Varol ve ark., 2002].

Laser ışın kaynağı

Montaj parçalarının sürekli olarak küçülmesi, birleştirme tekniklerinin daha küçük alanlara yayılmasını gerekli kıldığından bu yöntem geliştirilmiştir. Laser ışın kaynağı, ısı membaı olarak yüksek yoğunluklu (10^5 - 10^7 W/cm² veya 6×10^5 - 6×10^7 W/in²) laser diye adlandırılan yapışık optik enerji kaynağı kullanılır. Laser ışınının yapışık doğası ışınların küçük bir noktada toplanmasına ve yüksek enerji yoğunluğunun oluşmasına izin verir. Laser sistemi esas olarak laser kafası ve kumanda düzenli enerji kaynağından meydana gelir. Güç yoğunluğu, malzeme kuvvetle buharlaşmadan ergiyecek şekilde ayarlanır. Teorik olarak ilave metal kullanılmadığından parçalar birbirine tam olarak yaklaştırılır. Ağızlar arasındaki boşluk mikron civarındadır [Anık, 1980; ASM handbook, 1993].

Plazma kaynağı

Plazma terimi, iyonlaşmış bir gaz kütlesi anlamına gelmektedir. Bir gaz, pozitif iyonlarıyla negatif yüklü elektronlarına ayrışmaya yeterli yükseklikte bir sıcaklığa ısıtıldığında plazma oluşur. Bu ayrışmayı oluşturmak için bir enerji gerekir ve kaynakta bu enerji arktan sağlanır. Ark sütununun merkezindeki gaz, oluşan

sıcaklıklarda ayrışır ve plazma oluşur. Bu gaz ark sütunundan uzağa doğru akarken nötr atomlar oluşturmak üzere yeniden birleşir ve bu sırada ortama sis enerjisi sağlar.

Özellikle paslanmaz çeliklerin kesilmesinde yaygın biçimde kullanılan plazma arkı, temel olarak TIG kaynak yönteminin bir uzantısı olup, bu yöntemde TIG kaynağının konik şeklindeki arkı çeşitli düzenlemelerle büzülerek ince silindirik getirilmiştir. Bir plazma ark üfleci, ucundaki küçük bir deliği bulunan meme ile bu memenin merkezindeki tungsten bir elektrodan oluşmuştur. Plazma gazı, bu iç içe geçmiş dairesel meme ile elektrod arasından geçerek hızla delikten dışarı çıkar [Kahraman ve Gülenç, 2009].

2.4.2. Ergitmesiz yöntemler

Katı hal kaynak teknikleri olarak da bilinen ergitmesiz tekniklerde ilave dolgu malzemesi kullanılmadan ana malzemenin ergime noktası altında temas yüzeylerinde birleşme meydana gelmektedir. Aslında klasik olarak kaynağı zor olan metaller ve farklı bileşimlerdeki malzemeler bu tekniklerden biri ile birleştirilebilir. Basınç, ilgili tekniğin özelliklerine göre kullanılabilir. Bu işlemler özellikleri aynı ya da farklı malzemeler arasında yüksek kaliteli birleştirmeler üretmek için ya parçaların deformasyonunu veya difüzyon ve sınırlı deformasyonu kapsamaktadır [ASM handbook, 1993].

Patlamalı kaynak

Prensip bakımından soğuk basınç kaynağına benzer. Her iki yöntemde de dikey bir basınç kuvveti, teğetsel bir yükleme ile kombine şekilde etki eder. Bu durum yüzeydeki oksit tabakasının yırtılmasına ve yüzeyin büyümesine neden olur. Gerekli yüksek basınç işlem gören parçalardan patlayıcı madde yüklü birinin patlatılması ile diğerine karşı 2-25 derecelik bir açı ile ve 100-1000 m/sn hıza kadar hızlandırılması suretiyle ortaya çıkar. Bu anda çarpma basıncı 10-100 K bar'a çıkar [Anık, 1980]. İki metal parça arasında metalurjik bağla elektron paylaşımı oluşturmak için patlama kuvveti kullanılır. Patlama ile önemli miktarda ısı oluşmasına rağmen metal

parçalara ısı transferi için zaman kalmamaktadır. Böylece metalde gözlemlenebilir sıcaklık artışı görülmemekte ve ısıdan etkilenen bölge oluşmamaktadır [ASM handbook, 1993].

Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı, iki metal parçasını birleştirmek için sürtünme tarafından üretilen ısıyı kullanır. Bu işlem esas olarak, geniş, büyük çubukların ve boruların alın kaynağı için kullanılır. İşlem sırasında dış bir ısı kaynağı kullanılmaz. Birleştirilecek parçaların uçları düşük bir basınçla bir araya getirilir. Hareketli ve sabit parçalar arasındaki sürtünme, kaynak oluşumu için gerekli ısıyı üretir. Metal yüzeyleri plastik hale geldiğinde döndürme hareketi durdurulur ve büyük bir basınçla birbirlerine bastırılır [Sönmez, 2007].

Ultrasonik kaynak

Bu kaynak tekniğinde birleştirilecek parçalar, hareketli ultrasonik frekansla titreşen sonotrot ile sabit duran bir altlık arasına konur ve hafif bir kuvvetle bastırılır. Sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde yani alt ve üst kaynak yerlerinde izafi bir harekete neden olur. Ultrasonik dikiş kaynağında bindirilen saclar dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından senkronize çalıştırılan altlık makaralarına bastırılır. Sonotrotların levha titreşimleri üstteki iş parçasına iletilir. Yeterli bastırma kuvveti ve titreşim ile iş parçasının her iki temas yüzeyindeki pürüzlülüklerin tepelerinde titreşimler akmaya başlar. Aynı anda yüzey tabakası kesme zorlamasıyla yırtılarak kenarlara doğru kayar. Böylece oluşan sürtünme ısı, malzemenin kaynak bölgesinde bir kuvazı-sıvı (ergimeye yakın) durumu oluşturularak yeterli derecedeki yaklaştırma sayesinde kaynak yapılan her iki bölgede atomsal mertebede birleşmeler başlar [Anık, 1991].

Difüzyon kaynağı

Difüzyon kaynağı, aynı veya farklı, çoğunlukla metal malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Özellikle uçak-uzay ve nükleer teknoloji için geliştirilmiştir.

Yüksek sıcaklıkta etkiyen kaynak basıncı, yüzeydeki pürüzlülük tepelerinin plastik şekil değişimini sağlar. Bu şekilde arttırılan temas yüzeyi, madde bağlarının oluşumuna yol açar ve kaynak işlemi böylece gerçekleşir [Sönmez, 2007].

Elektrik direnç kaynağı

İş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda, basınç uygulaması ile yapılan bir kaynak tekniğidir. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinesindeki elektrodlar veya çeneler yardımıyla uygulanır. Elektrik direnç kaynağı için gerekli alçak gerilim ve yüksek akım şiddeti kaynak transformatörlerinden sağlanır. Basınç da hidrolik veya mekanik donanımlarla temin edilebilir. Elektrik direnç kaynak usulleri aşağıdaki gibi sınıflanabilir.

- Nokta kaynağı (normal nokta ve kabartılı nokta kaynakları),
- Dikiş kaynağı (sürekli dikiş ve aralıklı dikiş kaynakları),
- Alın kaynağı (basıncılı alın ve yakma alın kaynakları).

Sürtünme - karıştırma kaynağı

Sürtünme – karıştırma kaynağı, sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş bir başka yöntemidir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemidir. Bu yöntem, herhangi bir boşluk, çatlak veya deformasyon meydana gelmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın çok zor olduğu, birçok malzemeyi kaynaklamayı basitleştirmiştir.

Kaynak işlemi esnasında kaynak edilen parçalar ergimezler, bu yüzden yöntem katı faz kaynağı olarak adlandırılır. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir.

Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde pahalı ekipmana, ilave tel kullanımına, koruyucu gaz ihtiyacı duyulmaması, temiz ve çevreci bir kaynak yöntemi olması yöntemin uygulama alanını genişletmektedir. Ayrıca kaynak işlemi radyasyon, toksik gazlar gibi olumsuz sonuçlar yaratmamaktadır [Kahraman ve Gülenç, 2009].

Yüksek frekans kaynağı

Yüksek frekans kaynağı, elektrik direncinden doğan yüksek sıcaklık ile iş parçası hareket ederken uygulanan birleştirme (yığma) kuvvetinin etkisi ile metal malzemelerin birleştirilmesi işlemidir. Yüksek frekans akımının, metal malzemelerin kaynağı için, sıcaklığından faydalanmasında iki yöntem kullanılır, bunlar; yüksek frekans direnç kaynağı (HFRW) ve yüksek frekans indüksiyon kaynağı (HFIW)'dir. Yüksek frekans indüksiyon kaynağı bazen indüksiyon direnç kaynağı olarak da isimlendirilir.

Kaynak bölgesindeki sıcaklık ve kaynak sonuçları itibarıyla, esasen her iki yöntemde birbirinin aynısıdır. HFRW yönteminde, iş parçası ile elektrik kontağı arasında iletilen akım fiziksel olarak iş parçasına temas eder. HFIW ile akım iş parçasına dışarıdan bağlanan bir indüksiyon bobini vasıtasıyla meydana getirilir. Elektrik kontağı ile iş parçası arasında fiziksel bir temas yoktur.

Karbonlu çeliklerin ve birçok diğer alaşımlı çeliklerin kaynağında çoğunlukla kaynak bölgesinin üzerine soğutucu su veya soğutucu yağ akıtılır. Bu yöntemde, boru imalatı gibi, yüksek üretim uygulamaları için, yüksek kaynak hızlarında üretim yapmak mümkündür.

3. SÜRTÜNME KAYNAĞI

3.1. Giriş

Yeni metotlar ile imal edilmesi zor olan malzemeler daha ekonomik, daha az zamanda ve daha az malzeme sarfiyatıyla üretilebilmektedir. Kaynak teknolojisinde son zamanlarda önemli gelişmeler olmuş ve bilinen kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi oldukça zor olan, ergime sıcaklıkları yüksek ve birbirinden farklı olan metaller bu gelişmelerle sorunsuz bir şekilde kaynaklanabilmiştir. Bu yöntemlerden biri sürtünme kaynağı yöntemidir [Kahraman ve ark., 1995].

Kaynak teknolojisinde, farklı bileşim ve farklı kristal yapıdaki malzemelerin birleştirilmesi zordur. Kaynak sonrası oluşan iç gerilmeler, cüruf, gözenekler, gevrek metaller arası fazlar, kaynağın kalitesini etkileyen unsurlardır. Sürtünme kaynağında malzemelerin ergime sıcaklığına ulaşmadan birleşmeleri sayesinde bahsedilen olumsuz unsurlar en az seviyelere inmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan sürtünme kaynağı hem bir katı hal hem de bir tür basınç kaynağıdır. Bu kaynak parçaların birbirine sürtünmesiyle mekanik enerjiden doğan ısının yardımıyla gerçekleşir. Isının bu şekilde elde edilmesi ne elektriksel bir enerji ne de başka bir enerji kaynağı yardımı ile olur [Dinç, 2006].

Malzemelerin sürtünmesinden faydalanılarak, mekanik enerjiyi termal enerjiye dönüştürerek oluşan ısıyla malzemelerin kaynak edilmesi fikri yeni değildir. Sürtünme kaynağının başlangıcı 15 y.y'a kadar gitmesine rağmen, fakat konu ile ilgili ilk patent 19. y.y'da 1891'de Amerikalı makinist J.H. Bevington tarafından alınmıştır. Bevington sürtünme ısını kullanarak metal boruların kaynağını gerçekleştirmiştir. Daha sonraları konu ile ilgili W. Richter tarafından 1924 yılında İngiltere'de British patent no: 572789 ve 1929 yılında Almanya'da (Dr-patent no: 477084), H. Klopstock tarafından 1924 yılında Sovyetler Birliği'nde birer patent alınmıştır. H. Klopstock ve A.R. Neelands silindirik parçaların sürtünme kaynağı için 1941 yılında bir patent almışlardır. Ayrıca II. Dünya savaşı sırasında Almanya ve Amerika'da plastik malzemelerin kaynağı için sürtünme kaynağı kullanılmıştır.

Bununla birlikte sürtünme kaynağının ticari bir proses olarak gelişimi ve konu ile ilgili bilimsel çalışmaların başlaması bir Rus makinist tarafından gerçekleştirilmiştir. Rus makinist A.J Chdikov iki metal çubuk arasında başarılı bir kaynak gerçekleştirerek 1956 yılında Sovyetler Birliği'nde konu ile ilgili bir patent (No:106207) almıştır. Sovyetler Birliği'nde ki daha yoğun çalışmalar Vill ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Bu proses ABD'ye 1960 yılında girmiştir. American Machine and Foundry Co.'da Holland Cheng adlı araştırmacılar sürtünme kaynağının termal ve parametre analizleri üzerine çalışmışlardır. İngiltere'de ilk sürtünme kaynağı kaynak enstitüsü tarafından 1961 yılında gerçekleştirilmiştir. 1962 yılı itibariyle ise Sovyetler Birliği'nde, bir çok fabrikada sürtünme kaynağı kullanılır hale gelmiştir (Kharkov ısıtma ve havalandırma fabrikası, Lysbenk metal fab., Vitbesk takım fab., K. Gotwal'd otomobil fab., Minsk traktör fab. v.b.). Yine 1952 yılında ABD'de Caterpillar Tractor Co. sürtünme kaynağını modifiye ederek atalet kaynağı olarak anılan yöntemi geliştirmişler ve bundan sonra konvansiyonel sürtünme kaynağı Rus tipi proses, atalet kaynağı ise Caterpillar tipi proses olarak adlandırılmıştır. Bu tarihten itibaren daha hızlı gelişme gösteren proses hızla bütün dünyada çabucak yayılmış ve bir çok endüstride uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında elektron ışın kaynağından sonra pratikte en çok uygulama alanı bulmuş olan bir yöntemdir [Yılmaz, 1993; Şahin, 2001].

Bu bilgiler ışığında sürtünme kaynağını şu şekilde tanımlamak doğru olur. "Sürtünme kaynağı, elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından faydalanmadan, malzemelerin ara yüzeylerinde mekanik olarak oluşturulan sürtünme sayesinde bu mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılarak malzemelerin plastik deformasyona uğramasıyla gerçekleşen bir katı hal kaynak yöntemidir."

Sürtünme kaynağının uygulanması basit bir işlem sayılabilir. Eksenel olarak birbirine temasta bulunan iki parçadan en az biri sabit bir hızda döndürülmekte iken, dönmesi engellenmiş olan diğer parça bunun üzerine hidrolik olarak bastırılır. Parçaların sürtünmekte olan yüzeylerinde ince bir tabakanın sıcaklığı, malzemelerin

plastikleşerek basınçlı kaynak yapma sıcaklığına eriştiğinde, dönme hareketi frenlenerek aniden durdurulmakta ve bu sırada arttırılan basma kuvveti ile parçalar şişirilmektedir [Coşkun, 1992; Kahraman ve ark., 1995; Karabulut ve Taşgetiren, 2004]. Bu metot ile aynı cinsten metaller kaynatılabildiği gibi, farklı cinsten malzemelerinde kaynatılması mümkün olmaktadır (Resim 3.1).

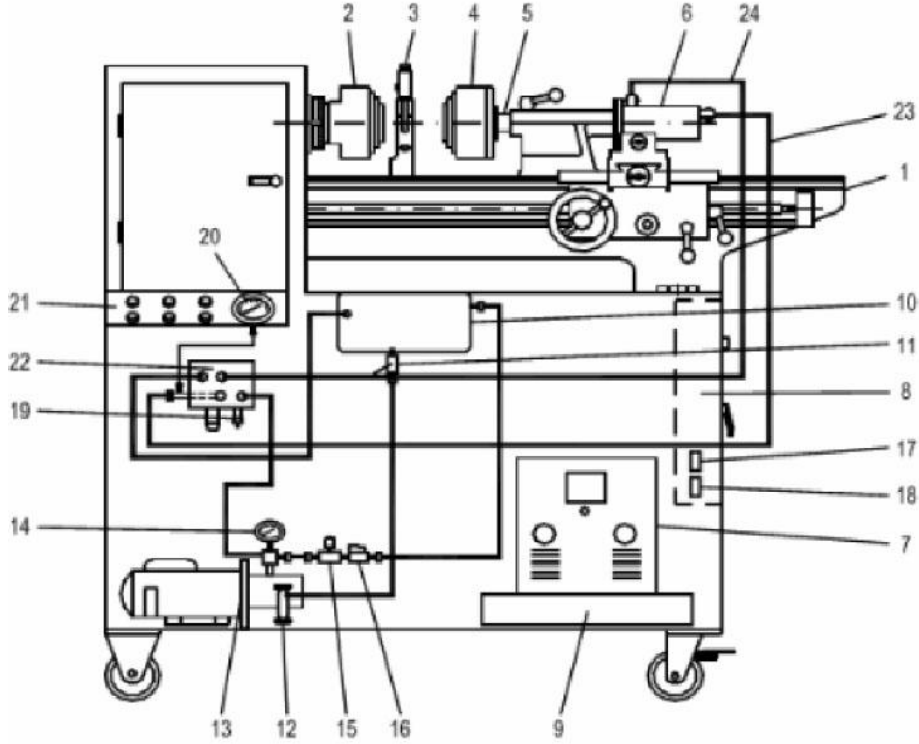


Resim 3.1. Sürtünme kaynağı [Karabulut ve Taşgetiren, 2004]

Sürtünme kaynağı; bir parçanın döndürülüp diğer parçanın aksel yönde ötelenmesi ile yapılabileceği gibi, dönen veya sabit duran ara parça kullanımıyla da yapılabilir. Ayrıca bu dönme hareketi yerine vibrasyon kullanarak sürtünme hareketi yaptırılabilir [Anık, 1991].

Genel olarak sürtünme kaynağı aksel simetriye sahip ve daire kesitli parçaların birleştirilmesinde kullanılmasına rağmen cihazların otomasyonu ve bilgisayar kontrol olanaklarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılabilir.

Sürtünme kaynağı cihazı tasarımı olarak bir torna tezgâhını andırmaktadır. Bu makinelerin üzerinde birtakım değişiklikler yapıp modifiye edilmesiyle Şekil 3.1’de bölümlerini rahatlıkla görebildiğimiz sürtünme kaynağı makineleri elde edilmektedir.



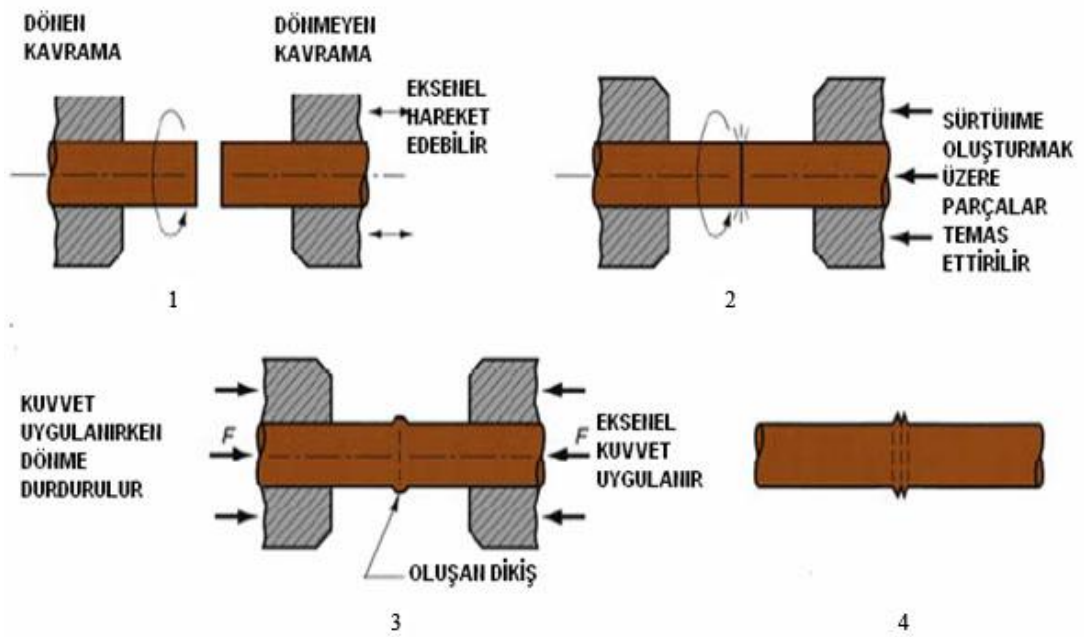
- | | | |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1. Torna | 9. Takım avadanlık kutusu. | 17. Zaman rölesi (I) |
| 2. Döner ayna | 10. Hidrolik yağ deposu | 18. Zaman rölesi (II) |
| 3. Merkezleme yatağı | 11. Küresel vana | 19. Basınç ayar valfi (II) |
| 4. Sabit ayna | 12. Filtre | 20. Hidrolik basınç göstergesi |
| 5. Piston kolu | 13. Hidrolik pompa | 21. Kumanda panosu |
| 6. Çift etkili silindir | 14. Yağ basınç göstergesi | 22. Yön Kontrol Valfi |
| 7. Manyetik fren ünitesi | 15. Basınç ayar valfi (I) | 23. Basınç Hattı |
| 8. Elektrik panosu | 16. Selenoid ventil | 24. Dönüş Hattı |

Şekil 3.1. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı [Ateş, 2003; Karabulut ve Taşgetiren, 2004]

3.2. Sürtünme Kaynağı İşlem Basamakları

1. Birleştirilecek parçalar, genelde ayna ve pens yardımıyla aksel olarak cihaza bağlanırlar. Bu parçalardan biri sabit iken, diğeri dönmektedir.
2. İstenilen dönme hızına ulaşıncaya, iş parçaları birbirine temas ettirilerek sürtünme basıncı adıyla adlandırdığımız aksel bir itme kuvveti uygulanır.
3. Sürtünmeye başlayan parça yüzeyleri ısınır ve ardından basıncın etkisiyle yığılma başlar.

4. Dönmekte olan iş parçası durdurulur ve yine aksel bir kuvvet olan yığma basıncı uygulanır. Bu şekilde parçaların kaynak işlemi gerçekleşmiş olur (Şekil 3.2)



Şekil 3.2. Sürtünme kaynağı işlem basamakları [Vural, 2003]

Kaynak sırasında oluşan saçak şeklindeki yığılma, sürtünme kaynak cihazında bulunan aparatla veya ayrı bir torna makinesinde alınmalıdır. Bu saçığın alınmaması çentik etkisi yapacak buda kaynaklı bağlantının dayanımını olumsuz yönde etkileyecektir.

Sürtünme ısısı, aksiyal mesafede parçanın ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa ulaştığı anda meydana gelmektedir [Kurban ve Kahraman, 1995].

Sürtünen yüzeylerde lokal olarak birbirine değen ve sürtünen tepeliklerin ani kaynaklandıkları ve bunların hemen koparıldığı bu sırada noktasal değme yerlerinde sıcaklıkların kısa bir süre için çok yüksek derecelere ulaştıkları hakkında bazı görüşler sunulmuştur. Gerçek olan şudur ki sürtünen yüzeylerde çok kısa bir

zamanda yüksek sıcaklıklara erişebilmekte ve buda uygulanan baskı kuvveti altında parçaların birleşmesi için yeterli olmaktadır [Otmanbölük, 1997].

Sürtünme kaynağında, sadece parçaların kaynakla birleşeceği kısımlarda ısı üretimi söz konusudur. Kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler basınç altındadır ve ısıtma fazı olarak adlandırılan bu süreç yüzeylerde plastik şekil verme sıcaklığı oluşana kadar devam eder. Genel olarak, çelikler için kaynak bölgesinde oluşan bu sıcaklık 900-1300 °C arasındadır [Anık, 1991].

3.3. Sürtünme Kaynağı Metotları

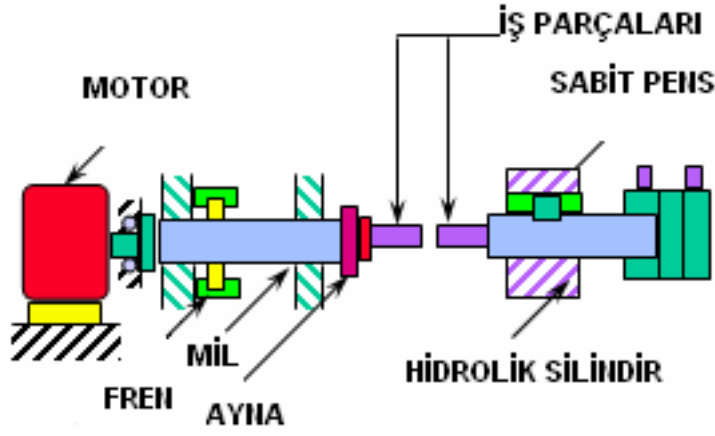
Sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre farklı isimler alabilir. Genelde iki tür sürtünme kaynağı vardır. Bunların dışındaki yöntemler bu iki yöntemin ortak kullanıldığı ve frenleme biçimine göre dallara ayrılan yöntemlerdir.

Sürtünme kaynağı yöntemlerinde, tahrik şekli ve yığma işlemi birbirinden farklıdır.

3.3.1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı

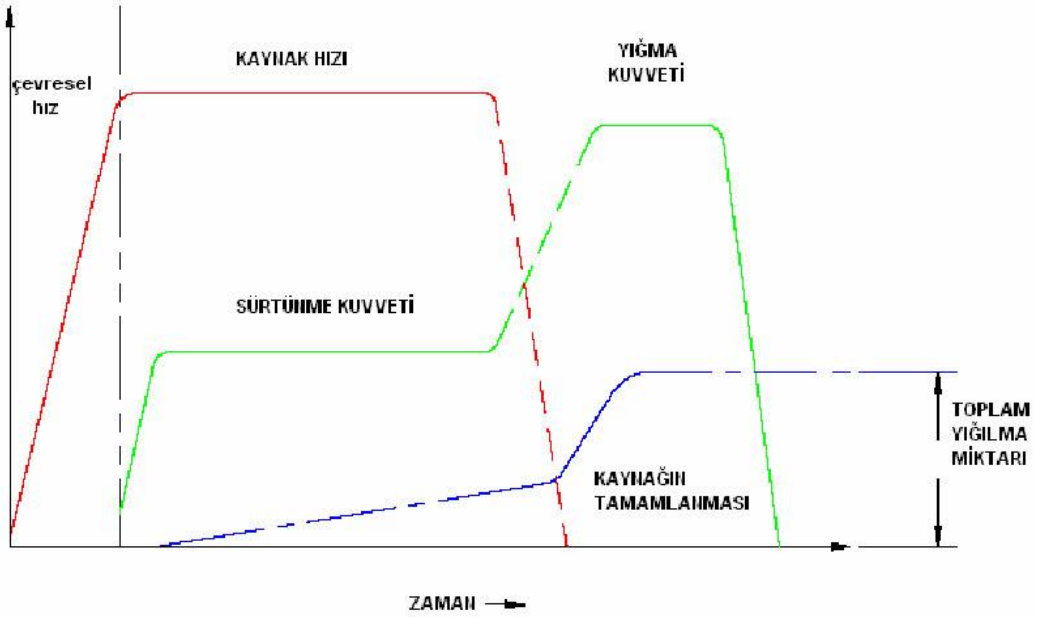
Kaynaklanacak parçalardan biri dairesel harekete sahip bir motor ünitesine bağlanırken, diğeri aynı eksende sabitlenir. Motor belirlenen devir sayısında döndürülmeye bununla beraber parçada belli bir hızda dairesel hareket yapmaya başlar, ardından sabit olan parça aksenal yönde hidrolik sistem yardımıyla hareket ettirilerek diğeri parçaya bastırılır. Sürtünen yüzeylerde mekanik enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür, bu işlem yüzeyler yeterince ısınıp plastik şekil değiştirmeye başlayıncaya kadar devam ettirilir. Daha sonra motor bir frenleme sistemi yardımıyla durdurulur, daha önceden belirlenen değerde bir yığma kuvveti uygulanır ve bu arada malzeme soğumaya bırakılır [Gürler, 2000]. Bu şekilde kaynak işlemi tamamlanmış olur (Şekil 3.3).

Temel kaynak parametreleri; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme kuvveti, yığma süresi ve yığma kuvvetidir.



Şekil 3.3. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı cihazının şematik resmi

Şekil 3.4'deki grafikte sürekli tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı kaynak parametreleri görülmektedir.



Şekil 3.4. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı kaynak parametreleri

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ilk sürtünme, ısınma ve yığma aşamalarından oluşmaktadır.

İlk Sürtünme aşamasında, döndürme momenti hızla artarak maksimum değere ulaşır ve aşama sonunda azalır. Momentin hızındaki bu değişme, parçaların yüzeyindeki pürüzlerin kopmasına neden olur. Sürtünme nedeniyle oluşan ısı ara yüzeydeki malzemenin yumuşamasını da sağlar.

Isınma aşamasında, moment değerimiz sabit kalır, bununla birlikte malzemeler yığılmaya izin verecek ölçüde ısınırlar.

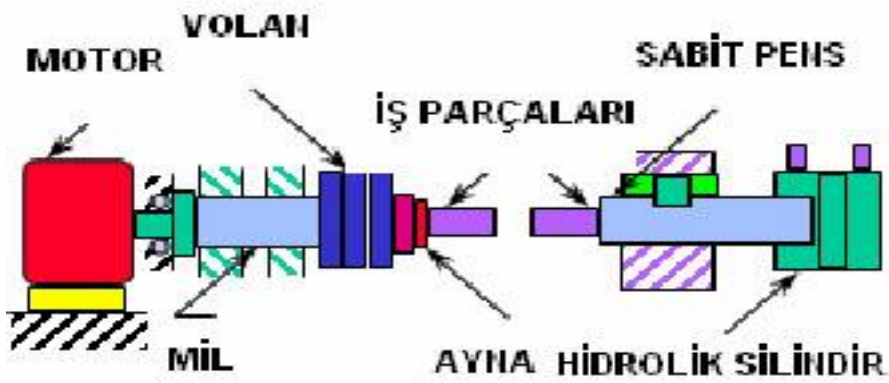
Yığılma aşamasında, tahrik sisteminin ayrılıp frenlemenin başladığı anda devreye girer. Tahrik mili ayarlanan frenleme süresi ile yavaşlar. Yavaşlama malzemenin türüne bağlıdır. Fren ani bir şekilde uygulanırsa, moment aniden düşer ve yığılma meydana gelir [Özlu, 2002].

Eksenel kuvvet sabit kaldığı zaman, frenleme süresinin uzatılması, yavaşlama hızını düşürerek yükleme değerini arttırır. Eğer bu aşamada eksenel kuvvet arttırılırsa frenleme süresi kısalmış ancak, uygulanan kuvvet daha büyük olduğu için maksimum değeri yükselmeye devam eder. Sürtünmenin artması burulmalı yığılmayı arttırır. Bu aşama, tahrik mili durdurulduktan kısa bir süre sonra sona erer. Basma ve yığılma dönemi de dördüncü bir aşama olarak kabul edilebilir [Dinç, 2006].

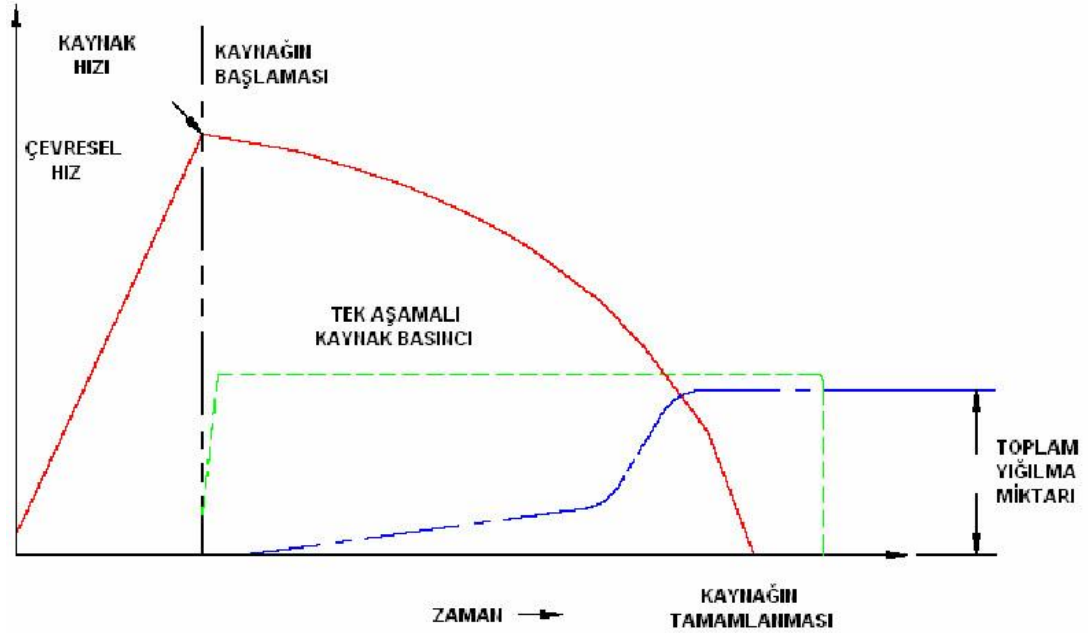
3.3.2. Volan tahrikli sürtünme kaynağı

Bu yöntem atalet kaynağı olarak da bilinmektedir. Sistem, sürekli tahrikli sürtünme kaynağına çok benzer. Yalnız burada dönen parçaya tutunan mil bir volana bağlanmıştır. Volan önceden belirlenen bir hıza ivmelendirilir. Böylece dönme enerjisinden kazanılmış olan enerji volan üzerinde toplanır. Daha sonra malzemeler birbirine temas ettirilir ve hidrolik silindir ile belirli bir eksenel kuvvet uygulanır. Parçaların bu şekilde sürtünmesiyle volandaki enerji ara yüzeyler arasında ısı enerjisine dönüşür. Volanın hızının azalmasıyla beraber kaynak bölgesi ısınır. Ayrıca bir fren yapma gereği duymadan, tahrik motorunun devreden çıkarılması sayesinde volanın hızı azalır ve durur [Chen ve ark., 1998]. Volan tahrikli sürtünme kaynağı cihazının şematik resmi Şekil 3.5’de verilmiştir.

Temel kaynak parametreleri; devir sayısı, yığma kuvveti, yığma süresi ve volanın kütlesidir. Volan tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı kaynak parametreleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Volan tahrikli sürtünme kaynağı cihazının şematik resmi



Şekil 3.6. Volan tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı kaynak parametreleri

Bir volan tahrikli sürtünme kaynağı da ilk sürtünme, ısınma ve yığma olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

İlk sürtünme aşaması sürtünen yüzeylerin birbirine temasıyla başlar, momentin maksimum seviyeye çıkıp daha sonra sabit bir düzeye inmesiyle sona erer.

Isınma aşamasında ısı, yüzeyler arasından uzağa doğru iletir. Bu esnada parçalarda eksenel kısalma az olur. Enerji volandan alınarak, volanın hızı düşmeye devam eder.

Yığılma aşamasında hız belli bir seviyeye düştüğünde, volan tarafından dağıtılan enerji, yüzeyler arasında iletilen miktardan daha az olur. Hız ve sıcaklık düşmeye devam ettiği sırada yığılma başlar. Metal sertleşirken moment tekrar daha yüksek bir seviyeye yükselir. Kaynak soğurken hız ve moment sıfıra düşer [AWS, 1980; Özlü 2002].

3.3.3. Kombine edilmiş sürtünme kaynağı

Daha önce bahsedilen iki kaynak çeşidinin ortaklaşa kullanıldığı kaynak türüdür. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesinde avantajlı olduğu söylenebilir. Bu kaynak yönteminde iki safha vardır. Bu safhalar sürtünme ve yığılma safhalarıdır. İşlemin başlangıcında kuru sürtünme hâkimdir ve bu sürtünmenin etkisiyle moment eğrisi zirve yaptıktan sonra tekrar dengeye gelir. Süreç içerisinde oksit tabakalarının parçalanması sonucu yüzeyde temaslar sırasında kuvvetli atomsal bağlar oluşmaya başlar. Bu bağlar sürtünme hareketi ile koparılmaya çalışılır. Sonuçta temas noktalarında büyük adhezyon kuvvetleri oluşur, moment artar ve sıcaklık arzu edilen seviyeye ulaşır. Frenleme sonrası hız azalırken moment de sıfıra düşer [Anık, 1991; Şahin, 2001].

İkinci safhada ise, kaynak numuneleri sürtünme ile yeterince ısıtıldığında, atalet momentine sahip olan mil durdurulur. Yığılma işlemi için basınç korunur veya artırılır. Bu basınç, kaynak edilecek malzemelerin sıcaklık mukavemetine göre seçilir [Şahin, 2001].

Temel kaynak parametreleri; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme kuvveti, yığılma süresi, yığılma kuvveti ve frenlemeye başlama zamanıdır.

3.4. Sürtünme Kaynak Parametreleri

Sürtünme kaynağında dikkat edilmesi ve sürekli kontrol edilmesi gereken birçok parametre bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonunda bu parametrelerden en önemlilerinin; çevresel hız, sürtünme basınç kuvveti, sürtünme süresi, yığma basınç kuvveti ve yığma süresi olduğu görülmüştür. Bunun yanında dikkat edilmesi gereken parça geometrisi, malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti, malzemenin ısı kapasitesi, parça boyutunda meydana gelen kısalma gibi parametrelerde vardır [Dinç, 2006].

Sürtünme kaynağında birleşmedeki kaliteyi etkileyen en önemli parametre çevresel hızdır. Çevresel hızın yüksek seçilmesi durumunda ara yüzeydeki sıcaklık artarken, çevresel hızın düşük seçilmesi ara yüzeyde yetersiz bir ısınmaya neden olacaktır. Bu durum çalışmayı etkileyecek kadar büyük momentlerin meydana gelmesine ve düzensiz ısıtmadan dolayı üniform olmayan yığmaya neden olur. Sonuçta kaynak bağı bundan olumsuz olarak etkilenir.

Farklı metal bağlantıları için düşük çevresel hız, gevrek bir metaller arası yapının oluşumunu sınırlandırabilir. Çevresel hızın yüksek tutulması durumunda ise ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) genişler, kaynak bölgesinde bu şekilde oluşabilecek yüksek ısının kontrolü için sürtünme basıncı ve sürtünme süresi dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Çelikler için çevresel hız 1.2-1.8 m/s arasında önerilmektedir [Gürler, 2000].

Sürtünme basınç kuvveti, parça geometrisi ve kaynağı yapılacak malzeme çiftinin plastik şekil değiştirebilme yeteneğine bağlıdır. Sürtünme basıncı ara yüzeydeki oksit filmlerini, yağ, kir, yabancı tabakaları ortadan kaldırıp yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve düzenli bir ısıtmayı sağlayabilecek değerde seçilmelidir.

Alaşımız ve düşük alaşımlı çeliğe uygulanan basıncı iki katına çıkarmak güç talebini % 50 arttırır. Alaşımız ve düşük alaşımlı çelikte yapılan sürtünme kaynağı için güç gereksinimi, başlangıç durumu için 4,8 kw/cm² 'dir. Daha hızlı enerji girişi

ve yüksek basınç, ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) genişliğini etkiler. Metal yer değiştirme oranını hızlandırır ve böylece kaynak zamanı kısalarak paralel olmayan kenarlı ısı bandı oluşturur. Eğimi düşük olan sıcaklık gradiyentinin iç yüzeyin hızlı soğumasına yol açması ve kaynak yeteneğini azaltan sert yapıların oluşması sebebiyle, hava ile sertleşebilen çeliklerin kaynağında bu durum önemlidir. Sürtünme süresince gerekli olan basınç değeri malzemeye bağlıdır. Atmosfer etkilerini önleyebilmek için iki yüzeyin yakın teması sağlanmalıdır [Orhan, 2003].

Sürtünme süresi malzemeye göre değişir. Bu süre, sürtünen yüzeylerdeki tüm kalıntı ve pislikleri uzaklaştırabilecek, kaynak bölgesinin gerekli olan kaynak sıcaklığına en kısa zamanda ulaşmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Zamanın az veya çok olması malzemenin ısınması etkileyeceğinden kaynak kalitesine de tesir edecektir. Optimumu aşan bir ısıtma süresi, düşük iletkenliğe, daha fazla malzeme tüketimine, aşırı yığılmayla birlikte geniş bir ITAB'ın oluşmasına sebep olur.

Uygun olmayan sürtünme süresi, düzensiz ısıtma ile beraber ara yüzeyde birleşmemiş bölgeler oluşmasına ve kirlenmelere yol açar [Dinç, 2006].

Özellikle çeliklerde bağlantı kalitesini arttırabilmek için sürtünme periyodu ardından bir yığma basıncı uygulanmaktadır. Bu basınç malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır. Yığma basıncının yüksek olması kaynak yığılmasına neden olurken, düşük olması ise elverişsiz şekillendirmeye, dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya sebep olmaktadır.

Yığma basıncı, malzemelerin birleştirilmesinin iyi olması için bu malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında bir değer olmalıdır. Aksi halde yığma basıncı çok yüksek alınırsa malzeme fazla deformasyona uğrayacak, kaynak bölgesinde metalik olmayan yapılar istenilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekilleneceklerdir. Bu durum kaynağın kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz etkiler.

Genel olarak, yığma basınç kuvveti paslanmaz çelikler için sürtünme basınç kuvvetinin iki katı olarak tavsiye edilirken, düşük karbonlu çelikler için sürtünme

basıncı 30-65 MPa, yığıma basıncı 75-140 MPa, orta ve yüksek karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 70-210 MPa, yığıma basınç kuvveti 100-420 MPa arasında seçilir [Orhan, 2003].

Kaynak yapılacak parçaların ara yüzeyinde gereksinim duyulan plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için yığıma basınç kuvvetinin uygulandığı süredir. Doğrudan malzemeyle ilgilidir.

Yığıma süresi malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. Yığıma süresinin de az veya çok olması aynı sürtünme süresi gibi, malzemenin ısınmasını etkileyeceğinden kaynak kalitesine tesir eder.

Ellis, sürtünme kaynağı üzerine yapmış olduğu araştırmalardan yola çıkarak, malzemelere göre optimum kaynak parametrelerinin neler olabileceğini saptamaya çalışmıştır [Ellis, 1976] . Buna göre aşağıdaki izelge oluşturulabilir (izelge 3.1).

Çizelge 3.1. Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri [Orhan, 2003]

Malzeme	Çap (mm)	Sürtünme kuvveti (N/mm ²)	Yığma kuvveti (N/mm ²)	Sürtünme süresi (sn)	Yığma süresi (sn)	Çevresel hız (m/sn)
Alaşımız ve düşük alaşımlı çelikler	20	20-80	80-200	1-100	250	0,5-5
C 60	20	50-80	150 - 250	3 - 6	2 - 3	3,5 - 6
42 CrMo4	20	50-80	150-250	3-6	2-3	3,5-6
Yüksek alaşımlı çelikler	20	40-100	120-400	3-120	2-10	0,5-5
X5CrNi18 8	20	60-80	250-300	6-10	2-3	1,5-3
S6-5-3	20	60-100	190-250	10-15	2-3	1,5-3
Y.sıc. dayanımlı alaşımlar	20	60-180	180-600	5-150	2-15	0,5-5
Nimonic 80	20	60-100	180-400	5-10	2-3	1,5-3
Inconel 713C	20	60-100	400-500	5-10	2-3	1,5-3
Hafif ve ağır metaller	20	10-80	20-250	1-8	2-5	0,5-4
E – Cu	20	10	20-60	1-6	2-5	4
TiAl6V4	20	20-30	60-80	2-8	2-5	1-4
Al 99.5	20	10-30	30-80	0,1-4	2-5	2-4
AlMgSi0.5	20	30-80	50-150	0,1-6	2-5	0,5-2
Pb	20	50-70	70-100	2-4	2-5	1,5-2

3.5. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı

Sürtünme kaynağında yapılan kaynak dikişinde de, ergitme ve difüzyon kaynaklarındaki gibi, kaynak malzemelerinin birbirine karıştığı bir bölge ve bu

bölgenin etrafında her iki malzeme tarafında da ısıdan etkilenmiş alanlar mevcuttur. Malzemelerin birbirine karıştığı bölgede difüzyon söz konusu olup atomlar karşılıklı yer değiştirir. Isıdan etkilenen bölgeler genelde kaynak sırasında oluşan sıcaklığın, değer olarak yaklaşık malzemelerin ergime sıcaklıklarının yarısına kadar çıktığı ve daha da üzerine çıktığı alanlardır.

Sürtünme kaynağı sırasında farklı malzemelerde meydana gelebilecek içyapı değişimleri aşağıda sıralanmıştır:

- Metaller arası fazın oluşması
- Yüksek karbonlu alaşımsız çeliklerde karbon miktarının azalması
- İçyapı da yeniden kristalleşme
- Ergitme sıcaklığı malzemelerin kendinden daha az olan ötektik alaşımların oluşması
- İçyapı da tane irileşmesinin olması
- Çeliklerde martenzitik içyapı dönüşümü

Yukarıda maddeler halinde verilen durumlar, kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Metaller arası fazlar sert ve gevrek olduklarından kalınlıkları belli genişliği aşınca buldukları tabaka boyunca aşırı bir gevrekleşme gösterirler.

Alaşımsız çeliklerde karbon azalması lokal olarak mukavemet değerlerinin azalması demektir. Bu şekilde oluşan yumuşak bölgelerin kaynak bağlantılarının mukavemeti de az olacaktır.

İçyapı da yeniden kristalleşme veya tanelerin irileşmesi, yumuşak bölgelerin oluşmasına neden olur.

Martenzitik dönüşüme uğrayan bölgeler de belli bir büyüklük ve sertliği aşınca metaller arası fazlarda olduğu gibi gevrekleşmeye neden olurlar. Sürtünme

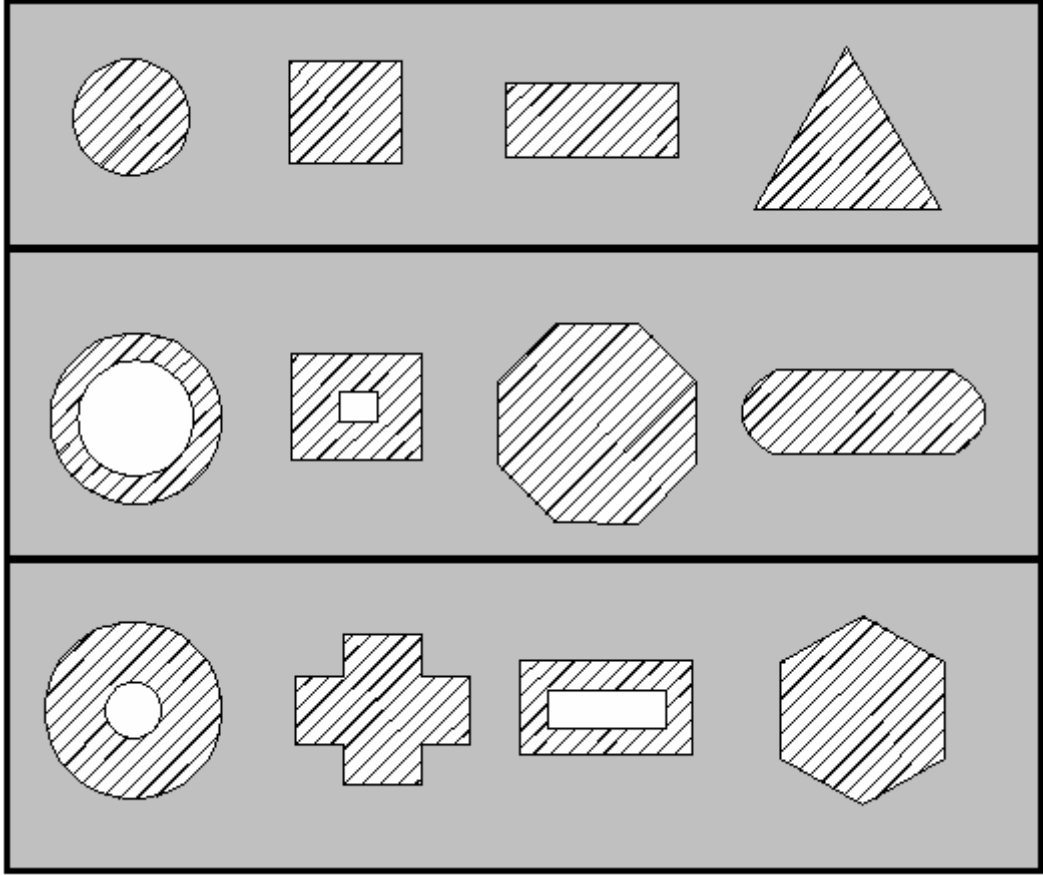
kaynağının kısa sürmesi ve bu sırada sıcaklık artarken, daha sonrada şişirme esnasında aşırı plastik deformasyonların meydana gelmesi, diğer kaynak metotlarına göre malzeme içyapı dönüşümünü azaltıcı yönde bir avantaj sağlar [Gürleyik, 1982].

3.6. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri ve Malzemeler

Sürtünme kaynağı genel olarak ekstenel simetriye sahip ve dairesel kesitli parçaların birleştirilmesinde kullanılırken, cihazların otomasyonu ve bilgisayarlı kontrol imkanlarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılmaktadır.

Sürtünme kaynağı ile hem içi dolu hem de boş kesitlerin kaynağını yapmak mümkündür. Dolu kesitlerde parça için çap değeri 1 mm'den 300 mm'ye kadardır. Parçalar eğer boş ise, birbirine benzer büyüklükteki kesit alanlarına sahip olanları sürtünme kaynağı ile birleştirilebilir. Günümüzde yapılan çok sayıdaki araştırmalar sonucunda, sürtünme kaynağı ile birçok basit biçimli parçanın birleştirilmesi imkânı ortaya çıkmıştır. Uygun kumanda teknolojisinin gelişmesiyle, sürtünme kaynağı cihazındaki dönel aynanın istenilen pozisyonda frenlenmesi sayesinde, dönel simetrisi olmayan kesitli parçaların da alın kaynağının yapılabileceği ve meydana gelebilecek açısız çarpımların önlenebileceği ortaya konmuştur [Şahin ve Akata, 2004].

Bazı çalışmalarda, dikdörtgen kesitli yüksek kalite çeliklerinin de kaynağının mümkün olduğu görülmüştür (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri [Çelik, 1997]

Farklı özellikteki malzemelerin birleştirilmeleri endüstride büyük önem arz etmektedir. Sürtünme kaynağı teknikleri, benzer ve benzer olmayan birçok malzeme çifti için son derece uygundur [Dinç, 2006].

Kolaylıkla seri imalata uygulanabilen sürtünme kaynağı, eritme kaynak yöntemlerinin uygulanamadığı malzeme ve malzeme kombinasyonlarında da uygulanabilmektedir. Yapılan araştırmalarda, Titanyum-Çelik, Çelik-Zirkonyum, Zirkonyum-Zirkonyum çiftlerinin kaynağı bile bu yöntemle başarıyla gerçekleştirilmiştir [Otmanbölük, 1997]. Kaynağı zor olan metal çiftlerinin ise genelde kaynak sırasında sıcak gevreklik gösteren çelikler olduğu bilinmektedir (Resim 3.2) [Dinç, 2006].



Resim 3.2. Kaynağı zor olan metal çiftleri

a) Elektrik konektörleri (6061-T6 alüminyum ETP 110 bakıra)

b) Geçiş bağlantıları (304/304L paslanmaz çeliği-2219 alüminyuma)

Çizelge 3.2’de bazı malzeme ve malzeme kombinasyonları için sürtünme kaynağının uygunluğu rahatlıkla görülmektedir.

Çizelge 3.2. Malzemelerin ve malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygunluğu [Tülbentçi ve Yılmaz, 1989; Sulazec, 1990; Anık ve ark., 1993]

	Alüminyum ve alaşımları	Pirinç	Bronz	Sert metal	Kobalt alaşımları	Kolambiyum	Bakır	Bakır-Nikel	Kurşun	Magnezyum alaşımları	Molibden	Nikel alaşımları	Alaşımli çelik	Karbonlu çelik	Otomat çeliği	Maraging çeliği	Çelik (YMK)	Paslanmaz çelik	Takım çelikleri	Tantalyum	Titanyum alaşımları	Tungsten	Otomotiv sübapları	Zirkonyum alaşımları
Alüminyum ve alaşımları	■						■						■	■				■						
Pirinç		■																						
Bronz			■											■										
Sert metal				■															■					
Kobalt alaşımları					■								■	■										
Kolambiyum						■																		
Bakır	■						■							■										■
Bakır-Nikel								■										■						
Kurşun									■															
Magnezyum alaşımları										■														
Molibden											■													
Nikel alaşımları												■	■	■		■		■						
Alaşımli çelik	■				■							■	■	■	■	■		■	■					■
Karbonlu çelik	■		■	■	■		■	■				■	■	■	■	■		■	■					■
Otomat çeliği													■	■	■									
Maraging çeliği												■	■											
Çelik (YMK)																■								
Paslanmaz çelik	■							■				■	■	■				■						
Takım çelikleri				■								■	■						■					
Tantalyum																				■				
Titanyum alaşımları													■	■				■				■		
Tungsten																					■			
Otomotiv sübapları													■	■										
Zirkonyum alaşımları							■																	■

- Uygun
■ Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir
□ Deneyimler yetersiz veya hiç yok

Not: Bazı malzeme ve malzeme kombinasyonlarında sadece belirli deneyimler mevcuttur [Gürleyik, 1989].

3.7. Sürtünme Kaynağı Uygulama Alanları

Sürtünme kaynağı günümüzde birçok dalda uygulama alanı bulmaktadır. Sürtünme kaynağı seri üretime uygun olduğu kadar, tamirat gibi az sayıda parçaların söz konusu olduğu durumlarda da başarıyla kullanılmaktadır.

Sürtünme kaynağının çeşitli endüstrilerde kullanım alanları şunlardır:

Makine imalatı ve hidroelektrik endüstrisinde;

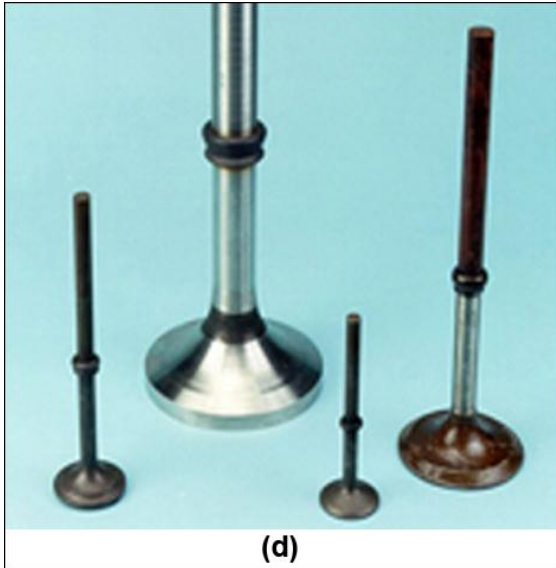
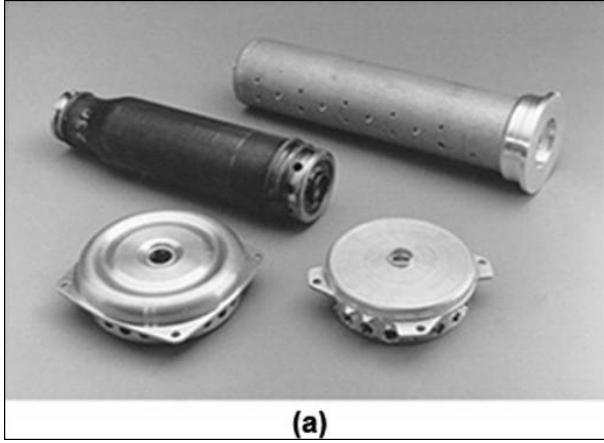
Dişli çarklar, radyal pompalar, piston kolları matkap uçları, hidroelektrik silindirleri, sonsuz vidalı miller, krank milleri, çelik kalemler, delici zimbalar, valfler, rayların kaynatılması, freze bıçakları, iğneler, dişli pompa rotorları petrol araması ve sondaj sektöründe kullanılan boruların birleştirilmesinde [Orhan, 2003].

Kesme ve delme takım endüstrisinde;

Raybalar, matkapların uçları, freze bıçakları, delik zimbaları vb. elemanların imalatında sürtünme kaynağı yöntemi uygulanmaktadır [Çelik, 1997].

Otomotiv endüstrisinde;

Aks milleri, subaplar, dişli-mil parçaları, aks milleri, çatal-mil bağlantıları vb. parçaların imalinde sürtünme kaynağı yöntemi uygulanmaktadır. Aşağıda buna ilişkin örnekler yer almaktadır (Resim 3.3).



Resim 3.3. Otomotiv endüstrisinde sürtünme kaynağı uygulamaları a) Sürücü ve yolcu tarafı otomobil hava yastığı pompaları, b) Kompresör pistonları, c) Gövde montajı, d) Egsoz subapları

Hidrolik endüstrisinde;

Radyal pompa pistonları, hidrolik silindirler, vb. parçaların imalinde sürtünme kaynağı yöntemi kullanılmaktadır (Resim 3.4).



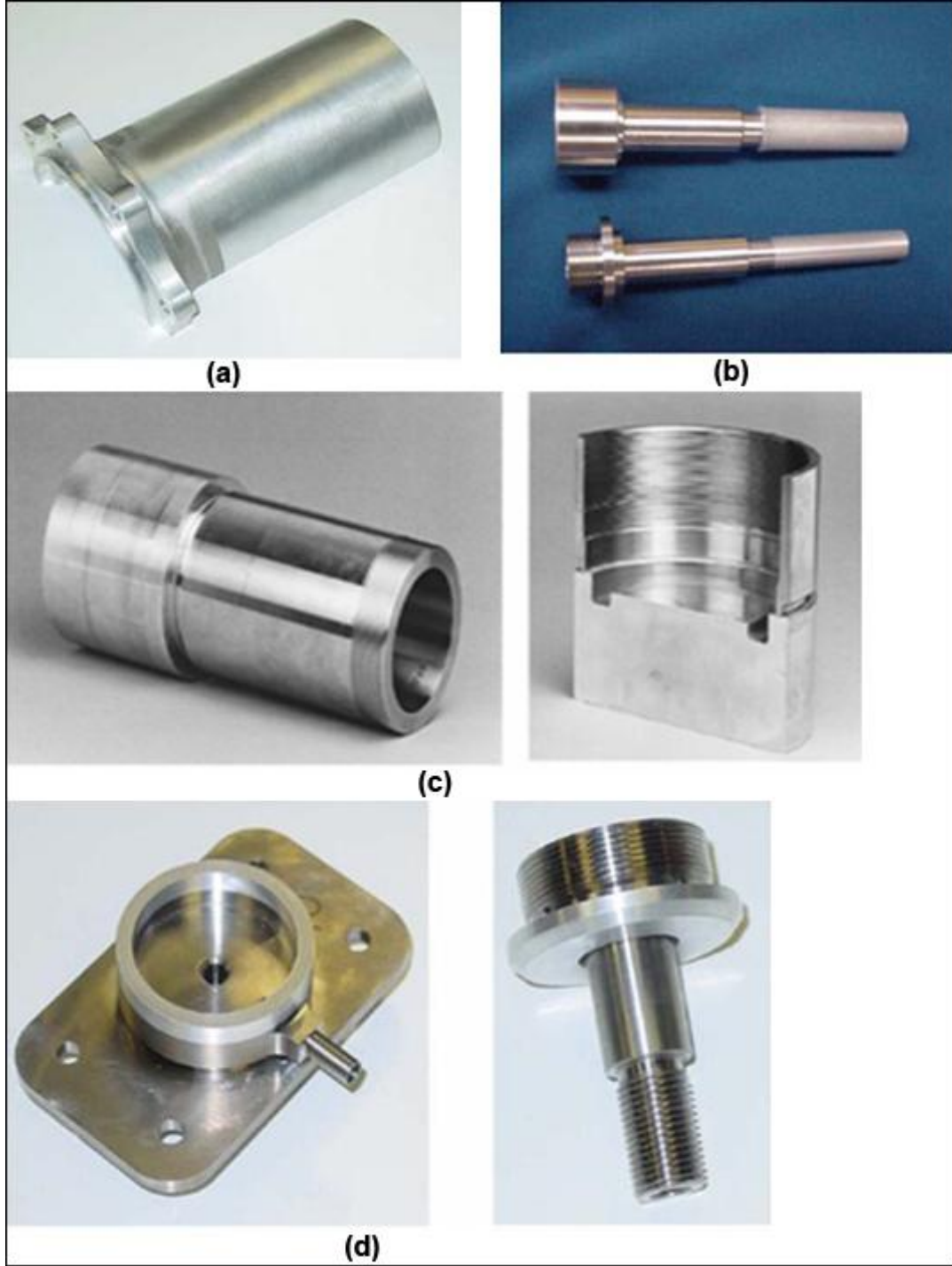
Resim 3.4. Hidrolik silindir

Elektronik ve elektroteknik endüstrisinde;

Sürekli lehim uçları, devre kontakları, kromatograflar için ayırma sütunları, gaz analizleri için alıcı kameralar, röntgen cihazı tüpleri için anod milleri, geçiş parçaları, flanşlar, fittingsler, boru tesisatı bağlantıları vb. parçaların imalinde sürtünme kaynağı uygulanmaktadır [Özlu, 2002; Çelik, 1997].

Havacılık ve uzay endüstrisinde;

Yanma odaları, miller, rotorlar, türbinler, flanşlar, fittingsler, itme jetleri, borular, bağlantı parçaları, vb. malzemelerin yapımında sürtünme kaynağı uygulanmaktadır [Şahin, 2001]. Bu kullanıma ait bazı resimler verilmiştir (Resim 3.5).



Resim 3.5. Havacılık ve uzay endüstrisinde sürtünme kaynağı uygulamaları
a) Ticari helikopter rotor gövdesi-2024 alüminyum, b) MK 48 ateşleyici montajı (304 paslanmaz/6061-T6 Alüminyum) c) Roket yakıt sisteminde kullanılan geçiş bağlantıları, d) Mars Lander basınç depo fittingsleri (6-4 titanyum/6061-T6 alüminyum)

Onarım amaçlı olarak;

Sürtünme kaynağı, yüklenmelerden dolayı aşınmış, plastik deformasyona uğrayarak eğilmiş parçaların atılmasının yerine onların onarılıp çalışır hale getirilmesinde de verimli bir şekilde kullanılmaktadır.

Ayrıca kimya endüstrisinde ve gemi inşaatı sektöründe de sürtünme kaynağı kullanım alanı bulmaktadır [Çelik 1997; Özlü 2002].

3.8. Sürtünme Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Sürtünme kaynağının avantajları aşağıdaki şekilde verilebilir.

- Kullanılan enerji bakımından, diğer kaynak yöntemlerine göre daha tasarrufludur.
- İlave metal kullanılmadığı için, bütün kesitte düzgün bir kaynak kalitesi sağlanabilir.
- Kaynak bölgesi, kir, pas ve oksit içermez.
- Kaynak sonrası oluşan kaynak bölgesinin mukavemeti, birleştirilen malzemelerin dayanımına eşit hatta bazı durumlarda daha fazla olabilir.
- Bilinen kaynak yöntemleriyle birleştirilebilmesi zor olan farklı kompozit malzemeler sürtünme kaynak yöntemiyle kolaylıkla birleştirilebilmektedir.
- Kaynağın yapım aşaması çok kolay ve kaynak yüzeylerinde tam anlamıyla bir birleşme söz konusudur.
- Kaynak parametrelerini kontrol edebilmek basittir.
- Sadece silindirik değil, çok farklı kesitteki malzemelerin kaynağını yapmak mümkündür.
- Kaynak sırası ve sonrası ısı değişikliklerindeki hızlı değişimler, kaynak bölgesinde ince taneli bir yapı oluşumuna sebep olur, buda mukavemeti korur.
- Sürtünme kaynağı sırasında sürtünmenin etkisiyle oksit, yağ gibi yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır.
- Kaynak öncesi ayrıca bir temizleme gerekmez.

- Kaynağın süresi kısa, birleştirilme sıcaklığı düşüktür.
- Isıdan etkilenen bölge dardır.
- Koruyucu bir atmosfere gerek yoktur.

Sürtünme kaynağının dezavantajları aşağıdaki şekilde verilebilir.

- İş parçasının boyutları, sürtünme kaynak makinesinin boyutlarıyla sınırlanmaktadır.
- Kaynak sonrası gevrekleşme söz konusu olabilir.
- Kaynak sonrası parçaların boyunda belirli bir kısalma söz konusu olduğundan, malzeme sarfiyatı söz konusudur.
- Genelde malzeme listesini kendi eksen etrafında dönebilen malzemeler oluşturmaktadır.
- Büyük kesitli parçalarda homojen bir ısıtma söz konusu olmadığından kaynağın yapımı zorlaşmaktadır.
- Sürtünme kaynağı makinesinin ve teçhizatının maliyetleri yüksektir.
- Su verilmiş veya su alınmış malzemelerde mukavemet düşer.
- Özellikle yüksek karbonlu çeliklerde kaynak sonrasında sertleşme söz konusu olur.
- İş parçaları, aksenal yönde basınca, ısıya ve torqa karşı dayanıklı olmalıdırlar [Dinç, 2006].

4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çeşitli kaynak usullerinde genelde rastlanan ve kaynağın kalitesini etkileyen ortak bazı sorunlar vardır. Farklı kristal yapıdaki kompozitlerin kaynak bağlantılarında istenilen dayanımı ve verimliği almak her zaman mümkün olmayabilir. Kaynak sonrası malzemelerde gözlenen gevrek yapılar buna neden olabilmektedir. Bu faz tabakasının kalınlığı ve tane yapısı da kaynak kalitesini etkilemektedir. Bunun yanında oluşan gözenekler, cüruf, iç gerilmeler ve ısı etkisi altında kalan alanın genişliği bu kaliteyi etkileyen faktörlerdendir. Bu noktada günümüzde yaygın olarak endüstride kullanım alanı bulan bir katı hal birleştirme kaynağı olan sürtünme kaynağı önem kazanmaktadır. Bu yöntemle bir problem olarak görülen farklı malzemelerin birleşimi başarıyla gerçekleştirilebilmektedir. Sürtünme ile doğan ısı ve sonrasında ortaya çıkan enerjiden faydalanma fikri çok eskilere dayanmaktadır. Ancak bu enerjiyi bir bağlantı oluşturmak amaçlı kullanma fikri ilk kez 1929 yılında Almanya'da Richter tarafından ortaya konulmuştur, ardından 1942 yılında Klosptock tarafından İngiltere'de kullanılmıştır [Tülbentçi ve Yılmaz, 1989].

Sürtünme kaynağının ticari amaçlı kullanılması fikrine bağlı olarak ilk bilimsel çalışma 1956 yılında Chdikov adlı bir Rus tarafından başlatılmıştır. Bu çalışmalarda iki metal çubuğu sürtünme kaynağı ile belli şartlarda birleştirip buna bağlı patent almıştır [Ertuğ, 1977].

Lucas (1971), bir saniye süre ile dövme basıncının uygulanmasının gerekli olduğunu, yığılma basıncının yüksek tutularak uygulanmasıyla, kısa kaynak sürelerinin kaynak bölgesini olumlu etkilediğini izlemiştir [Lucas, 1971].

Duffin ve Crossland (1971), düşük karbonlu çelikler için yüksek yığılma basınçları ve düşük kaynak sürelerinin malzemede daha ince taneli bir yapı oluşumuna sebep olduğunu görmüşlerdir [Duffin ve Crossland, 1971].

Jenning (1971), 19 mm çaplı Cr-Mo/Cr çelik çiftine kaynaktan önce ısıl işlemler uygulamış ve farklı kaynak parametrelerinde kaynak işlemlerini yapmıştır. Daha

sonra bu parçaları bir dizi çekme, yorulma ve eğme deneylerine tabi tutup mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çekme deneylerinde bütün kopmalar kaynak bölgesi dışında olmuştur. Bu da ısıl işlemin çekme dayanımına olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Kullanılan kaynak parametrelerinden sürtünme basıncı ve yığma basıncının düşük seçilmesi en iyi çekme özelliklerini vermiştir [Jenning, 1971].

Sereign ve Sabantsev (1975), 14,1 mm çaplı kaynak öncesi çeşitli derecelerde deformasyona uğramış St 20 çeliklerini kullanarak, diğer parametreler sabit kalmak şartıyla, $n = 1200-1400$ dv/dk gibi iki ayrı dönme hızında elde edilen sürtünme kaynaklı bağlantılara çentik darbe deneyi uygulamışlardır. Bu deneylerin sonucunda dönme hızının yüksek seçilmesi dayanımı arttırmıştır [Sereign ve Sabantsev, 1975].

Alüminyum ile bakırın, daha önce yapılan sürtünme kaynağı araştırmalarında görüldüğü gibi, kesiti yaklaşık olarak 500 mm^2 'ye kadar olan bağlantılarda dayanım değerleri, alüminyumun ana malzeme dayanımı ile sınırlı bulunmaktadır. Gürleyik (1988), 7800 mm^2 'ye kadar olan oldukça geniş kesitlerinde, sürtünme kaynağı ile birleştirebileceğini göstermiştir. Kaynak dikişinin yüksek dayanım ve elastizitesi, birleşme bölgesinde oluşan metaller arası fazlı difüzyon tabakası kalınlığının $2\mu\text{m}$ 'den daha az olması ile ilgili olduğunu açıklamıştır. Alüminyum ile bakırın sürtünme kaynağındaki mekanik özelliklerin, difüzyon tabakasının genişliğine bağlı olduğunu, bu bağlantıların, yüksek sıcaklıklarda yapılışında ise, ara tabaka genişliğinin, sınır değerleri aşmamasına dikkat edilmesini savunmuştur [Gürleyik, 1988].

Grünauer, (1989), sürtünme kaynağı ile, basınçlı döküm yapılmış alüminyum (G-AISi7Mg) ile preslenmiş alüminyum çubuk (AlZnMgCu 0.5) malzemeyi birleştirmiştir. Yapılan bir dizi deneyden sonra döküm borunun içyapı oluşumunun çok düzgün ve ince olduğunu, kesitte büyük ötektik yapıların az olduğunu gözlemlemiştir. Birleşim bölgesine bağlı olmayan, bazı ince porlar oluşmuştur. AlZnMgCu-0.5 borusunun başlangıçtaki içyapısı yeniden kristalize olmakta ve az sayıda deforme olmuş taneler görülmüştür. Yapılmış olan deneyler, döküm

alüminyum parçalarında sürtünme kaynağı ile birleştirilebileceğini göstermiştir [Grünauer, 1989].

Tanicheva (1989), kaynak bölgelerinden kırılan takım çeliklerinin yüzeyinde görülen hatayı ortadan kaldırmak için, sıcaklığın, buna paralel olarak sürtünme basıncının yüksek olması gerektiğini savunmuştur [Tanicheva, 1989].

Yılmaz ve ark. (1995), deney malzemesi olarak 11.5 mm çapında, C45 alaşımsız ve HS 6-5-2 yüksek hız çeliği çubuklar kullanmıştır. Deney parçalarının büyük bir bölümü, endüstriyel bir sürtünme kaynak makinesinde değişik kaynak parametreleri kullanılarak; diğer bir bölümü ise, endüstriyel bir yakma alın kaynak makinesinde sabit kaynak parametreleri kullanarak C45 tarafına farklı ön tav sıcaklıkları verilerek kaynak edilmişlerdir. Tüm bağlantılar, kaynaktan sonra fırın içinde 650 °C'de 4 saat süre ile tavllanmışlardır. Kaynaklı bağlantıların tümünde çubuk eksenini boyunca sertlik değişimleri ölçülmüş, kaynak bölgeleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş, değişimleri ölçülmüş, yapılan EDX ve WDX analizleri ile karbon ve ana alaşım elementleri olan Cr, W, V ve Mo'nin kaynak bölgesindeki difüzyonları ve metalürjik içyapıya etkileri incelenmiştir. Bu incelemelerin ardından yakma alın kaynaklı bağlantılarda, yüksek hız çeliğinden olan malzeme kaybını azaltmak amacı ile uygulanan ön ısıtma sıcaklığı 1 mm gibi çok az bir malzeme kazancı sağlarken, ek işlemler ve artan kaynak süresi yanında kaynak bölgesinin genişlemesine ve ara bölgedeki sertlik farkının artmasına neden olduğu sonuçlarına varılmıştır. WDX analizi ile elde edilen karbon profili ve aynı bölgedeki sertlik profili aynı karakteristikteki eğrilerdir. Karbon profilinde, C45 tarafında gözlenen karbon düşüşü ve yüksek hız çeliği tarafında gözlenen karbon artışı, C45 tarafından yüksek hız çeliği tarafına bir karbon göçü olduğunu açıkça göstermiştir. Bu karbon yapıda bulunan Cr ile birleşerek karbür çökeltileri oluşturmuştur. Kaynaklı bağlantının hemen C45 tarafında gözlenen sertlik düşüşü, saf ferrite yakın dekarbürize bölgeden kaynaklanmıştır. Kaynak sonrası sürtünme kaynaklı bağlantılarda da uygulanan ve tavlama sonrası martenzit ve artık östenite rastlanılmayan, 650 °C'deki 4 saat süre ile tavlama yakma alın kaynaklı bağlantılarda yeterli olmamıştır. Bu da yakma alın

kaynağında ısı girdisinin çok daha fazla olduğunu göstermiştir [Yılmaz ve ark., 1995].

Kurban ve Kahraman (1995), farklı özellikteki H2210 ve St42 çelik malzemelerin sürtünme kaynağı ile birleştirmeleri sağlanmış ve devir sayısı, kaynak süresi, yükleme basıncı ile kaynak basıncının kaynaklı parçaların dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır [Kurban ve Kahraman, 1995].

Kahraman ve ark. (1995), ergime sıcaklıkları farklı H2210 çeliği ve alüminyumun sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi imkânlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel esnasında kaynak parametreleriyle oynanarak bu parametrelerin kaynak dikişine etkilerini incelemişlerdir. Kaynak sırasında farklı ergime bölgelerinin oluştuğunu saptamışlardır. Bunun sebebinin kaynak metallerinin farklı ısıl özelliklerinin olduğunu düşünmüşlerdir. Ayrıca kaynak metallerinin mikro yapıları ve mekanik özellikleri inceleyerek kaynak dikişinin mukavemetinin alüminyumunkinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir [Kahraman ve ark., 1995].

Kato ve ark. (1996) normalize edilmiş sürtünme kaynaklı bağlantılara farklı sıcaklıklarda bir dizi deney uygulamışlardır. Bu araştırmaya göre, normalize edilmiş kaynaklı bağlantının yutma enerjisi, normalize edilmemiş göre oldukça fazladır, normalize edilmiş bağlantıda yaklaşık 24 °C olan enerji geçiş sıcaklığı, kırılma yüzeyindeki sıcaklık ile uyum içersindedir. Normalize edilmiş bağlantının geçiş bölgesindeki çatlak ilerleme dayanımı, normalize edilmemiş olana göre fazladır. Ayrıca normalize edilmiş kaynaklı bağlantının darbe eğilme mukavemeti, sıcak çekilmiş ana metalinkine yakındır [Kato ve ark., 1996].

Şahin ve ark. (1996), Al-Al, Al-Çelik ve Çelik-Çelik malzeme çiftlerini sürtünme kaynağı ile birleştirilmeleri sonucunda oluşan durumlar kıyaslanmıştır. Kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık değişimi modellenmiş, kaynak yeri çekme testleri ve mikro sertlik ölçümleri yapılmış, ısı tesiri altındaki bölgedeki metalürjik değişiklikler SEM ile incelenmiş, yüzeydeki sıcaklık artışı hesabı yapılmıştır. Kaynak kalitesinden etkilenen parametreler, istatistiksel analizle tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlara

göre; kaynak parametrelerinin karşılıklı etkisi akma, çekme ve kırılma mukavemetini değiştirmekte, alüminyum parçadaki ITAB'ın, Al – Çelik kaynaklı bağlantılarında daha geniş olduğunu ortaya koymuşlardır [Şahin ve ark., 1996].

Chen ve ark. (1998), 14 mm çapında SAE 1045'in karbon çeliği, C-4A-1 marka mantıklı programlanabilir bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak ara yüzeyinde oluşan derin olmayan çentikler CTS-220 A adlı ultrasonik kusur ölçerle teste tabi tutulmuştur. Bu araştırmada kullanılan algoritma yöntemiyle tüm kusurlar belirlenememiştir. Zayıf yapışma bölgesi % 4,8'den küçük olduğunda malzemenin mekanik özelliklerini etkilemediği gözlenmiştir [Chen ve ark., 1998].

Farklı metaller arasındaki sürtünme kaynağı ile ilgili olarak yapılan FEM çalışmalarının sayısı sınırlıdır. Bu konuda önemli kaynaklardan biri, farklı kaynaklardan dolayı oluşan ısı dağılımının hesaplanması için sayısal simülasyonların sonuçlarını sunmuş olan Balasubramanian'dır. Yapılan bu çalışma sadece ısı hesabını içermektedir. Alvisse ve arkadaşları (2002), malzemelerin sürtünme kaynağıyla gerçekleşen temasında, deneysel olarak onaylanmış etkili bir sayısal malzeme modelini denemişlerdir. Sürtünme kanunu ve parametreleriyle ilgili sonuca varabilmek için orijinal bir yöntem kullanılmış ve önemi anlatılmıştır. Sonuçta çıkan artık gerilme değerleri, endüstriyel kaynak kalitesini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan bu çalışmada kaynak sonrası oluşan saçağın nasıl olabileceği bile yüksek bir doğruluk derecesiyle önceden belirlenmiştir [Alvisse ve ark., 2002].

Ateş (2003), ferritik süper alaşımların sürtünme kaynağı ile kaynaklanabilirliklerini araştırmıştır. Kaynak işlemleri değişik sürtünme, yığılma basınçları ve sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiş, optik ve tarama elektron mikroskopları ile mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda en iyi kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Yılmaz ve ark. (2003), Al/Çelik numunelerin sürtünme kaynağıyla birleştirilmeleri sırasında oluşan demir dışı fazların birleşmeyi etkilediğinden bahsetmişlerdir. Bu ara

fazlar, FeAl, FeAl₂, FeAl₅ ve FeAl₃ olup, bunlar yüksek ısılara kadar malzeme ara yüzeylerinde sabit kalırlar. Bu ara tabakaların çok ince veya çok kalın olması birleşmeyi olumsuz olarak etkiler. İdeal olan bu faz oluşumunun etkisini ortadan kaldırabilmektir. Bununda sürtünme kaynağı yapılacak malzemelerin arasında doğru seçilmiş bir ara katman kullanmakla olabileceğini ileri sürmüşlerdir [Yılmaz ve ark., 2003].

Özdemir ve Orhan (2004), termomekanik işlemlerle tane boyutu küçültülmüş süperplastik haldeki ötektoid üstü çelik çifti, farklı işlem kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde birleştirilmiştir. Kaynak sonrası elde edilen mikroyapı ve mikro sertlik analizi sonuçlarından, bütün kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikte önemli farklılıklar gözlenmemekle beraber, numunelerde yaklaşık 200-500 µm genişliğindeki aşırı deformasyona uğramış bölge ve bu bölgenin bitişiğinde yine basıncın etkisiyle dövülmüş, taneler arasında plastik deformasyon etkisinin açıkça görüldüğü iki bölgenin varlığı tespit edilmiştir. Bu iki bölgede meydana gelen mikroyapısal bozunum ve plastik deformasyon miktarındaki değişim üzerinde, devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığılma basıncının önemli derecede etkili oldukları gözlenmiştir [Özdemir ve Orhan, 2004].

Şahin (2004), aynı boyda ama farklı çaplardaki silindirik AISI 1040 numuneleri sürtünme kaynağı ile birleştirerek ek yerlerini incelemiştir. Araştırmaları sırasında, çapsal oranlardaki artışın kaynak mukavemetini olumsuz etkilediğini görmüştür. Bu etkiler, kaynak süresince kaynak elemanları arasındaki artan çap oranı ile artan ısı kaybının negatif sonuçları olarak söylenebilir. Bununla birlikte ısı kaybı kaynak elemanlarının yüzey bölgeleri ve ısı yığılması ile ilgilidir [Şahin, 2004].

Silva ve ark. (2004), Ti-6Al-4V + % 10 TiC malzemesinin sürtünme kaynağının birleşme noktalarındaki metalürjik ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda ek yerlerindeki gerilme dayanımı, düşük dönme hızı ve basınçtan yararlanılarak iyileştirilmiştir. Bu şekilde iyi gerilme değerlerine sahip olan sürtünme kaynaklı Ti-6Al-4V + % 10 TiC malzemeleri geniş bir kullanım alanına

sahiptir. Dönme hızı ve basınç yüksek seçildiğinde daha geniş ve ince dönüşmüş bölgelere rastlanmıştır [Silva ve ark., 2004].

Lee ve ark. (2004), TiAl alaşımını ve AISI 4140'ı ara metal kullanarak sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirmişlerdir. Bu malzemelerin direkt olarak birleştirilmesi sırasında gevrek reaksiyon ürünlerinden dolayı ara yüzeyde çatlaklar gözlenmiş, TiAl'da martenzit yapıya dönüşen alanın giderek genişlediği izlenmiştir. Bu dönüşümü önlemek için, saf bakır ara metal olarak kullanılmıştır. Sıcaklıkta etkilenen bölgenin genişliğini en aza indirmek için kullanılan bakır AISI 4140 tarafında uygulanmıştır. Diğer kaynak yöntemlerine göre daha yüksek gerilim gücü değerlerine ulaşılmıştır. Ara metal olarak saf bakırın kullanılmasıyla sürtünme kaynağı bağlantılarında daha iyi sonuçlar alınmıştır [Lee ve ark., 2004].

Bayındır ve Ateş (2005), bir sürtünme kaynak makinesi için değişik kontrol metotlarının karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada, geleneksel otomatik kontrol, PLC ve PIC kontrol ile kaynak parametreleri uygulanmış ve elde edilen kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Hasçalık ve Orhan (2005), Al 6061 alaşımı ile güçlendirilmiş Al_2O_3 ile SAE 1020 çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğini araştırmışlardır. Bu araştırmanın sonucunda bunun mümkün olduğunu göstermişlerdir. Sürtünme kaynağı ek yerlerinin mikro yapı değerlendirmesinin sonunda, temel bileşik materyal, bileşik tarafında oksit parçalı, SAE 1020'de plastik deformasyona uğramış ve temel SAE 1020 çeliği olmak üzere dört farklı bölgeye ortaya çıkmıştır. Oksit parçalanması, ek yerinin bileşik tarafında oluşmuş ve parçalanma miktarının Al_2O_3 zerrelere göre arttığı saptanmıştır [Hasçalık ve Orhan, 2005].

Ateş ve ark. (2007), sürtünme basıncının MA956 demir esaslı süper alaşımın özelliklerine etkisinin araştırılması için değişik parametrelerde birleştirmeler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada iri uzun taneler ve girintili çıkıntılı tane sınırlarının bozulmadan kaynaklı birleştirme sonunda da aynı kaldığı görülmüştür.

Taşkın ve ark. (2005), AISI 430 ve AISI 1010 çelik çifti, 40 MPa yığılma basıncı, 6 sn lik sürtünme, 8 sn'lik yığılma sürelerinde, 2000 ve 2200 dv/dk'lık dönme hızlarında, 25 ve 35 MPa'lık farklı sürtünme basıncı kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde birleştirilmiştir. Mikroyapı ve mikro sertlik analizi sonuçlarından, bütün kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikte önemli farklılıklar gözlenmemekle beraber, devir sayısının artmasıyla ITAB'ın genişlediği ve aşırı deformasyona uğramış bölgede sertlik azalması görülmüştür. Ancak, artan devir sayısına paralel olarak birleşme ara yüzeyinde ulaşılan sıcaklığın artması ile birlikte, viskoz haldeki malzemenin dışarı taşma miktarında artış kaydedilmiş olup, aşırı deformasyona uğramış bölgenin daraldığı görülmüştür [Taşkın ve ark., 2005].

Şahin (2006), AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynağı üzerine yaptığı çalışmada şu sonuçlara varmıştır; paslanmaz çeliklerin birleşme noktalarındaki gerilme dayanımı, sürtünme zamanı ve basıncın artmasıyla artar. Belli bir değerde maksimuma gelir ama sürtünme zamanı ve basınç artmaya devam ederse gerilme dayanımı düşmeye başlar. Elde edilen bu maksimum gerilme dayanımı esas metalin gerilme dayanımının % 96'sı kadardır. Ek yerlerinin yorulma dayanımı da gerilme dayanımı özellikleriyle yakın davranışlar gösterir. Çentik etki dayanımı, ana metal olan AISI 304'ün yaklaşık iki katıdır. Kaynak yerleri statik ve dinamik yüklere kolaylıkla karşı koyabilir. Sertlik değişimlerine ve mikroyapılara bakıldığında AISI 304'ün ek yerlerinin kaynaklı bölgesinde önemli bir sertleştirme etkisi olmadığı görülmüştür [Şahin, 2006].

Bayındır ve Ateş (2007), sürtünme kaynak makinesi için bilgisayar temelli yeni bir kontrol ünitesi ve diğer çalışmalarında ise [Bayındır ve Ateş 2007] düşük maliyetli yüksek duyarlılıklı mikro kontrol temelli kontrol ünitesi uygulamak suretiyle kaynaklı birleştirme işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu şekilde kaynak parametrelerinin daha hassas uygulanması sağlanmıştır.

5. ÇELİKLER

Çelik, içerisinde % 2'ye kadar karbon bulunduran bir demir – karbon (Fe-C) alaşımıdır. İçeriğinde karbondan başka, farklı oranlarda alaşım elementleri ve empürite (saf olmayan, kirlilik yaratan) elementler bulunur. Çeliğe farklı özellikler kazandıran, içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler yapılarak (ıslah, normalizasyon vs.) çeliğin içyapısı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik üretilebilir.

Manganez (Mn), Fosfor (P), Kükürt (S) ve Silisyum (Si) üretim sırasında hammaddeden kaynaklanan elementler olup, çelik bünyesinde belirli oranlarda bulunur. Diğer elementler ise (Cr, Ni v.b.) ferro-alyajlar halinde istenilen miktarlarda çelik bünyesine ilave edilir.

Çelik demir cevherinden veya hurdadan geri dönüşüm ile iki şekilde üretilmektedir. Sıvı çelik üretildikten sonra döküm ile ingot olarak veya sürekli döküm yöntemi ile kütük veya blum olarak şekillendirilir.

Vasıflı çelikler alaşımsız, düşük alaşımlı ve alaşımlı çelikler olup, kitlesel olarak üretilen çeliklerden bazı noktalarda ayrılmaktadır. Bu noktalar;

- Üretim yöntemi,
- Üretim araçları,
- Alt limitlerde bulunan S, P ve diğer empüriteler ile çözülmüş gaz miktarları.

Çelikler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır;

- Karbon ve alaşımlı çelik olarak bileşimlerine göre,
- Üretim yöntemlerine göre,
- Son üretim yöntemine göre,
- Ürün şekline göre,

- Kullanım yerleri, üretim programları ve deoksidasyon durumlarına göre

Çeliklerin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Çeliklerin büyük çoğunluğu ısıtılma işlemlere karşı duyarlıdır. Kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısıtılma işlemler sonucunda istenen sertlik, mekanik ve fiziksel özellik, elektriksel özellik, korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanım özelliklerine tam olarak kavuşturulabilir.
- Çelikler yapılarının gerektirdiği sıcaklıklara kadar ısıtıldıklarında şekillenme özelliğine kavuşur (haddeleme, presleme, dövme).
- Ayrıca kimyasal bileşim ve içyapı olarak uygun olan çelikler haddeleme, presleme gibi yöntemlerle soğuk olarak da şekillendirilebilir.
- Talaş kaldırıcı tezgâhlarda işlenerek, istenilen şekil ve yüzey düzgünlüğüne getirilebilir.
- Kimyasal bileşim olarak uygun olan çelikler kaynak işlemi ile birleştirilebilir.
- Çeliklerin büyük bir bölümü çeşitli yöntemler ile metal ile kaplanmaya, emaye yapılmaya, boyanmaya ve plastik maddeler ile kaplanmaya elverişlidir.

5.1. Genel Yapı Çelikleri

Türkiye 16 472 000 ton'luk çelik üretimi ile dünya çelik üretiminde 13. sıradadır. Türkiye 2002 yılındaki 16 472 000 tonluk üretiminin 9 337 009 tonunu ihraç etmiştir. Buna karşılık çoğunluğu (% 85) yassı ürünler olmak üzere 5 446 879 ton çelik de ithal etmiştir. Genel yapı çelikleri toplam çelik üretimi içinde en büyük paya sahiptirler. Genel yapı çeliklerinin kullanımının bu derece fazla olması bu çeliklerin standartlarına da büyük bir itina gerektirmektedir. Genel yapı çeliklerinin belirlendiği Avrupa Standardı EN 10025 ile ilgili son değişiklik Aralık 2000'de yayınlanmıştır. 2000 civarındaki çelik içinde en çok kullanılanları olan bu yapı çeliklerine ve bir bakıma da her derde deva oldukları için "genel yapı çelikleri" denilmiştir. Bunlar tarihi gelişimlerinde, EN 10025 standardının ilk şeklini aldığı Mart 1990'da en köklü değişimlerine uğramışlar ve başta kısa gösterimleri olmak üzere büyük ölçüde değişmişlerdir. Özellikle çekme dayanımlarını esas alan kısa gösterimler yerine

mukavemet hesaplarında daha çok kullanılan akma sınırlarını esas alan kısa gösterimler kullanılmıştır.

Genel yapı çeliği, çekme dayanımı ve akma sınırı ile tanımlanan ancak biçimlendirme (ısıtıl işlem uygulanmamış) suretiyle yapılan ve normalleştirme tavı uygulanmış veya uygulanmamış durumdaki alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerdir. Burada üst yapı, yol, kanal, köprü vb. inşaat işlerinde kullanılan yukarıda verilen tanıma uygun şekilde imal edilen çelik profiller, çubuklar, teller, levhalar, şeritler, kalın ve orta kalınlıktaki sac malzemeler ile yarı mamul ve dökme parçaların yapımında kullanılan çelikler ele alınmaktadır. Muayene ve deneyleri TS 2162'ye göre yapılır.

Çizelge 5.1. Genel yapı çelikleri kalite denklik tablosu

Yapı Çeliği Kalite Denklik Tablosu								
Malzeme No	DIN	SAE/AISI	AFNOR	UNI	BS	JIS	EN	GOST
1.0038	St37-2, S235JRG2		E24- 2NE	Fe 360 B	Fe 3610B			St3ps
1.0570	St52-3, S355JO, S355J2G3		E36-3, E36-4	Fe 510 B, C, D	Fe510 D 1 FF	SM490 A, B, C		17GS
1.0060	St60-2, E335	A572Gr-65	A 60-2	Fe 60-2	Fe 590-2FN	SM 570		St6ps
1.0070	St 70-2		A 70-2	Fe 70-2	Fe 690-2FN			St0
1.1170	28Mn6	1330	20M5	C28Mn	150M19	SCMn1	28Mn6	30G
1.1231	Ck67	1070	XC68	C70	060A67	S70C	2C67	65G
1.0035	St 34-2		A33	Fe 320	Fe 310-0			
1.0144	St 44-3	A573Gr-70	E 28-3	Fe430B, Fe 430C	Fe 430 D1FF	SM 400 A, B, C		St4kp

5.1.1. Genel yapı çeliklerinin sınıflandırılması

Genel yapı çelikleri minimum çekme dayanımlarına göre Fe 33, Fe 34, Fe 37, Fe 42, Fe 46, Fe 50, Fe 52, Fe 60 ve Fe 70 olmak üzere dokuz sınıfa ayrılırlar. Kimyasal bileşim, işleme kırılma dayanım ve kaynak edinebilme yetenekleri bakımından ise üçe ayrılırlar.

Kalite 1: Genel amaçlar için kullanılan çeliktir.(Fe 37-1 gibi)

Kalite 2: Sınırlı amaçlar için kullanılan çeliktir.(Fe 37-2 gibi)

Kalite 3: Özel amaçlar için kullanılan çeliktir. (Fe 37-3 gibi)

Özellikler

- a) Kimyasal Özellikler
- b) Mekanik Özellikler
- c) Yapılış Özellikleri:

Yapılış Özellikleri

Genel yapı çelikleri genellikle, sıcak haddelenerek veya sıcak dövülerek yapılır. Kalite-1 çeliklerin üretim yönteminin saptanmasında yapımcı serbesttir ve önceden belirtilmemiş ise, Kalite-2 ve Kalite-3 çeliklerinin üretiminde de yapımcı serbesttir. Ancak istendiğinde yapımcı üretim yöntemini bildirmek zorundadır. Sac ve levhalara uygulanacak ısı işlemleri önceden belirtilmelidir (sıcak biçimlendirilmiş veya normalleştirme tavı uygulanmış gibi).

Genel yapı çeliklerinin tercih edilmesindeki temel özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Görünüş
- Biçimlenebilirlik
- Kenar bükme yeteneği
- Çubuk çekmeye uygunluk
- Kalıpta dövmeye uygunluk
- Dikişli boru yapımı
- Gevrek kırınlığa dayanım
- Kaynak edilebilme

5.2. Paslanmaz Çelikler ve Türleri

Günümüz endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çelikler esas itibari ile demir, karbon ve çoğu zamanda nikel içeren alaşımlar olup başlıca

özelliklerini kroma borçludurlar. Demir alaşımlarının korozyon dayanımlarını arttırmak için geliştirilmiş bir türü olan paslanmaz çeliklerin, uygulama alanlarının her geçen gün artarak devam etmesinin temel nedeni korozif ortamlarda, mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleridir. Paslanmaz çeliğin paslanmazlık özelliğine sahip olabilmesi için en az % 12 Cr içermesi gerekir [Develi, 2003].

Doğada yalnızca altın ve platin gibi metaller saf halde bulunur, normal metallerse diğer elementlerle bileşmiştir. Paslanma, bu yüzden doğal bir olaydır. Doğada demir cevheri şeklinde bulunan demir, bu yüzden dengesizdir ve paslanmak ister. Paslanmak saf demirin suyun mevcudiyetinde oksijenle birleşmesidir. Herhangi bir koruyucu kaplamaya sahip olmayan karbon çeliği üzerinde bir pas katmanı oluşur ve çeliğin kalan kısmını korur. Yüzeydeki pas katmanının alınması durumunda yeni bir pas katmanı oluşur. Bu durum paslanma olarak adlandırılır. Boyama, çinko kaplama (galvanizleme), epoksi reçinelerle yapılan çeşitli kaplamalar paslanma sürecini geciktirir veya durdurur.

Paslanmaz çelikteki kromun oksijene büyük bir yakınlığı vardır. Krom oksijenle karşılaştığında çeliğin yüzeyinde moleküler düzeyde bir krom oksit filmi oluşur. Bu filmin kalınlığı 130 Angstrom'dur. Bu durum, büyük bir binayı, mektup kağıdı kalınlığındaki çatı sacıyla yağmurdan korumak gibi bir şeydir [Kayır, 2003].

Demir bazlı alaşımlarda ve diğer teknolojik olarak önemli alaşımlarda ortak özellik hem çözücü hem de çözen atomların oksitlenmesidir. Wagner, alaşımların oksitlenmesini iki kategoride incelemiştir:

- 1) Soylu (değişiklik göstermeyen elementler, Pt, Ag ve Au gibi) ana element ile alaşım elementi (Pt-Ni gibi)
- 2) Soylu olmayan ana element ile soylu olmayan alaşım elementleri. Fe bazlı alaşımlar, Fe-Cr, Fe-Si, Fe-Cr-Al, Fe-Ni-Cr ve Fe-Cu alaşımları, bu ikinci kategoriye girmektedirler.

Koruyucu tabaka oluşturma amacı alaşımı, özellikle yüksek sıcaklıklarda, oksidasyona karşı korumaktır. Koruyucu tabakadan istenilen özellikler istenilen sıcaklık ve oksijen kısmi basınçlarında kararlı olması, çok yavaş büyümesi, yani düşük parabolik hızlara sahip olmalarıdır, bunu sağlayan oksitler, SiO_2 , Cr_2O_3 ve Al_2O_3 dir [Sarıoğlu, 2001].

Paslanmaz çelikler son yılların keşfi değildir. Faraday 1822 yılında, demir içine krom katıldığında atmosferik oksidasyona karşı oldukça dayanıklı bir alaşım oluştuğunu göstermiştir. 1838 yılında Mallet kromlu çeliklerin bazı ortamlarda korozyona dayanıklı özellik gösterdiğini keşfetmiştir. 19. asrın sonuna kadar kromlu çelikler yalnızca sıcak sülfürik asit kapları için kullanılmıştır. 1904 yılında Monnartz krom ilave edilmiş çeliklerin oksitleyici ortamlarda pasifleşme özelliğinin daha belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur. Bu metallerin korozyon dayanıklılığının metal yüzeyinde oluşan pasif tabakadan ileri geldiğini ispatlamıştır. Fakat pasif filmin oluşması alaşımların her ortamda korozyona karşı dirençli olabilmeleri için yeterli değildir. Paslanmaz çelikleri ortama daha dirençli kılmak için yollarından birisi krom, nikel gibi ana alaşım elementlerinin oranını arttırmak, karbon içeriğini azaltmaktır [Kahraman ve ark., 2002].

Çizelge 5.2. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler

Fiziksel özellikler	Östenitik paslanmaz çelikler	Ferritik paslanmaz çelikler	Martenzitik paslanmaz çelikler	Çökelme ile sertleşebilen paslanmaz çelikler
Elastisite modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm^3)	8,0	7,8	7,8	7,8
Isıl genleşme katsayısı ($\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$)	16,6	10,4	10,3	10,8
Isıl iletkenlik (W/mk)	15,7	25,1	24,2	22,3
Özgül ısı ($\text{J/k }^\circ\text{K}$)	500	460	460	460

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilebilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile ilave olumlu etkiler sağlanabilir. Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler (Şekil 5.1).

Paslanmaz çelikler beş ana grupta toplanırlar:

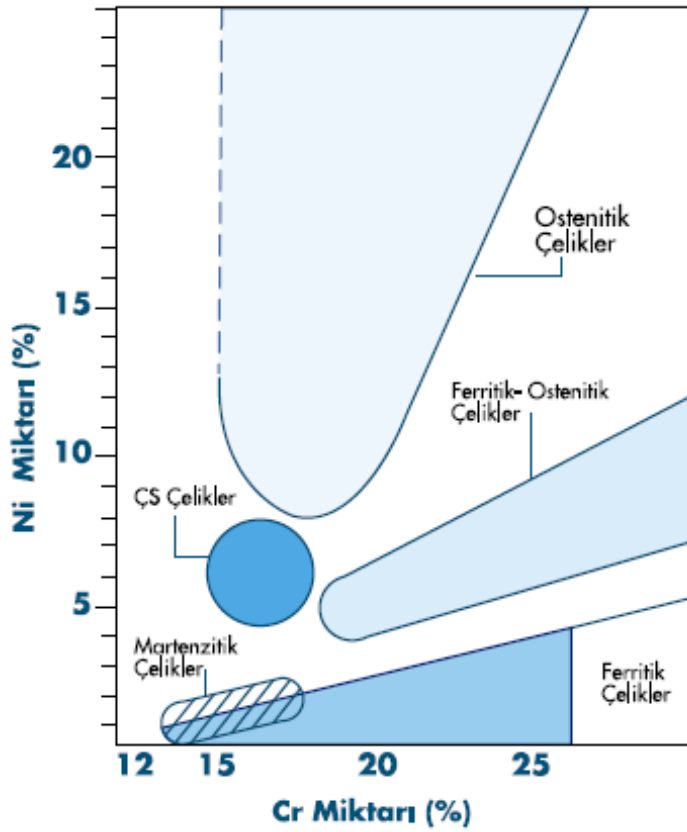
- 1) Ferritik paslanmaz çelikler
- 2) Östenitik paslanmaz çelikler
- 3) Martenzitik paslanmaz çelikler
- 4) Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler
- 5) Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler [Aran ve Temel, 2004].

5.2.1. Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, içeriğindeki alaşım elementlerinin özellikle karbonun miktarına bağlı olarak % 16-30 Cr içerirler, manyetikler, soğuk veya sıcak olarak haddelenebilirler [Develi, 2003].

Ferritik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ferrit yapıdadır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında manyetik ve bu özelliklerini Curie sıcaklığına (768 °C) kadar korurlar. Bu gruptaki paslanmaz çelikler %12-30 Cr içerir. Nikel ihtiva etmezler. Ayrıca karbon oranı %0,02 ile 0,12 gibi çok düşük değerdedir. %12 Cr'lu ferritik paslanmaz çelikler; düşük maliyette üretim ve iyi korozyon direnci sağlar. Bu çeliklerde ferriti tamamen kararlı hale getirebilmek için yeterli miktarda krom ve diğer alaşım elementlerine ihtiyaç vardır. γ (Gama) bölgesini genişlettiği düşünülen karbonun çok düşük oranlarda tutulması gerekir. Bu sayede yüksek tokluk ve çekilebilirlik korunurken, östenit dönüşümü de engellenmiş olur. Isıl işlem görmüş paslanmaz

çelikler çok taneli ve tek fazlı bir mikroyapıya sahiptir. Çekilebilirliğe ve tokluğa etki eden zararlı fazların oluşumunu engellemek için alaşımlandırılmış ferritik tanelerin yüksek sıcaklıkta (1100 °C'de) homojenleştirme ısıl işlemi gördükten sonra hızlı soğutulmaları gerekir [Korkut, 1997]. Şekil 5.1.'de değişik paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları verilmiştir.



Şekil 5.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları (ÇS: Çökeltilme sertleşmesi uygulanabilen) [Aran ve Temel, 2004].

Krom oranı %20'den daha fazla olan ferritik paslanmaz çelikler 550 °C ve 850 °C arasındaki sıcaklıklarda uzun süre tavlandıklarında sigma (σ) fazı oluşur. Yüksek sıcaklıktaki uygulama sırasında ortaya çıkan bu durum, çeliğin sertliğini artırdığı için bazen yararlı olabilir, ancak gevreklemeye neden olduğu ve korozyon direncini azalttığı için genellikle istenmez [Develi, 2003].

Ferrit numaraları, özellikle düşük seviyelerde, ferrit yüzdeleri ile yakın değerlere sahiptir. Günümüzde en sık kullanılan ve en sağlıklı sonucu veren diyagram Şekil 5.5'de belirtilen WCR-1992 Diyagramı'dır. ASME şartnamelerinin 1994-1995 kış döneminde yayınlanan eklerinde WCR-1992 Diyagramı WCR-De Long Diyagramı'nın yerini almıştır. Kabul edilen bu en son diyagramda krom ve nikel eşdeğerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$(Cr)_{eş} = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb \quad (2.4)$$

$$(Ni)_{eş} = \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0,25\%Cu \quad (2.5)$$

Görüldüğü gibi nikel ve krom eşdeğerleri Schaeffler ve WCR-DeLong Diyagram'larındakinden daha farklı olarak hesaplanmaktadır. Ferrit numarası diyagramın nikel eşdeğerini gösteren ekseninden sağa doğru yatay, krom eşdeğerini gösteren ekseninden yukarıya doğru dikey çizgiler çizerek bulunur. Yatay ve dikey doğruların kesiştiği noktadan geçen çapraz çizgiler ferrit numarasını vermektedir [Odabaş, 2007].

5.2.2. Östenitik paslanmaz çelikler

Gerek kullanım, gerekse alaşım kalitelerinin çokluğu açısından en zengin grup östenitik paslanmaz çeliklerdir. Bu çelikler hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik kafese sahip östenitik içyapıları koruduklarından, normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemi yapılamaz. Tavlanmış halde süneklikleri, toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir.

Mukavemetleri ancak soğuk şekillendirme ile artar. Östenitik paslanmaz çelikler, bileşimlerinde % 12-25 Cr, % 8-25 Ni ve % 2'ye kadar mangan içerirler. Nikel ve mangan temel östenit oluşturuçulardır [Erdoğan, 2000; Aran ve Temel, 2003; Wang ve ark., 2005].

Östenitik paslanmaz çelikler özellikle oksitleyici veya redükleyici ortamlarda iyi korozyon direncine sahiptir. [Castner, 1992].

Anti manyetik olan bu tür paslanmaz çeliklere, korozyon direncini arttırmak için; kromun ferrit yapıcı etkisi, östenit yapıcı alaşım elementlerinin ilavesiyle gidermek gerekir. Katılan alaşım elementleri ve etkileri su şekilde sıralanabilir [Kıyıcı, 1994].

- Kaynak edilmiş parçalarda taneler arası korozyonu önlemek için karbon miktarının azaltılması veya titanyum, niobyum ve tantalyum gibi kararlaştırıcı elementlerin katılması gereklidir. Karbon kuvvetli bir östenit yapıcı olmasına karşın karbür oluşturarak korozyon direncini düşürmektedir.
- Yüksek sıcaklıklarda korozyon direncini yükseltmek için krom ve nikel miktarının artırılması gerekmektedir.
- Gerilmeli korozyonu önlemek için nikel miktarının artırılması gerekmektedir.
- Molibden ilavesiyle organik ve çeşitli mineral asitlere karşı dayanım artar. Böylece çukur ve çatlaklardaki korozyon önlenir [Kıyıcı, 1994].

Östenitik paslanmaz çelikler karbonlu çeliklerden daha yüksek termal genleşme katsayısına ve daha düşük termal iletkenlik katsayısına, daha yüksek elektrik direncine ve daha düşük ergime noktasına sahiptirler [Woollin, 1994; Wang ve ark., 2005].

Östenitik paslanmaz çelikler bugün kullanımda paslanmaz çeliklerin yaklaşık %80-90'ını oluşturur. Bu çelikler Fe-Cr sisteminde östenit faz alanını genişletici Ni ve Mn gibi elementlerin katılmasıyla geliştirilmiştir. En yaygın türü 304 ve 316 tipleri gibi 300 serisi alaşımlardır [Woollin, 1994].

5.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler

Bu çeliklerin ismi, karbon çeliklerinde çok sık geçen martenzitten gelmektedir. Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik

kafese sahip östenitin hızlı soğuması sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit yapıya dönüşümü ile elde edilir. Bu çeliklerin içyapısında, tavllanmış halde, yumuşak ferritik faz da bulunur [Aran ve Temel, 2003].

Martenzitik paslanmaz çeliklerde mekanik özellikleri geliştiren niobyum (Nb), molibden (Mo) ve tungsten (W) gibi alaşım elementlerinin % 3'e kadar ilavesi ile yaklaşık % 10.5-18 Cr içerirler. En yaygın martenzitik alaşımlarda Si, Mn, N ve Ni oranları nispeten düşük düzeyde ve sabit tutulur. Buna karşılık karbon miktarı geniş sınırlar içinde değişebilir; zira bu element martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik karakteristiklerini geniş ölçüde değiştirme imkanı verir. Bileşimlerinde karbon miktarı % 0,1-1,2 arasında değişir; yüksek miktarda C içerenlerde Cr miktarı % 18'e çıkabilir.

Martenzitik paslanmaz çelikler genellikle su verilmiş ve menevişlenmiş veya tavllanmış halde kullanılırlar. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kritik soğuma hızlarının çok düşük olması, yavaş soğuma halinde, örneğin sakin havada soğumada, martenzit oluşumuna neden olur. Martenzitik durumda korozyon dirençleri çok iyidir. 815 °C'ye kadar paslanmazlık özelliklerini yitirmezler. Ancak uzun süre yüksek sıcaklıklarda kalırlarsa hafif bir korozyon başlangıcı olur. Dolayısı ile bunlar endüstride 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmazlar. Çizelge 5.3'de martenzitik paslanmaz çeliklerin türleri ve kimyasal bileşimleri verilmiştir [Baylan, 2004].

Çizelge 5.3. Martenzitik paslanmaz çeliklerin türleri ve kimyasal bileşimleri [Aran ve Temel, 2003].

ASTM	Kimyasal Bileşim, Ağırlıkça % maksimum									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Kalan
410	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03	11.5-13	-	-	-	Fe
420	0.15min	1.0	1.0	0.04	0.03	12-14	-	-	-	Fe
440A	0.6-0.75	1.0	1.0	0.04	0.03	16-19,5	-	0,75	-	Fe
440C	0,95-1,2	1.0	1.0	0.04	0.03	16-18	-	0,75	-	Fe

5.2.4. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler

Dubleks östenitik-ferritik paslanmaz çelikler östenitik ve ferritik fazların korozyon direnci ve mekanik özelliklerini birleştirme amacı ile geliştirilmiştir; östenit tokluk ve genel korozyon direnci sağlarken ferrit, dayanım ve gerilmeli korozyona direnç sağlar [Tülbentçi, 1998].

Ferritik-östenitik dubleks paslanmaz çelikler yaygın östenitik türlere çekici bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Dubleks paslanmaz çelikler klorlu gerilmeli korozyon çatlmasına direncinin yanında yüksek dayanıma sahip olup, bazı ortamlarda 300 serisi paslanmaz çelik türlerinden daha iyi çukurcuk ve aralık korozyon direncine sahiptir [Anık ve ark., 1991].

Dubleks paslanmaz çelikler yüksek oranda krom (% 18-28) ve orta miktarda nikel (% 4.5-8) içermektedir. Nikel miktarı en çok % 8 olup, bütün içyapının östenitik olması için yetersizdir. Çift fazlı mikroyapı çeliğin 1000–1050 °C sıcaklıkta tavllanması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir.

Dubleks 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 sahiptir,
- 2) Klor iyonunun bulunmadığı ortamlarda daha yüksek korozif dayanım göstermektedir,
- 3) Östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek mekaniksel dayanıma sahiptir,
- 4) İyi kaynak ve şekillendirme kabiliyetine sahiptir.

Çizelge 5.4. Yaygın olarak kullanılan dubleks paslanmaz çelik türleri [Yüksel 2002, Aran ve Temel, 2004].

ASTM	EN 10088 Malzeme No	EN 10088 Kısa Adı
318	1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3
329	1.4460	X4CrNiMoN 27-5-2

5.2.5. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, bakır, molibden, niobyum, titanyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri içeren, bu elementlerin bir veya birkaçının etkisi ile, çökelme sertleşmesi gösteren Fe-Cr-Ni'li paslanmaz çelikler ailesinin bir grubudur.

Çökelme sertleşmesi, prensip olarak alaşımı çözeltiye alma tavından sonra uygulanan, hızlı soğumayı takip eden bir yaşlandırma işlemidir. Yukarıda belirtilen ve çeliğin içinde bulunan alaşım elementleri çözeltiye alma tavlama sırasında çözünürler ve yaşlandırma işlemi sırasında da çok küçük zerrecikler halinde çökerek matrisin sertlik ve mukavemetini artırır. Mukavemetleri yaklaşık 1700 MPa'a kadar çıkabilmekte ve böylece, martenzitik paslanmaz çeliklerin mukavemetlerinin üzerinde değerlere ulaşabilmektedir.

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, çözeltiye alma tavlamasından sonraki işlemler sonucu çeliğin yapısal değişimine ve özelliklerine bağlı olarak üç türde gruplanır. Bunlar; martenzitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, yarı-östenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler ve östenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerdir [Baylan, 2004].

Çökelme sertleşmesi uygulanabilen çelikler iyi süneklik ve tokluk yanında, orta ila iyi derece arasında korozyon dayanımı gösterirler. Bu çeliklerde, martenzitik çeliklerle kıyaslandığında, mukavemet ve korozyon dayanımlarının iyi bir kombinasyonu elde edilir. Bu durum yüksek miktardaki alaşım elementleri ve en çok % 0.04 C bulunmasından dolayıdır. Ancak, bunun sonucunda aşınma dayanımında düşüş gözlenir [Aran ve Temel, 2003].

Günümüzde üretilen çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler, yüksek hızlı uçakların dış yüzeylerinde, füze gövdelerinde, deniz taşıtlarında, yakıt tanklarında, uçakların iniş takımlarında, pompalarda, millerde, somun, cıvata, kesici aletler ve kavramalarda yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Diğer kullanım alanları içine filtreler veya makinelerin hareketli parçaları gibi korozif ortamlarda kullanılan ağırlıkça hafif yüksek mukavemetli parçalar girmektedir [Tekin, 1981; Kaluç ve Tülbentçi, 1995].

5.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çeliğin bileşiminde yeterince nikel bulunduğunda, malzemenin içyapısı oda sıcaklığında dahi östenitik olmaktadır. Östenitik 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 östenitten oluşan bir mikroyapının elde edilebileceği şekilde oluşturulmuştur. Bu alaşımlar, geniş bir sıcaklık aralığında sahip oldukları yüksek tokluk ve yüksek dayanım değerleri ile ön plana çıkarmakta olup, 540 °C'a kadar ki sıcaklıklarda oksidasyona karşı dayanım gösterirler.

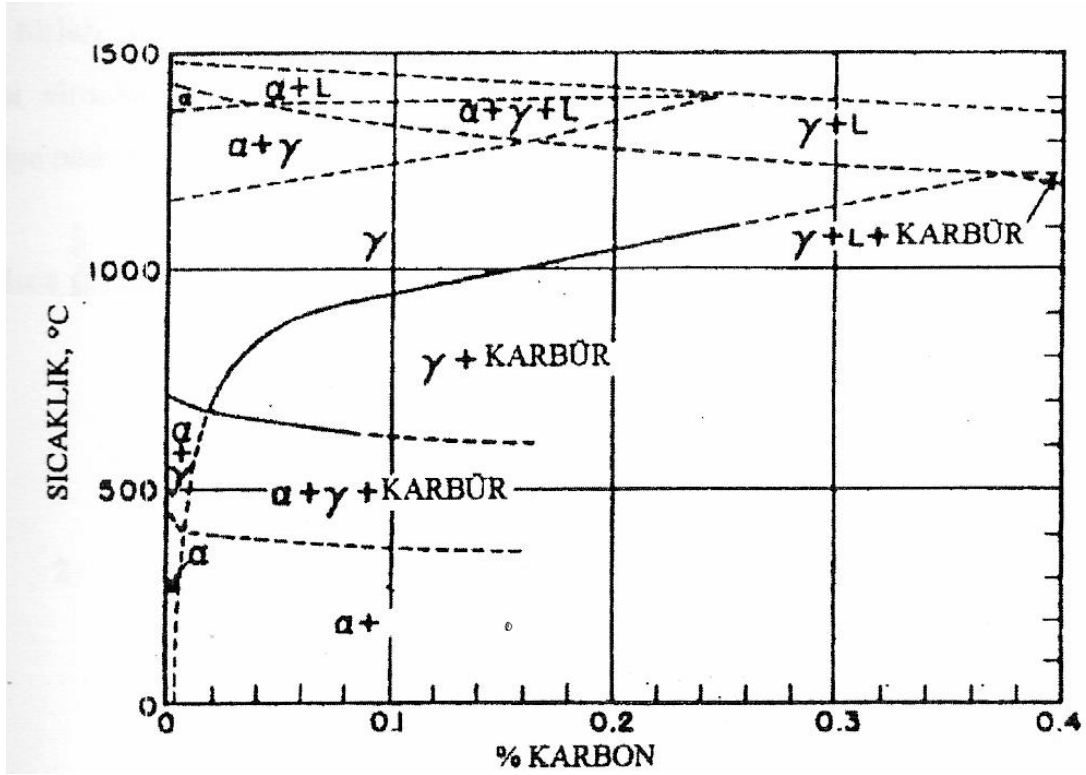
Östenitik paslanmaz çelikler biçimlendirme, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı bakımından çok uygun bir birleşim sunarlar. Süneklikleri, toklukları ve biçimlendirme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Manyetik olmayan bu çeliklere, östenitik içyapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme veya sertleştirme ısı işlemleri uygulanmamaktadır. Mekanik dayanımları ancak soğuk sekilendirme ile artırılabilir.

Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde östenitik paslanmaz çeliklerin payı % 70 olup, bu çelik türün en çok kullanılanı AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelikler olup, aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler,
- Mükemmel kaynak edilebilme kabiliyetleri,

- Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilme kabiliyetleri,
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaylığı,
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahip olması,
- Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir,
- Tavlanmış olduklarında manyetik değildirler,
- Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilme özelliğine sahiptir.

Östenitik paslanmaz çelikler ABD'nin çelik üretiminin % 70'ini oluşturmaktadır. 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 östenitik paslanmaz çelik yüksek korozyon direncine ve iyileştirilmiş yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Krom seviyesi % 23–25 arttırılmış AISI 309 ve AISI 310 paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikler etkili miktarlarda karbon içerirler. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik % 0,06 karbon içermektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerde karbon eriyebilirliği sıcaklık düştükçe % 18–8 nikel alaşımlarında olduğu gibi hızı düştüğü için bu alaşımlar yavaş soğutulursa krom karbür çökelmesi olmaktadır. Şekil 5.2'de Fe-Cr-Ni alaşımları faz diyagramı verilmektedir.



Şekil 5.2. Fe-Cr-C alaşımları faz diyagramı

Örneğin AISI 304 tipi paslanmaz çelik 1050 °C oda sıcaklığında yavaş soğutulursa 450-850 °C arasında krom karbür tane sınırlarında çökelecektir. Kritik sıcaklık aralığı yavaş soğuma sırasında yetersiz sayıda krom atom tane sınırlarından matristeki tane sınırlarına doğru çökmesi ile uzaklaştırılan krom atomlarının yerini alması için difüze eder. Bu nedenle tane sınırlarına yakın bölgeler korozyon direnci için gerekli olan % 12'den daha az krom içeriğine sahip olduğundan korozyon haline karşı hassas hale gelmektedir [Smith, 2000].

5.3.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti

Östenitik paslanmaz çelikler oksitleyici veya redükleyici ortamlarda iyi korozyon direnci gösterirler. Tüm kaynaklı paslanmaz çelik imalatlarının % 90'dan daha fazlası için östenitik paslanmaz çeliklerin kullanılmasının nedeni iyi kaynaklanabilirliğidir. Östenitik paslanmaz çeliklerde kaynaklar, çoğunlukla ana metalle karşılaştırılabilen kimyasal bileşimlere ve mekanik özelliklere sahiptirler.

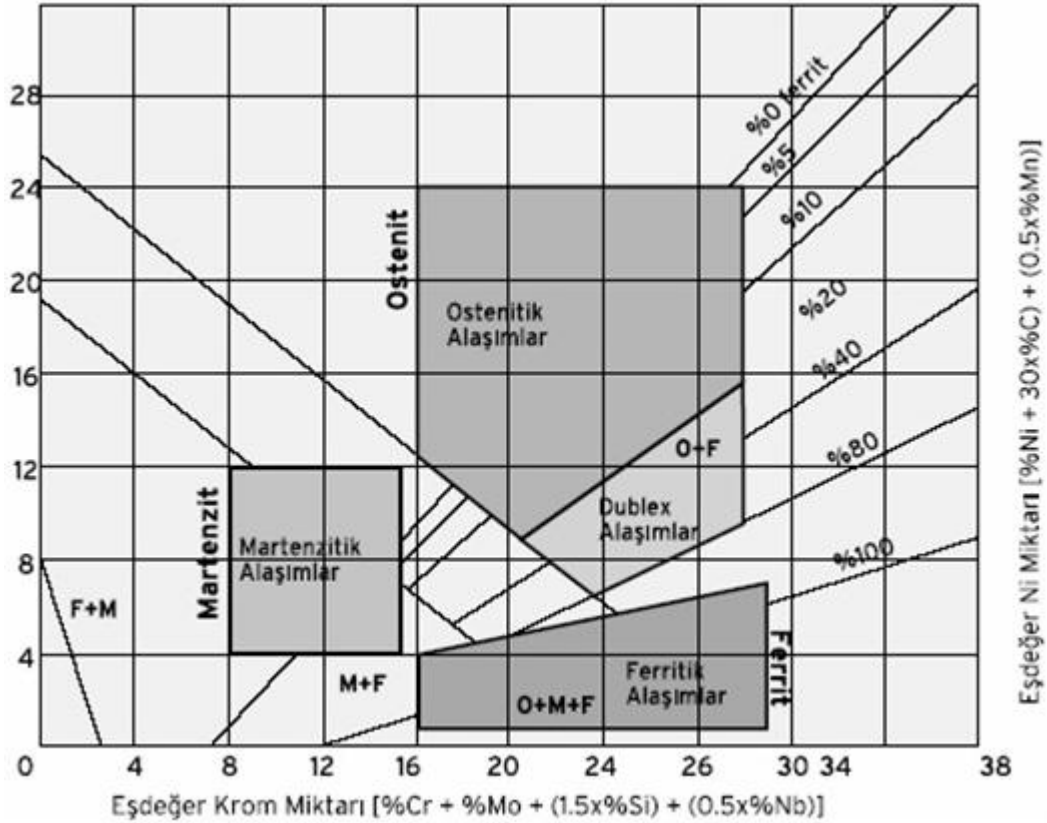
Östenitik paslanmaz çelikler çeşitli kaynak yöntemleri ile kolaylıkla kaynaklanabilir [Castner, 1992]. Bu tür paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti açısından en önemli özellikleri şunlardır.

- 1) Isıl iletme katsayıları oda sıcaklığında, az alaşımli ve karbonlu çeliklerin yaklaşık üçte biri kadardır;
- 2) Isıl genleşme katsayıları karbonlu ve az alaşımli çeliklerin yaklaşık 1,5 katı yani % 50 fazladır.
- 3) Bu tür çeliklerin elektrik iletme dirençleri, alaşımli çeliklere karşın dört ila yedi kat büyüktür [Tülbentçi ve Kaluç, 1995; Kuştutan, 2003].

Bu özelliklerinden dolayı, Cr-Ni 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. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetini etkileyen fiziksel özelliklerin yanı sıra bir dizi metalürjik etkende bu tür çeliklerin kaynağında önemli rol oynar; bunlar δ - ferrit fazının oluşumu, taneler arası korozyon hassasiyeti, gerilmeli korozyon hassasiyeti ve σ (sigma)-fazının oluşmasıdır [Ceyhun, 1992; Woollin, 1994].

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinde σ (sigma)-fazının bulunması, kaynak edilebilirliklerini olumsuz yönde etkiler ve metaller arası bir bileşik olan bu sert fazın oluşabilmesi için östenitik yapı içinde bir miktarda ferrit bulunması gerekir. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metallerinin mikroyapıları esas metalin mikroyapısından bir miktar farklılık gösterir. Tamamen östenitik alaşımların eşdeğer bileşimindeki kaynak metalinin az miktarda ferrit içerdiği görülür. Çeşitli elektrotların kullanımı kaynak yapısının metalürjik yapısını değiştirebilir. Bu amaçla kaynak metalinin kimyasal bileşimini saptamak üzere değişik diyagramlar geliştirilmiştir. Bu diyagramlardan bir tanesi Schaeffler Diyagramıdır [Tülbentçi ve Kaluç, 1995; Önal, 1997]. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi Schaeffler Diyagramında ferrit

dengeleyici elementler $Cr_{eş}$ olarak yatay eksende, östeniti dengeleyen elementler $Ni_{eş}$ olarak düşey eksende yerleştirilmiştir;

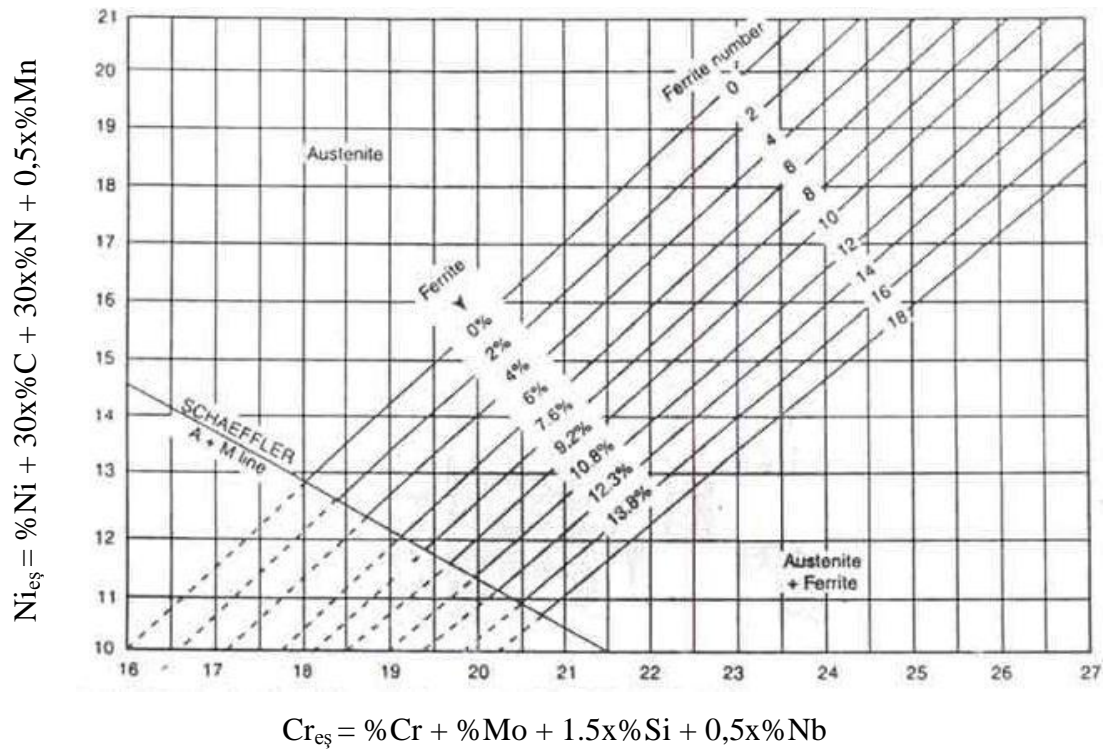


Şekil 5.3. Schaeffler diyagramı [Aran ve Temel, 2003].

Schaeffler diyagramında yüksek azot içerikleri dikkate alınmamıştır. Bu açıdan diyagram sadece % 0.05-0.1 N içerikleri için uygulanabilir. Bu diyagramın yüksek Mn içeren çelikler için kullanılması pek uygun değildir. Schaeffler diyagramı bugün hala paslanmaz çeliklerin üretimi, paslanmaz çelik elektrotların geliştirilmesi ve bu tür çeliklerin kaynak edilmesi konusunda çalışan birçok mühendis ve teknik eleman tarafından yaygın olarak kullanım alanına sahiptir [Önal, 1997].

Schaeffler diyagramının orta kısmında % 16'dan % 24 $Cr_{eş}$ 'ne, % 6'dan % 18 $Ni_{eş}$ 'e kadar uzanan üçgen biçiminde küçük östenitik ve ferritik içyapılı bir bölge vardır ki bu bölge iyi kaynak kabiliyetine sahiptir [Anık, 1970].

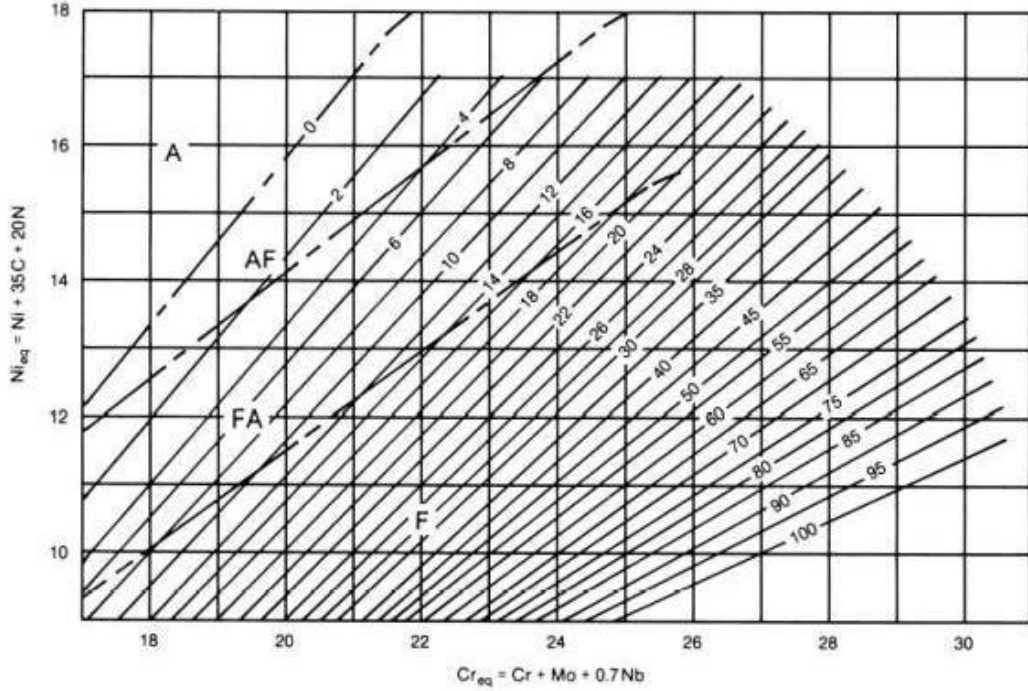
De Long diyagramı ise azotun, östenitik paslanmaz çeliğin faz dengesi üzerine başlıca etkisini gösterir. Bu diyagram ile kaynak metalinin yapısında bulunacak δ -ferrit (delta ferrit) miktarının saptanması amacı ile ferrit yapıcı elementler krom, molibden, silisyum ve niobyum, krom eşdeğeri olarak yatay eksende, östenit yapıcı elementler olan nikel, mangan, karbon ve azot miktarına bağlı olarak nikel eşdeğeri dikey eksende yerleştirilmiştir. Şekil 5.4.'de gösterilen De Long diyagramından “ferrit sayıları” ve buna bağlı olarak δ -ferrit yüzdesi okunabilir. Bu diyagramın kullanılması sayesinde örtülü elektrotlar ile yapılan ark kaynağında, oluşturulacak kaynak metalinde ortaya çıkabilecek problemler önceden bilinerek, gereken tedbirler alınabilir [Önal, 1997].



Şekil 5.4. De Long diyagramı [Önal, 1997].

Delta ferrit içeriği ve kontrolü konusu, ferrit içeriği ve kaynak metali çatlağı arasındaki ilişkisi nedeniyle 40 yılı aşkın zamandır ilginçliğini korumuştur. Schaeffler ve De Long tarafından daha önce geliştirilen yapısal diyagramların yerine şimdi WRC-92 diyagramı geçmiştir. Bu diyagramlar kimyasal bileşim üstüne ferrit tahmininin doğruluğunu geliştirerek kaynak metali verisini büyük ölçüde

sağlamlaştırmıştır. WRC-92 diyagramı Şekil 5.5.'de gösterilmektedir [Lippold, 1992].



Şekil 5.5. WRC-92 diyagramı [Lippold, 1992].

Bu diyagram ferrit içeriklerini 100FN (ferrit numarası) kadar genişletmiştir; böylece diyagram dubleks paslanmaz çelik kaynak metalleri için de kullanılmaya başlanmıştır. Bu diyagram östenitik (A), östenitik-ferritik (AF), ferritik-östenitik (FA) ve ferritik (F) bölgelere ayrılan çizgilerle gösterildiği gibi aynı zamanda katılaşma davranışının bölgelerini de göstermektedir. Katılaşma biçimi, kaynak metali katılaşma çatlacağına hassasiyeti etkilediğinden beri bu diyagramla katılaşma davranışı tahmini yapılabilmesi önemli bir katkıdır. Östenit fazından katılan kaynak metalleri ferrit fazından katılışandan daha fazla katılaşma çatlacağına uğrama eğilimindedir [Lippold, 1992; Dupont et al., 2003].

δ -ferrit oluşumuna mani olmak için katılan östenitik paslanmaz çeliklerde soğumanın çok yavaş bir hızla seyretmesi gereklidir. Bir başka çözüm yolu da bu çeliğin uzun bir süre 1150 °C'de tavlınması ve hızla soğutulmasıdır. Östenit yapıcı

elementler olan Ni ve Mn miktarının çeliğin bileşiminde artması δ -ferrit oluşumu olasılığını azaltır [Tülbentçi, 1985].

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında ortaya çıkan ikinci bir sorunda; özellikle 18/8 çeliği gibi bazı paslanmaz çeliklerin 450-850 °C sıcaklık aralığındaki bir sıcaklıkta uzun süre kalmaları sonucunda oluşan krom karbür çökmesi eğilimidir. Oluşan krom karbürün ağırlıkça % 90'nını Cr oluşturduğundan, tane sınırlarında bulunan çok az karbon bile östenit tanelerinin çevresindeki krom miktarını aşırı derecede azaltır. Bunun sonucu olarak malzeme korozif bir ortamda kaldığında, kromca zayıflamış tane sınırında korozyon oluşur [Baylan, 2003].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı, farklı özelliklerdeki iki metalin (AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ve St 60 genel yapı çeliği) sürtünme kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini incelemektir. Her iki malzemedен alınan deney numuneleri sürtünme kaynak yöntemi ile Türk Traktör Fabrikası'ndaki sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerden alınan deney numunelerinin optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), element analizi (EDS), çekme ve sertlik incelemeleri ise Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Bilimi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

6.1. Malzeme ve Metod

6.1.1. Malzeme

Deneylede, kimyasal bileşimi Çizelge 6.1'de verilen düşük ve yüksek sıcaklık dayanımı iyi olan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile orta karbonlu genel yapı çeliği olan St 60 çeliği sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir.

AISI 304 östenitik paslanmaz çelikler; gıda işleme makineleri, mutfak araç ve gereçleri, makine ve imalat sanayi, kimya endüstrisi, asansörler ile bina dış cephe kaplamaları gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. St 60 çeliği ise genel olarak mukavemet gerektiren makine parçaları ve dişli çark yapımında kullanılmaktadır.

Sürtünme kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilen malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir. Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'deki değerler tedarikçi firma tarafından verilen sertifika değerleri olup, laboratuvar imkanları ile de kontrolü yapılmıştır.

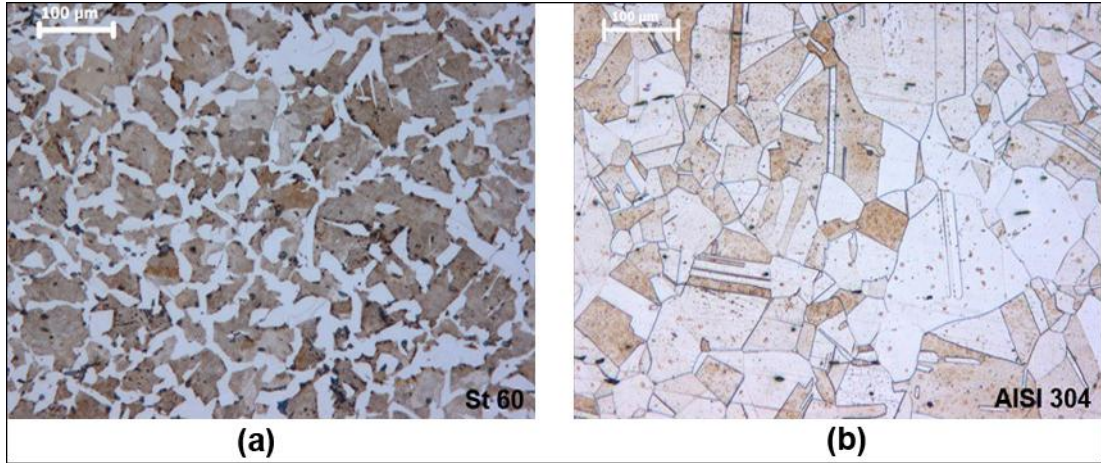
Çizelge 6.1. Deneyleerde kullanılan malzemelerin kimyasal analiz sonuçları

MALZEME ADI	C	Ni	Cr	Si	Mn	P	S
St 60	0,420	----	----	0,21	0,45	0,020	0,031
AISI 304	0,027	8,10	18,10	0,28	1,81	0,037	0,023

Çizelge 6.2. Deneyleerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

MALZEME ADI	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)	Kesit Daralması (%)	Sertlik (HV)
AISI 304	379,3	714	49,7	48,9	185
St 60	407,9	655,9	26,4	29,5	212

Deneyleerde kullanılan St 60 genel yapı çeliği ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe ait mikroyapı fotoğrafları Resim 6.1’de görölmektedir. Mikroyapı fotoğrafları ile malzemelerin kaynak öncesi tane yapısı belirlenmiştir.



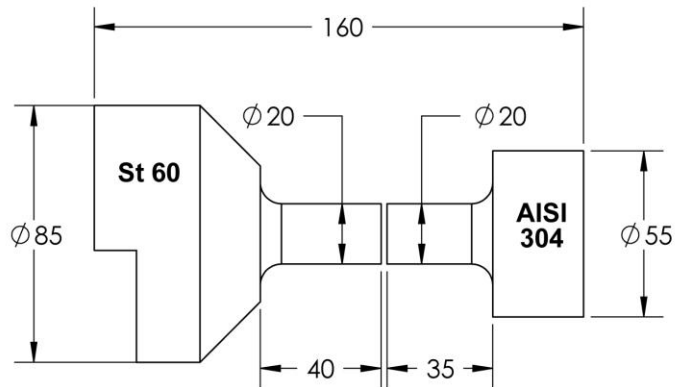
Resim 6.1. a) St 60 genel yapı çeliği mikroyapı fotoğrafı (x10) b) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik mikroyapı fotoğrafı (x10)

6.1.2. Metod

İki boyutlu çizimleri ve ölçüleri Şekil 6.1’de verilen kaynak numuneleri Resim 6.2’de gösterilen Kuka RS 30 marka sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi ile Çizelge 6.3’de verilen kaynak parametreleri çerçevesinde birleştirilmiştir.

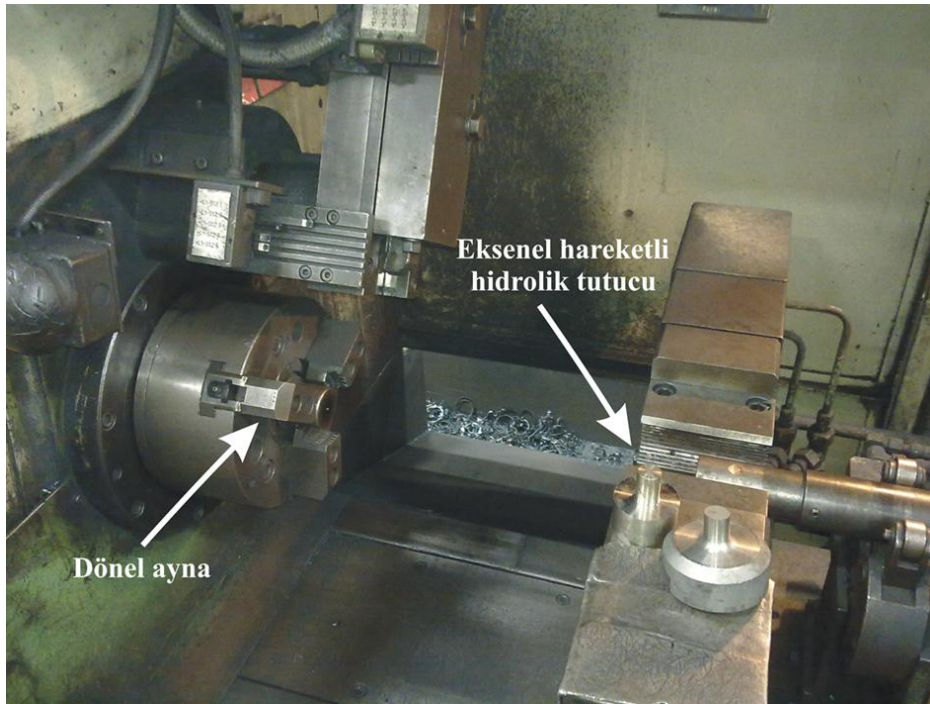


Resim 6.2. Deneylerde kullanılan sürtünme kaynak makinesi



Şekil 6.1. St 60 ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten üretilen kaynak numunesi

Şekil 6.1’de gösterilen kaynak numuneleri, deneylerin yapıldığı esnada fabrikadaki mevcut seri üretimi aksatmamak için, fabrikanın kullandığı tezgahın ayna ve mengene yapısına uygun olarak hazırlanmıştır. Kaynaklı birleştirme esnasında, Resim 6.3’de gösterilen cihazın motoruna bağlı dönel aynaya St 60 malzeme numuneleri, hidrolik mekanizmaya bağlı olan sabit çeneye ise AISI 304 numuneleri bağlanarak parçaların birleştirilmesi sağlanmıştır.



Resim 6.3. Kaynak makinesi bağlama mekanizması

Resim 6.2’de gösterilen Kuka RS 30 marka sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi, Türk Traktör Fabrikasının seri üretiminde sürekli olarak kullandığı bir kaynak makinesidir. Bu kaynak makinesi 300 kN gücünde olup, 175 mm² ile 2500 mm² arasında kesit alana sahip yuvarlak malzemeleri birleştirebilme özelliğine sahiptir.

Çizelge 6.3. Numunelerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametreleri

DENEY NUMARALARI	DEVİR SAYISI (n) (dev/dak)	SÜRTÜNME BASINCI (P_1) (MPa)	YIĞMA BASINCI (P_2) (MPa)	SÜRTÜNME SÜRESİ (t_1) (sn)
DENEY- 1	2000	30	60	5
DENEY- 2	2000	40	60	5
DENEY- 3	2000	50	60	5
DENEY- 4	2000	40	50	5
DENEY- 5	2000	40	70	5
DENEY- 6	2000	40	60	3
DENEY- 7	2000	40	60	7

6.2. Mikroyapı İncelemeleri

Çizelge 6.3'deki kaynak parametrelerine bağlı kalınarak birleştirilen numunelerin kaba çapları metalografik incelemeye uygun hale getirilebilmesi için tornada küçültülmüştür. Tornalama işleminde, malzemelerin ısı etkisi ile herhangi bir değişime uğramaması için, uygun devir ve ilerleme seçilmiş ve soğutma sıvısı kullanılmıştır. Metalografik incelemeler esnasında sürtünme kaynaklı numunelerin merkez bölgesi kullanılacağı için numuneler tel erezyon tezgahında ortadan ikiye kesilmiştir. Bu yöntem ile malzemelerin ısıl değişime uğraması engellenmiş ve deney numuneleri bakalite alınacak boyuta getirilmiştir.

50 mm boyunda kesilen kaynaklı birleştirmelerden alınan numuneler, soğuk gömme (polyester reçineye) yapıldıktan sonra sırasıyla 100, 200, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı SiC zımparalarla zımparalanmıştır. Böylece; yüzeylerdeki pürüzler ve karşıt yöndeki çizgiler ortadan kaldırılmıştır. Daha sonra numuneler sırasıyla 3 μ m ve 1 μ m elmas pasta süspansiyonları ve keçe kullanılarak parlatılmıştır. Resim 6.4'de polyester reçineye soğuk gömme yapılmış olan numune resmi verilmiştir.



Resim 6.4. Polyester reçineye soğuk gömme yapılmış numune

Parlatma işleminden sonra numune yüzeyleri metil alkol ile temizlenerek olası oksitlenmenin önüne geçilmiştir. İki farklı metal malzeme sürtünme kaynağı ile birleştirildiğinden dağlayıcı seçimine dikkat edilmiştir. St 60 çelik için kullanılan dağlayıcı ile östenitik paslanmaz çelik için kullanılan dağlayıcı farklılık arz etmektedir. St 60 çelik için % 4 Nital dağlayıcı, östenitik paslanmaz çelik için ise 95 ml HCl (hidroklorik asit), 5 ml $\text{OH-C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3$ (pikrik asit) dağlayıcı kullanılmıştır. Östenitik paslanmaz çeliğin dağlayıcısının asidik özelliği, St 60 çeliğin dağlayıcısından çok daha fazladır. Bu nedenle numunelerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri iki aşamada yapılmıştır. Üzerinde asidik bir etki bırakılmaması için numuneler önce St 60 malzemeye uygun dağlayıcı kullanılarak dağlanmıştır. St 60 malzeme mikroyapısı optik mikroskop ve SEM yardımıyla tespit edilmiştir. Daha sonra ise numuneler paslanmaz çelik dağlayıcısı ile dağlanmış, paslanmaz çeliğe ait olan bölgelerin mikroyapı ve SEM görüntüleri tespit edilmiştir.

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları Resim 6.5’de gösterilen Lieca DFC 320 dijital kamera bağlantılı DM 4000M optik mikroskop yardımıyla çekilmiştir.



Resim 6.5. Mikroyapı görüntüleme işlemlerinde kullanılan optik mikroskop

Mikroskopta incelenen mikroyapılar hem mikroskoptan, hem de bilgisayar ekranından takip edilebilmiştir. Mikroyapı incelemeleri farklı büyütmelemlerde yapılmış, bu şekilde kaynaklı numunelerdeki yapısal değişimler, geçiş bölgeleri, ısı tesiri altındaki bölgelerdeki (ITAB) değişimler belirlenmiştir.

Tarama elektron mikroskop çalışmaları Resim 6.6'da verilen Joel marka JSM-5600 model cihaz ile yapılmış ve numunelerin ara yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca uygun görülen bölge ve noktalardan EDS analizi alınmıştır.



Resim 6.6. Deneyleerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu ve EDS bağlantısı

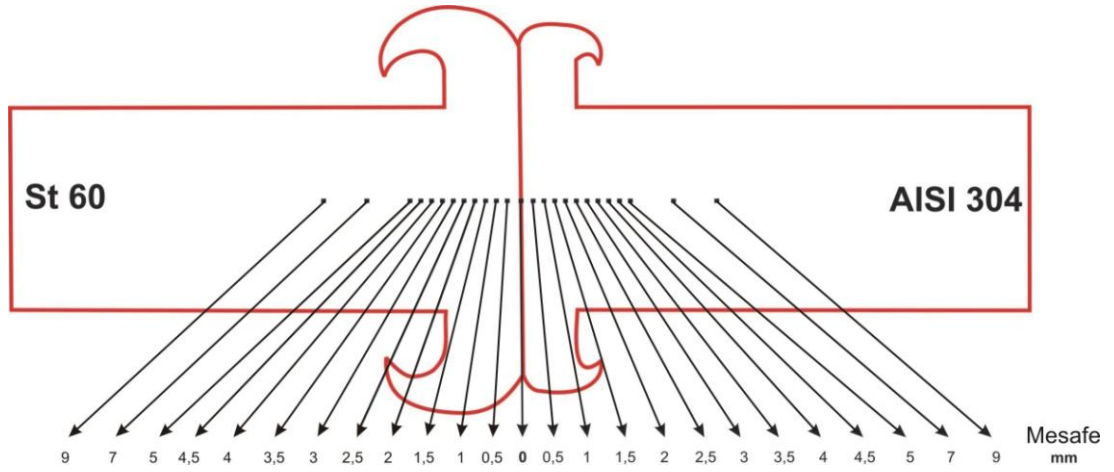
6.3. Sertlik Deneyleeri

Mikroyapı fotoğrafları çekilen numuneler, daha sonra sertlik ölçme işlemlerinde kullanılmıştır. Sertlik deneyleeri Resim 6.7’de gösterilen SHIMADZU marka, HMV model, 0,100 – 31.250 kg kapasiteli, tam pnömatik, değişken yüke sahip, Vickers cinsinden mikro ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçme işlemleri 1 kilogramlık bir yük uygulaması sonucunda Vickers sertlik değerleri cinsinden yapılmıştır.

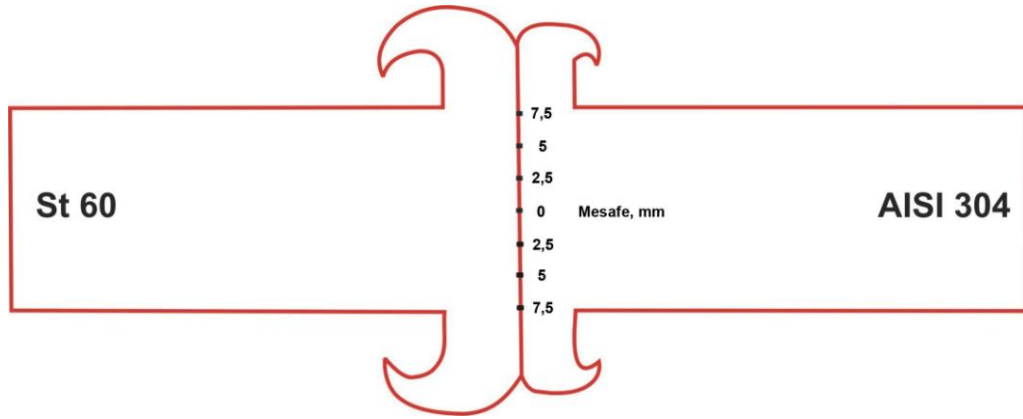


Resim 6.7. Deneylerde kullanılan mikrosertlik cihazı

Sertlik değerleri, birleşme ekseninin merkezi başlangıç noktası alınmak üzere, yatay doğruftuda sağa ve sola 0,5 mm ara ile 25 ayrı noktadan, düşey doğruftuda ise yukarı ve aşağı 2,5 mm ara ile 7 noktadan ölçülerek tespit edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde yatay dikey doğruftuda sertlik değerlerinin alındığı bölgeler şematik olarak Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te verilmektedir.



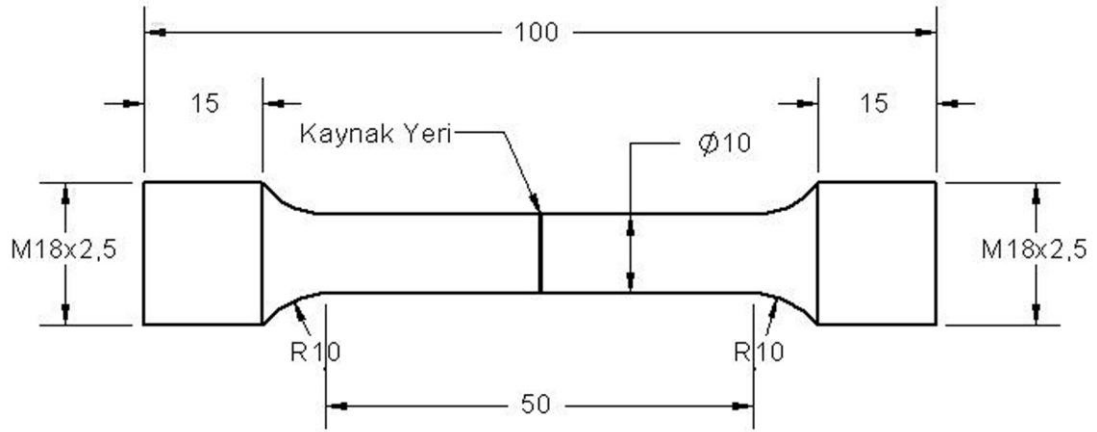
Şekil 6.2. Yatay doğrultuda sertlik değerlerinin alındığı bölgeler



Şekil 6.3. Dikey doğrultuda sertlik değerlerinin alındığı bölgeler

6.4. Çekme Deneyleri

Çizelge 6.3’de verilen parametreler dâhilinde sürtünme kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmeler ve her iki ana malzemeden çekme numuneleri alınmıştır. Numuneler Dizayn Mühendislik firmasına ait CNC torna tezgâhında ölçülere uygun olarak hassas bir şekilde işlenmiştir. Çekme numunesinin şematik görünüşü Şekil 6.4’de, fotoğrafı ise Resim 6.8’de verilmiştir. Her deney parametresi için 3 adet çekme numunesi hazırlanmış ve ortalamaları alınmıştır.



Şekil 6.4. Çekme numunesi ölçüleri (ASTM E 8M)



Resim 6.8. Çekme numunesi fotoğrafı

Deneysel esnasında, cihaz için ilerleme hızı 5 mm/dak olarak seçilmiştir. Kaynaklı numuneler çekme cihazına yerleştirilirken, çenelerin numuneleri her iki taraftan da eşit tutmasına dikkat edilmiş, bu şekilde dikey ekseninde uygulanan kuvvetin eşit dağılımı sağlanmıştır. Deneysel ana malzeme ve kaynaklı birleştirmelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve % kesit daralmalarına bakılmıştır.

Resim 6.9'da deneylerde kullanılan çekme cihazı gösterilmektedir. Instron marka, 8503 model bu cihaz 50 ton çekme ve basma kapasitesine sahiptir. Bu cihaz bir yazılım yardımı ile bilgisayardan kumanda edilebilmektedir. Bu yazılımda, ortalama hız, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve % kesit daralması gibi veriler hatasız bir şekilde hesaplanabilmektedir.



Resim 6.9. Deneylerde kullanılan çekme cihazı fotoğrafı

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Kaynaklı Birleştirme Esnasındaki Gözlem Sonuçları

Farklı parametreler ile yapılan deneyler sonucunda numunelerin temas yüzeyinden dışa doğru taşan çapağın geometrisinde ve büyüklüğünde farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığıma basıncının artmasıyla oluşan çapağın arttığı gözlemlenmiştir. Bu çapak artışında, diğer parametrelere oranla sürtünme süresinin daha etkin bir rol oynadığı saptanmıştır. Sürtünme süresinin artması ile kaynak edilen malzemelerin daha uzun süre sürtünmeye maruz kalması ile kaynak bölgesindeki ısı girdisi artmıştır. Isı girdisinin artması sonucu ise, sıcaklığın etkisi ile malzemenin plastik deformasyon kabiliyeti artmış, bu duruma sürtünme ve yığıma basıncının etkisi de ilave edilerek birleştirme esnasında sürtünme süresinin fazla olduğu malzemelerde daha büyük miktarda çapak oluşmuştur. Ateş (2003), Sürtünme süresi, sürtünme basıncı ve yığıma basıncı parametrelerinin artışı ile beraber sıcaklıktaki bölgesel artış sonucu yumuşayan ara yüzey bölgesinin numune kenarlarına taşarak fişkırması ve bağlantı ara yüzeyinin dışarıda çapak oluşturması rapor edilmiştir.

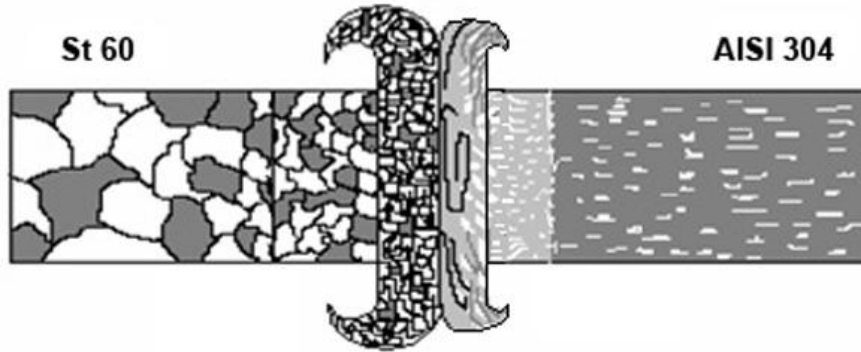
Ayrıca, deneylerde farklı kimyasal kompozisyona sahip iki farklı metal malzemenin kullanılmasından dolayı kaynak bölgesinin her iki yanında farklı boyutta ve geometride çapaklar oluşmuştur. AISI 304 tarafında oluşan çapak, St 60 tarafında meydana gelen çapaktan çok daha azdır.

7.2. Mikroyapı Deney Sonuçları

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalı Laboratuvarında gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri sonucunda optik mikroskop yardımıyla çekilen mikroyapı fotoğrafları bu bölümde verilmiştir.

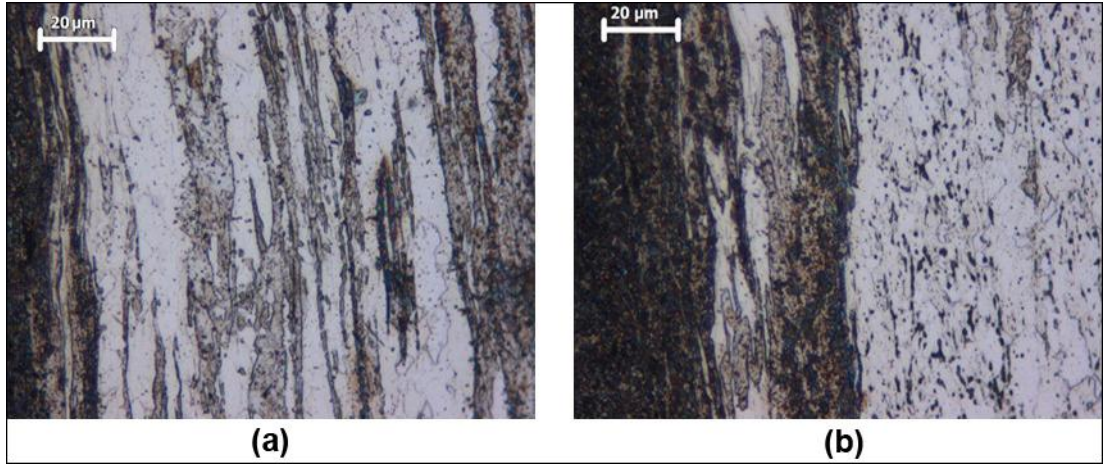
Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak deney numunelerinin hepsinde benzer bir tane yapısının olduğu görülmüştür. Kaynak birleşme hattına yakın

bölgelerde deformasyonun etkisiyle ince bir tane yapısı görülürken, birleşme hattından ana metale doğru ilerlediğimizde, tanelerin irileştiği ve ana metal tanelerinin değişmeden kaldığı görülmüştür. Fotoğraflarda; kaynak metali, deformasyon yönlenmesine uğramış bölge, kısmen dönüşüme uğramış bölge ana metal mikroyapısı net bir şekilde görülmektedir (Resim 7.5 – 7.11). Kaynak esnasında oluşan yüksek sıcaklığın ve basıncın neden olduğu plastik deformasyonun etkisiyle kaynak bölgesinde taneler incelmıştır. Isıdan ve basınçtan daha az etkilenen bölgelerde ise mikroyapı daha iri tanelerden oluşmuştur. Kaynak bölgesinden ana metale doğru yaklaştıkça bu bölgelerdeki tane boyutu ana metaldeki tane boyutuna yaklaşmıştır. Tane boyutlarındaki değişim şematik olarak Şekil 7.1'deki gibi verilebilir. Tane yapılarındaki değişim Taşkın ve arkadaşları tarafından da benzer şekilde rapor edilmiş ve benzer şematik gösterim verilmiştir [Taşkın ve ark, 2005].



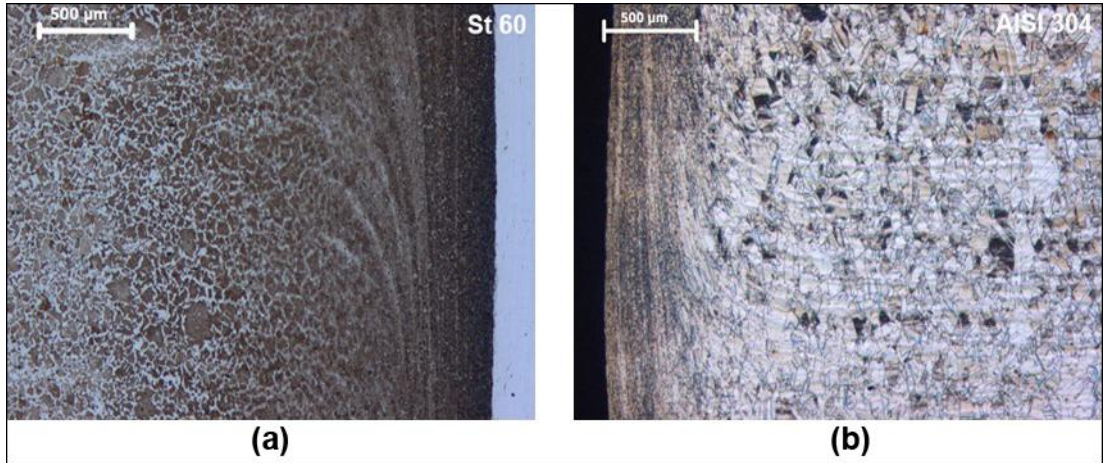
Şekil 7.1. Tane yapılarındaki farklılıkların şematik gösterimi

Kaynaklı birleştirmeler incelendiğinde tüm birleştirmelerde plastik deformasyonun etkisiyle, özellikle birleşme bölgesinde malzemeler birbirine karışmıştır. Sürtünme esnasında oluşan yüksek ısı ile deformasyon kolaylaşmış, numuneler deformasyon neticesinde difüzyon gerçekleştirmiş ve mekanik kilitleme meydana gelmiştir. Bu durum, Resim 7.1. (a ve b)'de 3 ve 4 numaralı deneylerin 500 büyütme fotoğraflarında örneklenmiştir.



Resim 7.1. a) 4 numaralı numune birleşme hattı (x50) b) 3 numaralı numune birleşme hattı (x50)

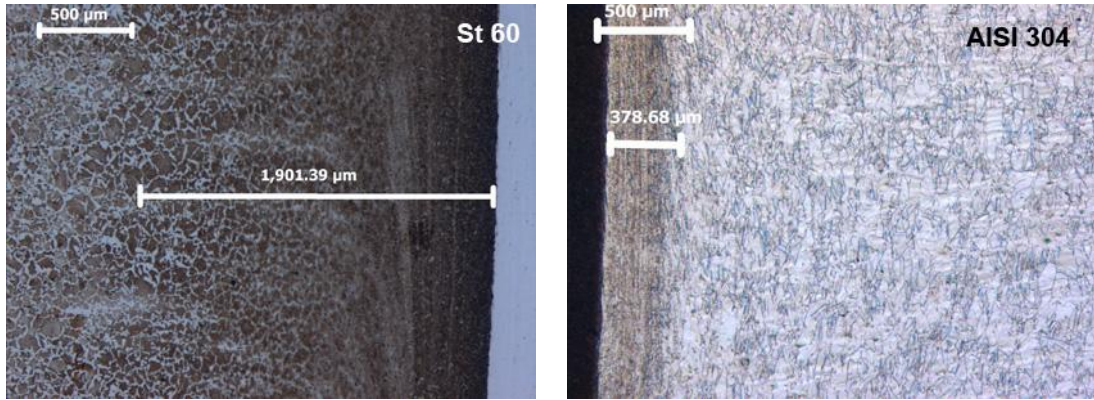
Kaynak bölgesi her iki malzemenin olduğu taraftan ayrı ayrı incelendiğinde basıncın neden olduğu deformasyon yönlenmesi kaynak merkezinden kenarlara doğru oluşmuştur (Resim 7.2). Resim 7.2’de her iki malzeme tarafındaki sıcaklık ve basıncın etkisi ile oluşan tanelerin yönlenme bölgeleri karşılaştırıldığında St 60 çelikte ($\sim 900 \mu\text{m}$) AISI 304’de ise ($\sim 650 \mu\text{m}$) olduğu görülmüştür



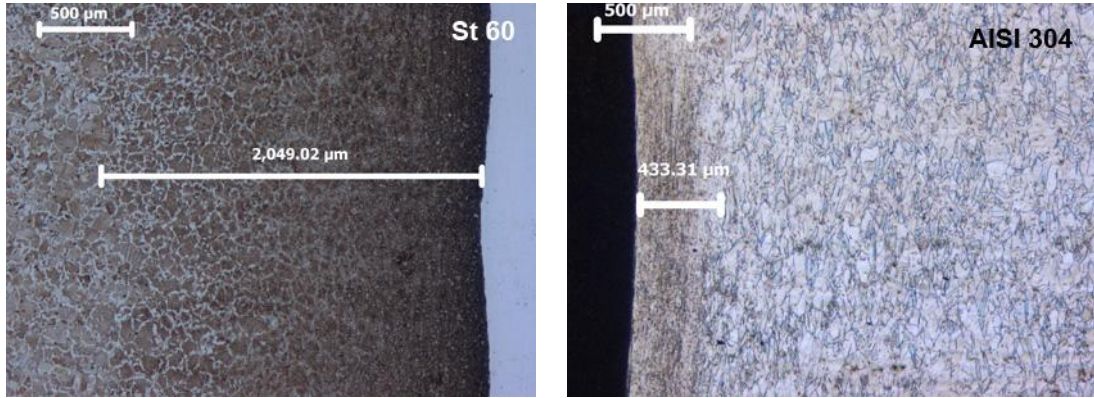
Resim 7.2. a) St 60’da yönlenme (x20) b) AISI 304’de yönlenme (x20)

Kaynak merkezinde (tam orta noktada) çevresel hız sıfırdır. Çap genişledikçe ve merkezden dışa doğru gidildikçe çevresel hız artar. Çevresel hızın artışıyla kaynak edilecek yüzeylerdeki sürtünme de artmış, buna bağlı olarak ısı da artmıştır [Kovan,

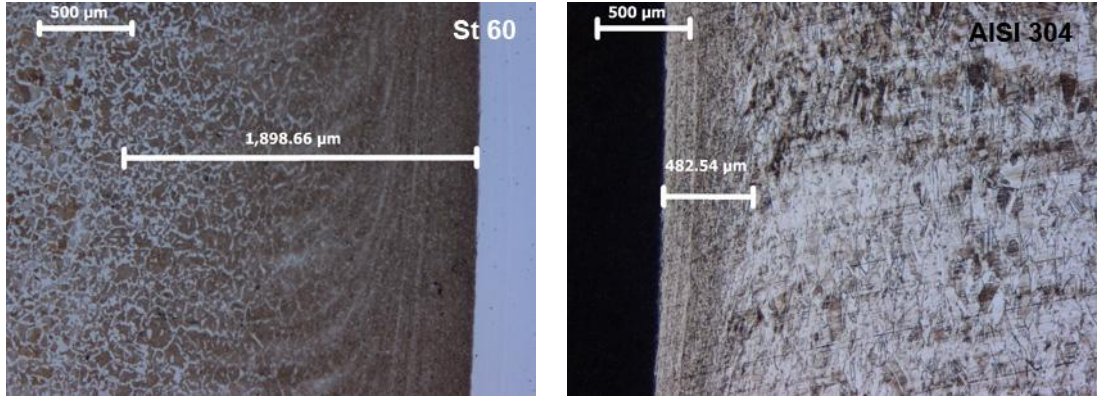
2006]. Deneylerde kullanılan malzeme çaplarının, daha önce yapılan benzer çalışmalardaki (Dinç 2006, Sönmez 2007) çaplardan daha büyük seçilmiş olması bu durumu kıyaslamak açısından güzel bir örnektir. Büyük çaplı malzemelerde çevresel hızında etkisiyle sürtünme artacağından ısı da artmış, taneler daha geniş bir alanda yönelim göstermişlerdir. Benzer durum Kovan, V. tarafından da rapor edilmiştir [Kovan, 2006].



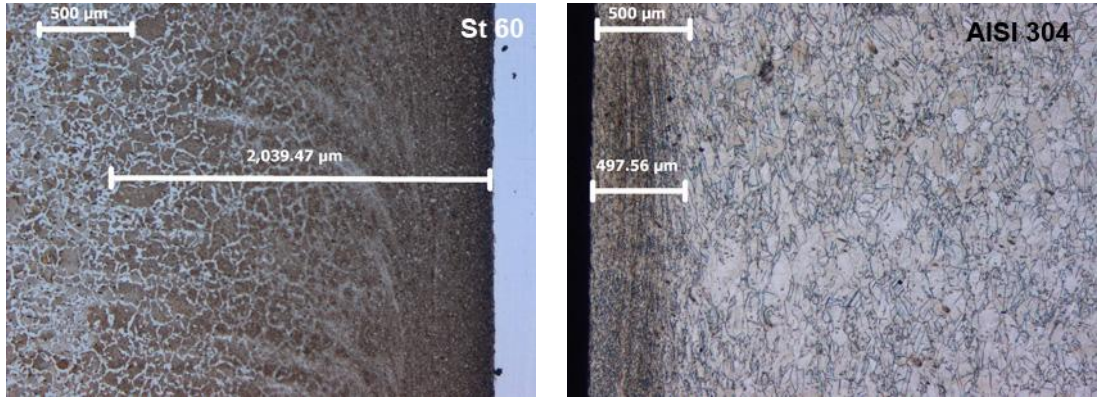
Resim 7.3. 1 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri



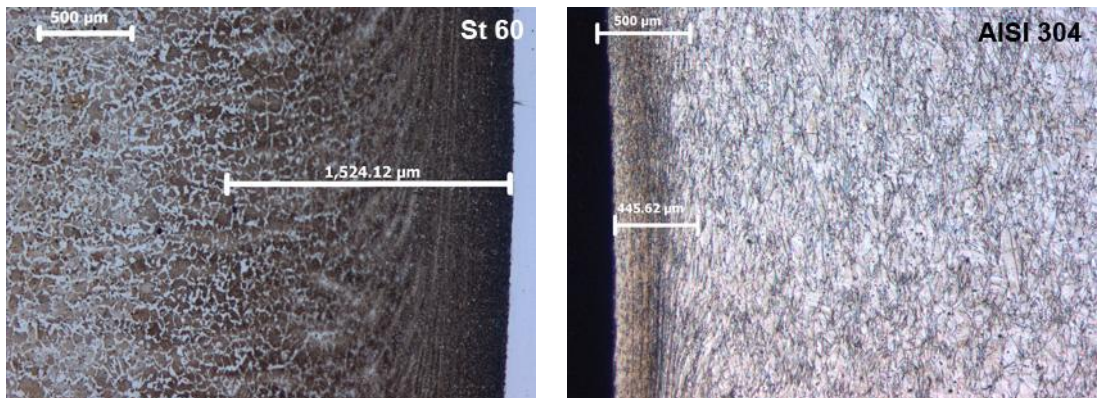
Resim 7.4. 2 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri



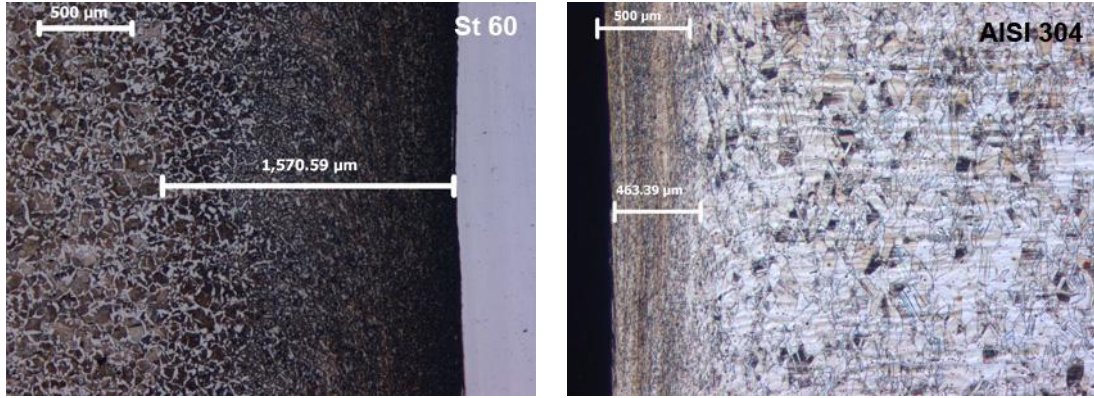
Resim 7.5. 3 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri



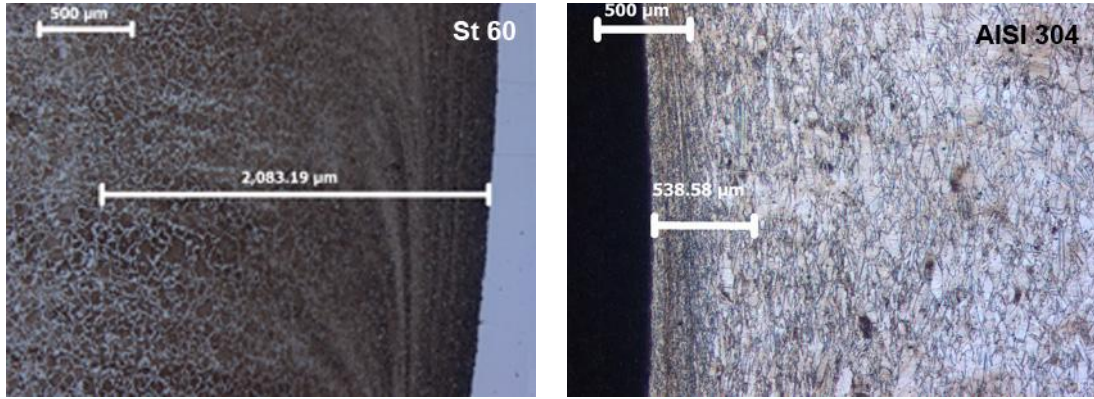
Resim 7.6. 4 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri



Resim 7.7. 5 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri



Resim 7.8. 6 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri

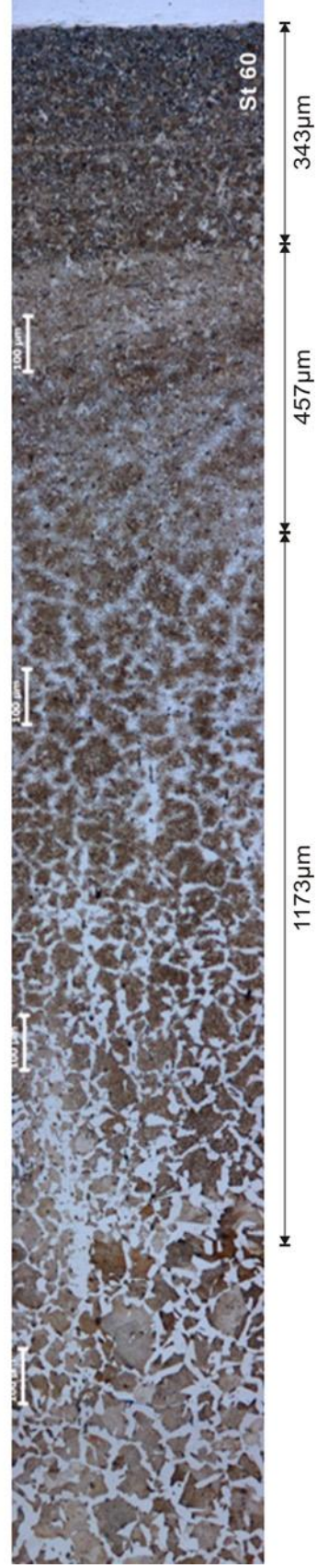


Resim 7.9. 7 numaralı deneye ait St 60 ve AISI 304'deki deformasyon bölgeleri

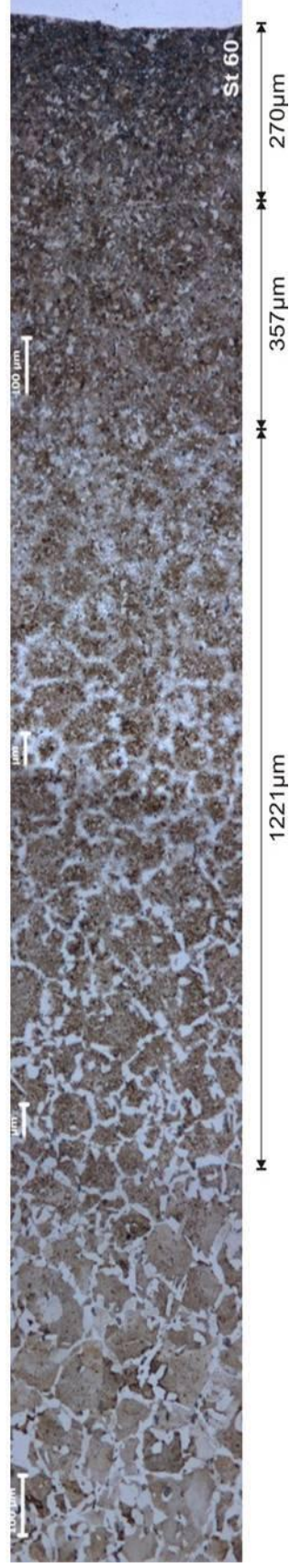
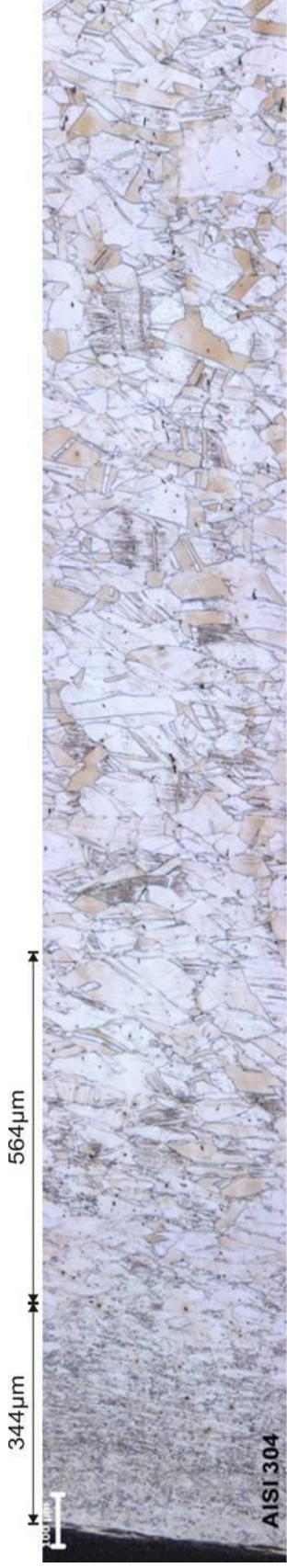
Resim 7.3 – 7.9'da St 60 ve AISI 304 tarafında oluşan deformasyon bölgeleri görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde AISI 304 paslanmaz çelik tarafında oluşan deformasyon alanının St 60 malzemede oluşan alandan daha küçük olduğu görülmüştür. AISI 304 paslanmaz çelikler yapısal karakteristiğinden ötürü daha az deformasyona maruz kalmıştır. Östenitik paslanmaz çeliklerin ısı iletkenliklerinin genel yapı çeliklerinden daha düşük olması nedeniyle [Odabaş, 2008] daha dar bir alanda deformasyona uğramış bölge oluşmuştur. Deformasyon daha geniş bir alanda St 60 malzemede gerçekleşmiştir. Çapak oluşumuna da dikkat edildiğinde St 60 malzemede oluşan çapak miktarının paslanmaz çelikte oluşan çapak miktarından daha büyük miktarda olduğu görülmüştür. Tane yapıları incelendiğinde birleşme bölgelerinde oluşan yönlenmeler St 60 tarafındaki kadar çok olmamıştır. Bu bölgelerdeki kaynak metali tane yapısı St 60 malzemeden farklı bir görünümde. St

60 malzemede küçük ve çok sayıdaki ince taneli yapı, paslanmaz çelik tarafında daha sütunsal ama ince haldedir. Kaynak metalinden ana metale doğru gidildiğinde ise bu tanelerin boyutunun arttığı görülmektedir. İnce taneli kaynak bölgesinden ana metale doğru geçişin olduğu bölgelerde daha girift bir tane yapısı görülmektedir. Taneler sürtünmenin etkisi ile birbirinin içerisine geçmiş, kısmen iğnemsî, daha çok sütunsal yapılar olarak göze çarpmaktadır. Geçiş bölgesi St 60 malzemeye göre daha dar bir alanda meydana gelmiştir.

1 numaralı deneye ait numunelerden 100 büyütme olarak alınan mikroyapı görüntüleri Resim 7.10.'da birleştirilerek verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, St 60 tarafında birleşme bölgesine yakın bölgelerde ısının ve basıncın etkisiyle oluşan deformasyon yönlenmeleri göze çarpmaktadır. Deneilerde en etkin parametre olarak görülen sürtünme süresi nominal değerde olduğundan birleşme bölgesinde oluşan deformasyon yönlenme alanı da elde edilen mikroyapı görüntüleri arasında ortalama büyüklüktedir. Kaynak bölgesinden ana metale doğru ilerlerken ısının ve basıncın etkilediği bölgede meydana gelen tane boyutu ve geometrisindeki yapısal değişimler net olarak görülmektedir. İnce taneli yapı, sürtünmenin etkisiyle oluşan sıcaklık ve bunun akabinde gerçekleşen soğuma neticesinde birleşme bölgelerinin hemen yakınında oluşmuştur. Bu yapı klasik sürtünme kaynak metali tane yapısını vermektedir. Oluşan sıcaklık tane irileşmesine yetecek kadar olmaması ve basıncında etkisi ile yapı ince taneli olarak kalmıştır. Ana metale doğru gidildiğinde maruz kalınan sıcaklığın düşmesi sonucu tane yapısı da ana metallerin halini almıştır. St 60 malzemede yapı ferrit ve perlitten oluşmuştur.

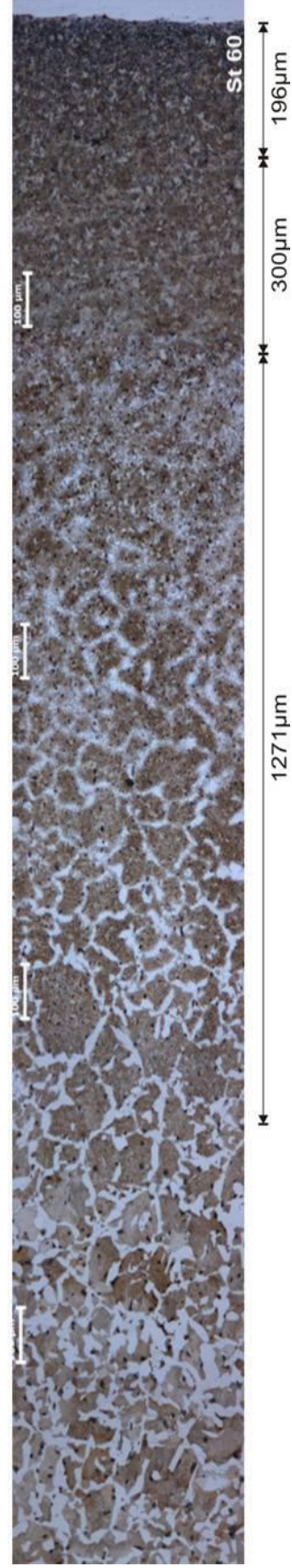
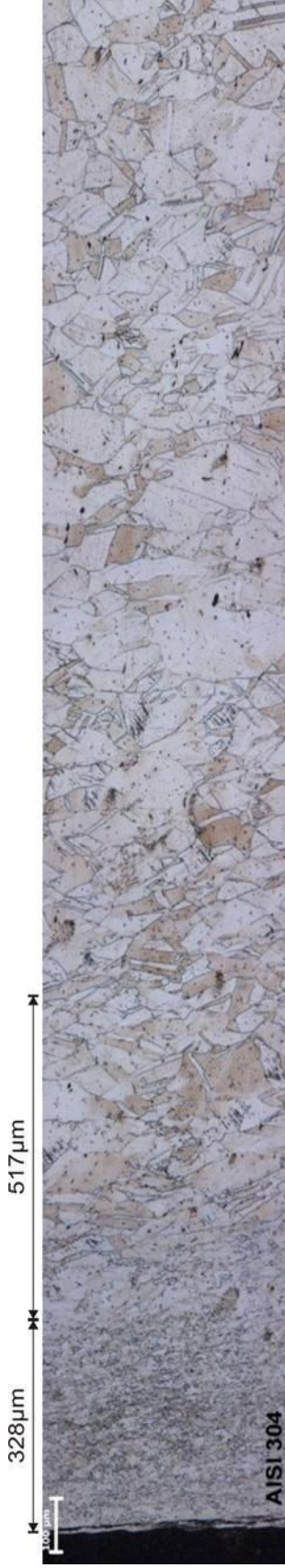


Resim 7.10. 1 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P₁: 30 MPa, P₂: 60 MPa, t: 5 sn)

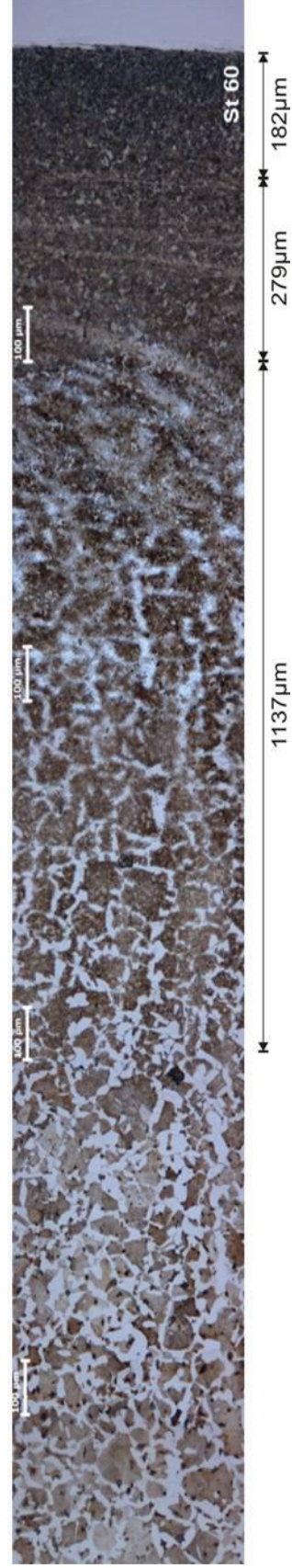
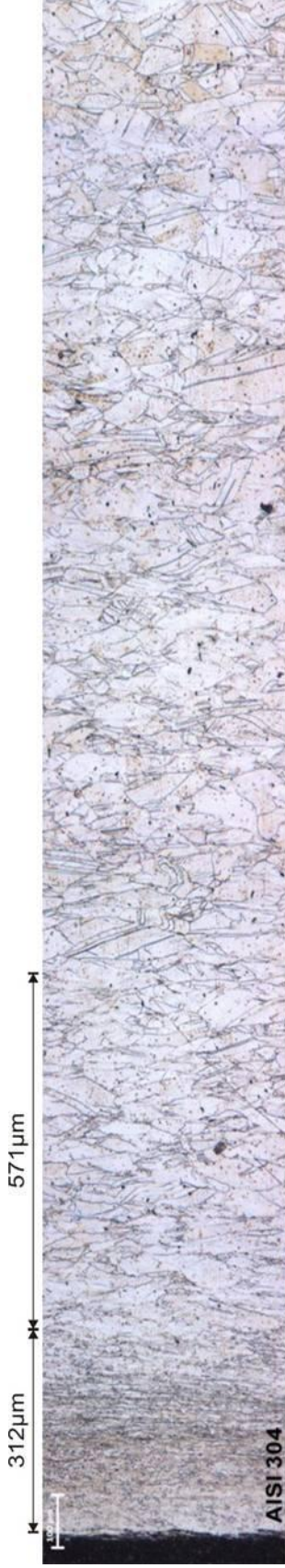


Resim 7.11. 2 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P₁: 40 MPa, P₂: 60 MPa, t: 5 sn)

Resim 7.10 - 7.11 ve 7.12'de sürtünme süresi ve yığma basıncın sabit tutulup sürtünme basıncının değişken olduğu deneylerin birleştirilmiş mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. St 60 ve AISI 304 taraflarında oluşan bölgelerin farklı genişliklerinin sürtünme basıncına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Sürtünme basıncının 50 MPa'ya artmasıyla tane yönlenmesinin olduğu birleşme bölgesine en yakın bölge genişliği 316µm ölçülmüştür. Benzer Şekilde Ateş, H.'nin çalışmasında sürtünme basıncının artması ile aynı bölgelerin genişliğinin arttığı rapor edilmiştir [Ateş, 2003].



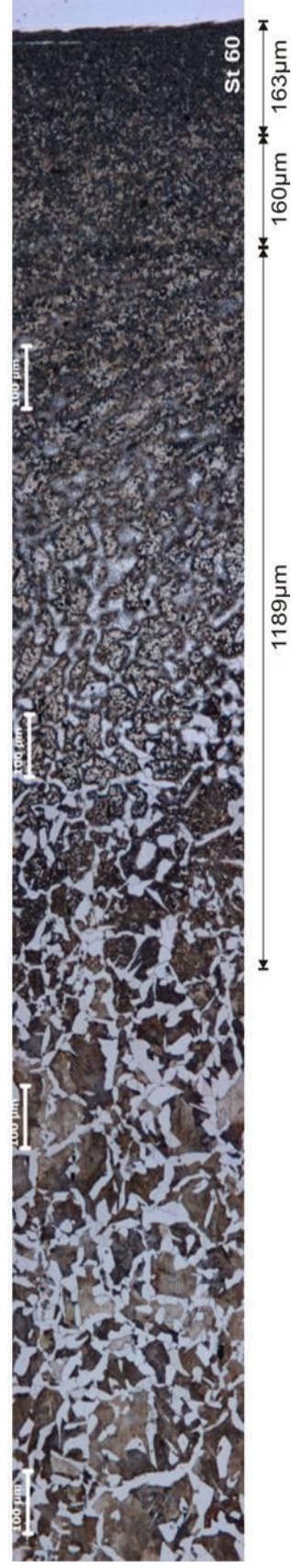
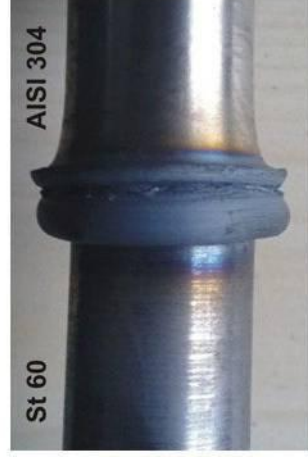
Resim 7.13. 4 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P₁: 40 MPa, P₂: 50 MPa, t: 5 sn)



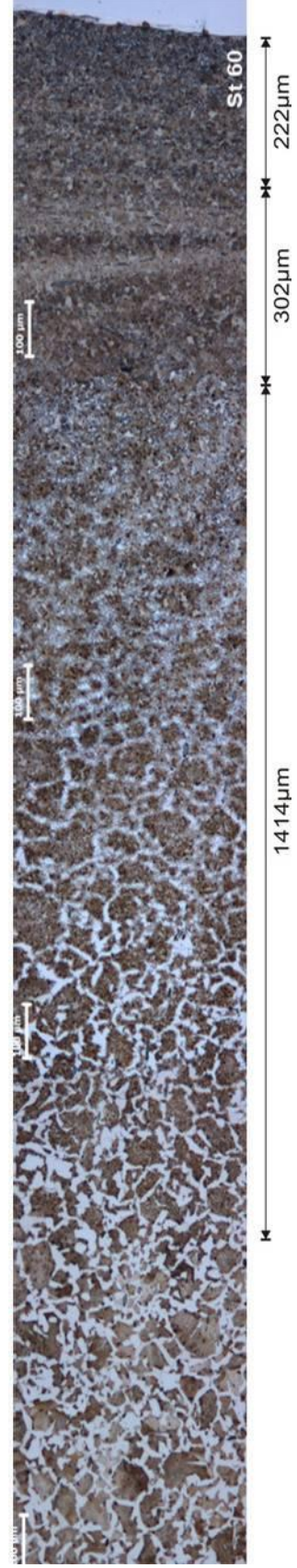
Resim 7.14. 5 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P₁: 40 MPa, P₂: 70 MPa, t: 5 sn)

Resim 7.11 - 7.13 ve 7.14'de sürtünme basıncı ve süresinin sabit tutulup yığma basıncının değişken olduğu mikroyapı görüntülerini karşılaştırdığımızda birleşme bölgesinin en yakınındaki bölgenin genişliğinin yığma basıncının artmasıyla St 60 ve AISI 304'de azaldığı görülmektedir. 70 MPa yığma basıncında birleştirilen numunenin birleşme bölgesine en yakın bölgenin genişliği St 60 tarafında 182 µm olarak ölçülürken 50 MPa'da 270 µm olarak ölçülmüştür.

Artan yığma basıncı ile ısınan numunelerin daha kolay plastik olarak deforme edilebileceği ve mikroyapı düzeyinde yapılan bölge ölçümlerinde küçülme olacağı görülmüştür.

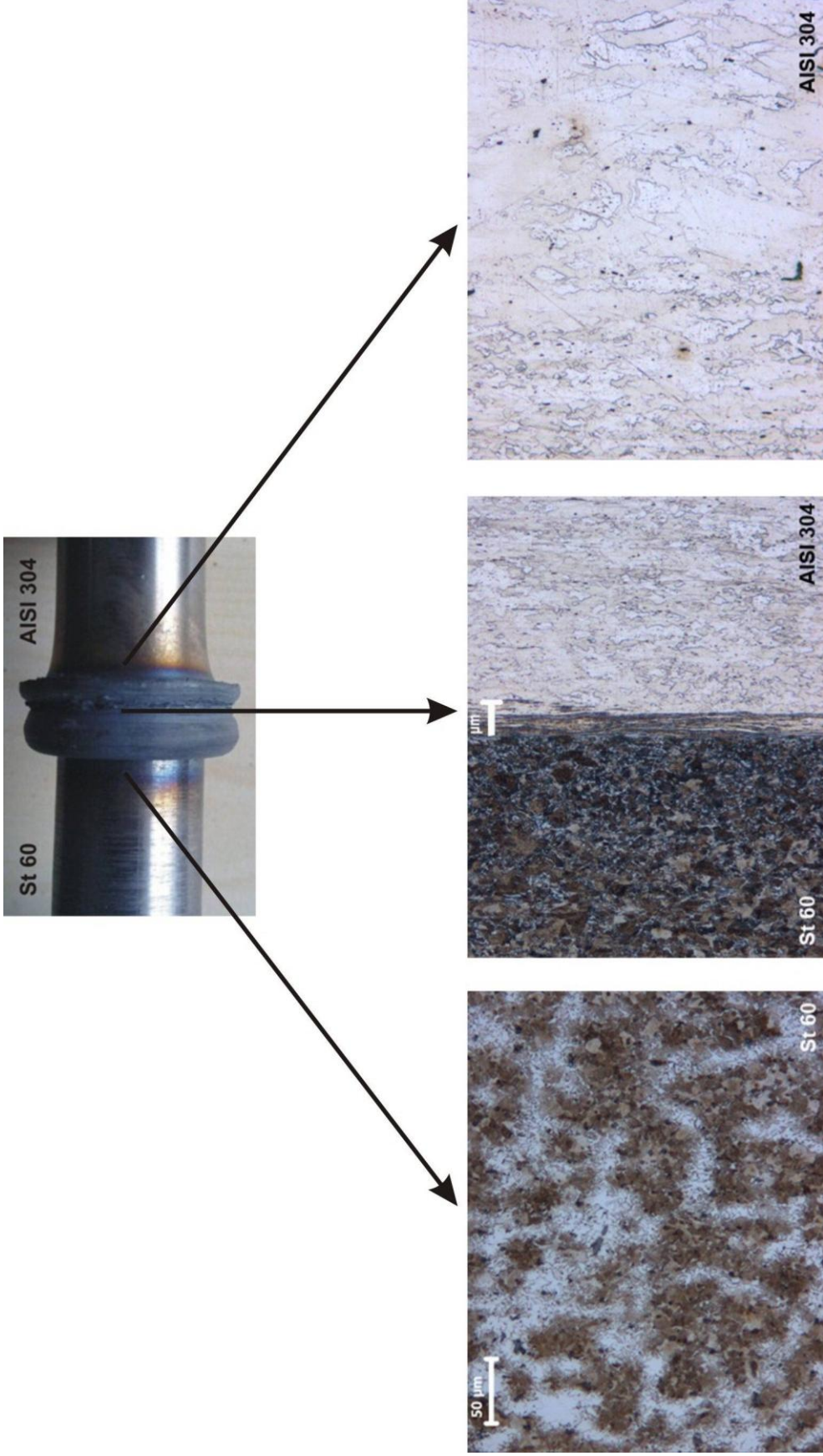


Resim 7.15. 6 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P₁: 40 MPa, P₂: 60 MPa, t: 3 sn)

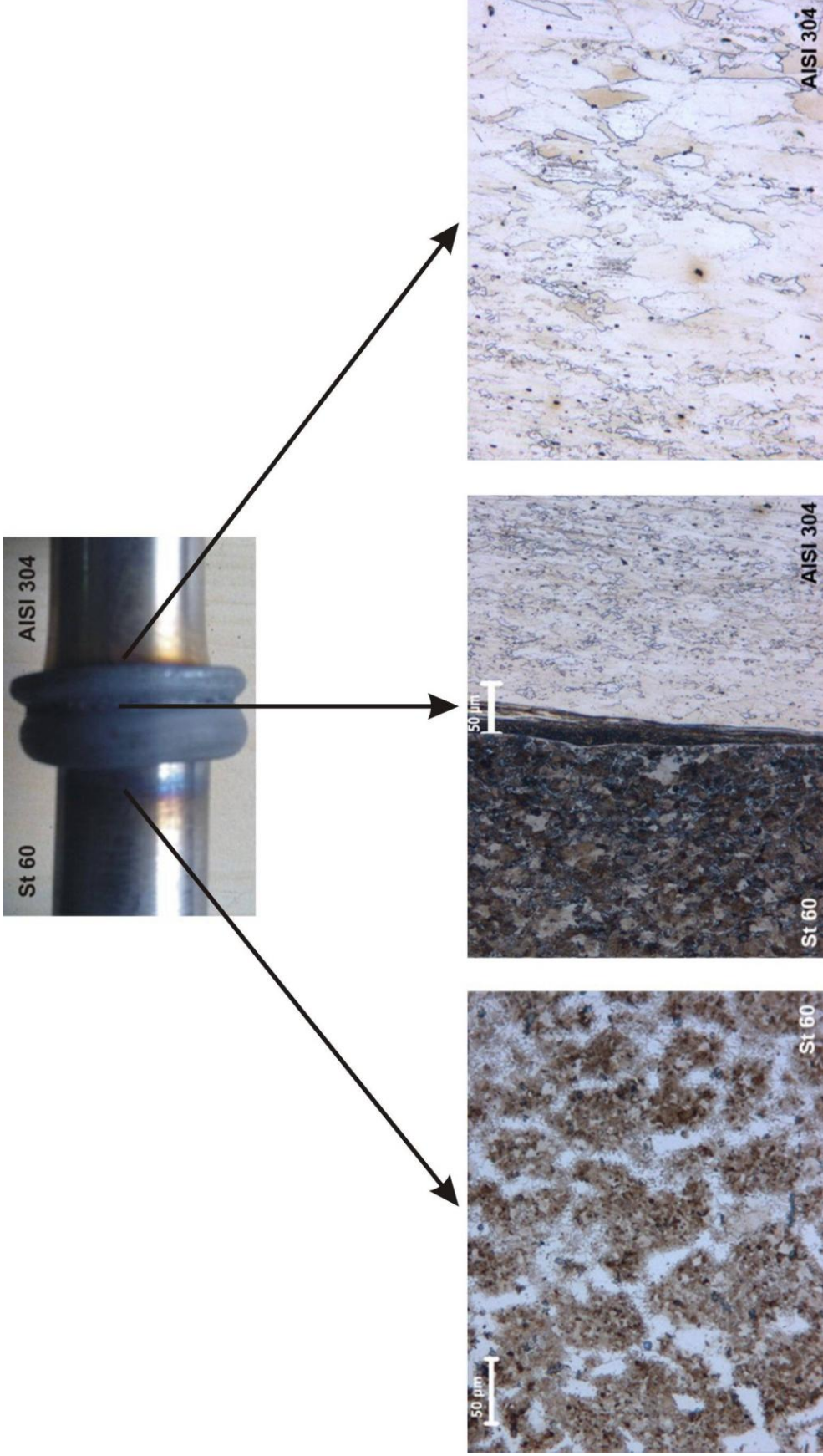


Resim 7.16. 7 numaralı deneye ait birleştirilmiş mikroyapı görüntüleri (x10) (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 7 sn)

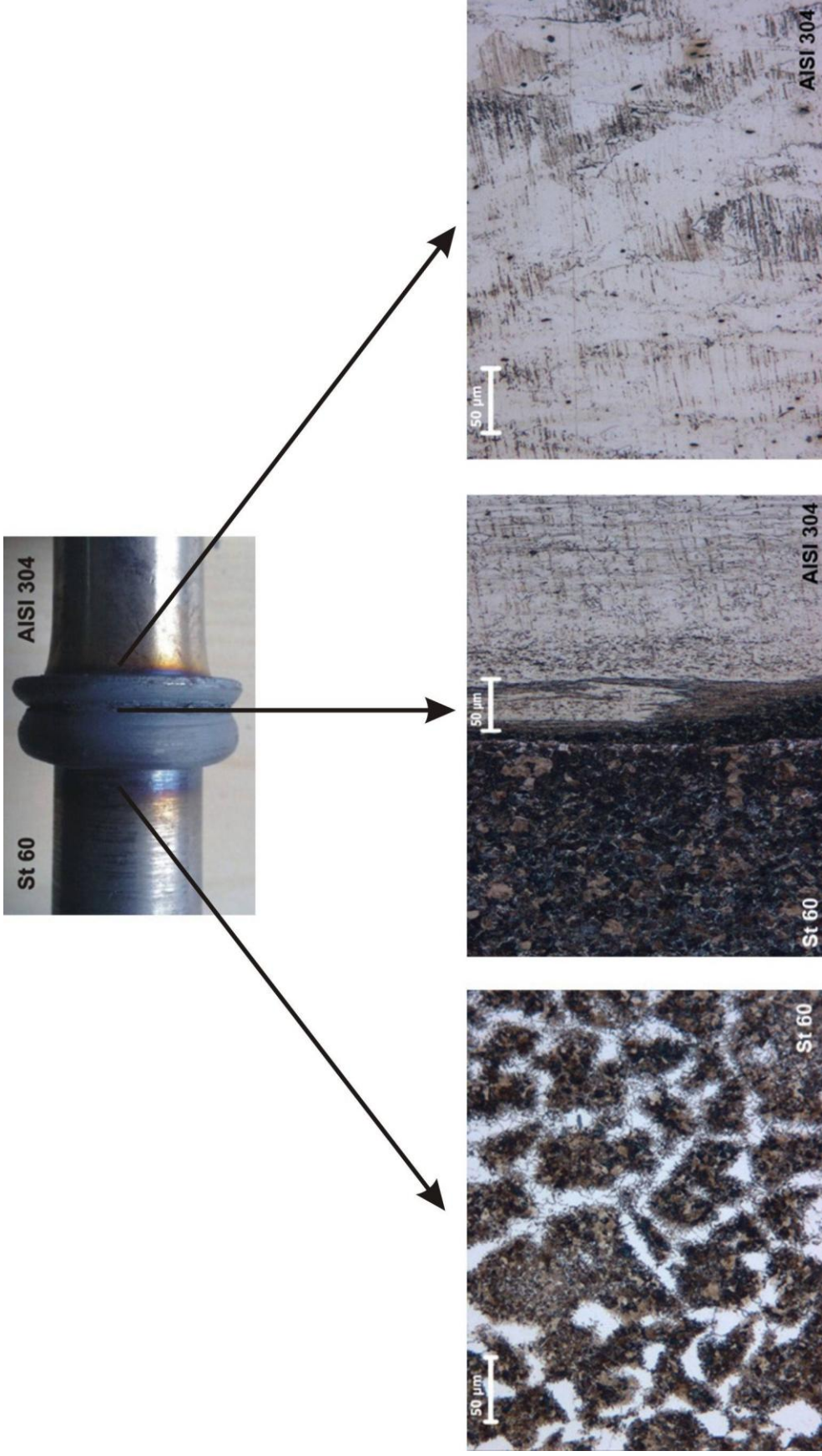
Resim 7.15 ve 7.16'da ise sürtünme ve yığma basınçlarının sabit tutulup en düşük ve en yüksek sürtünme sürelerinde oluşan farklı bölgelerin genişliklerinin belirgin bir şekilde değiştiği görülmektedir. Resim 7.15'de 3 sn sürtünme sresinde birleşme bölgesinin en yakınındaki bölgenin genişliği St 60 tarafında 163µm, AISI 304 tarafında 249 µm ölçülürken Resim 7.16'da 7 sn sürtünme sresinde aynı bölgenin genişliği St 60 tarafında 222 µm, AISI 304 tarafında 319 µm ölçülmüştür. Bu durumun birleşme bölgesinde sreye bağlı olarak oluşan sıcaklık farklılığından meydana geldiği düşünülmektedir.



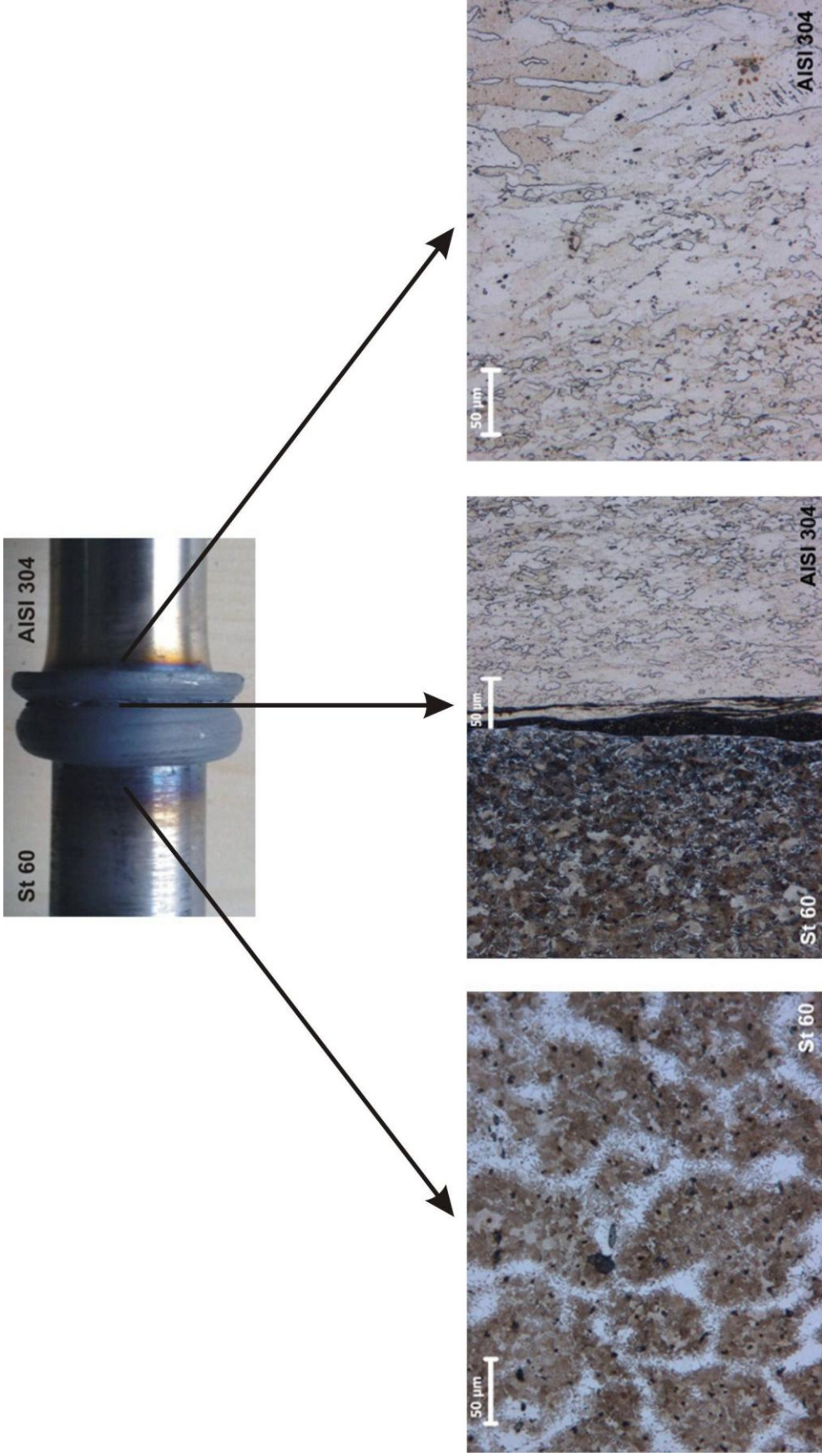
Resim 7.17. 1 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P₁: 30 MPa, P₂: 60 MPa, t: 5 sn)



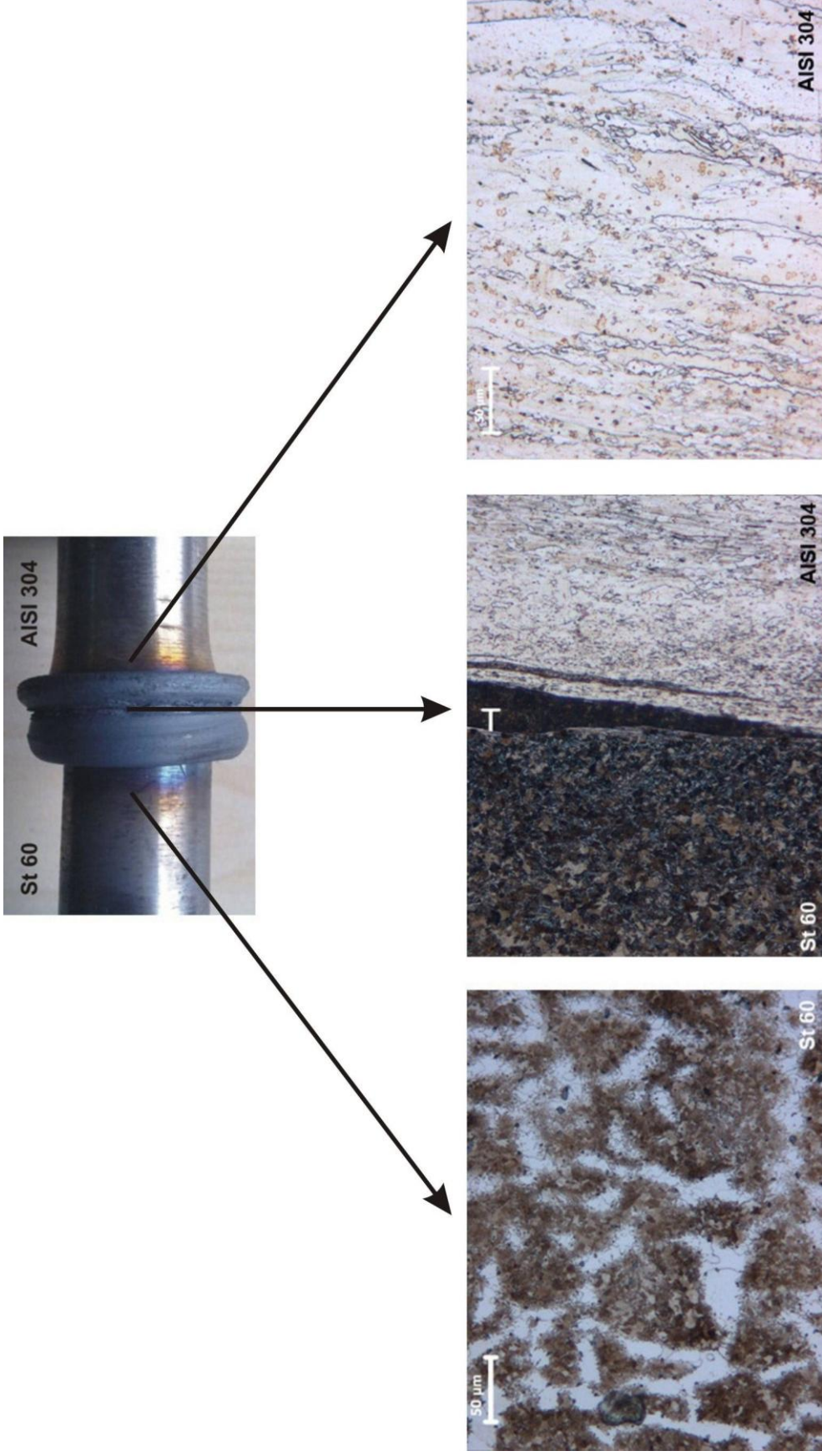
Resim 7.18. 2 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 5 sn)



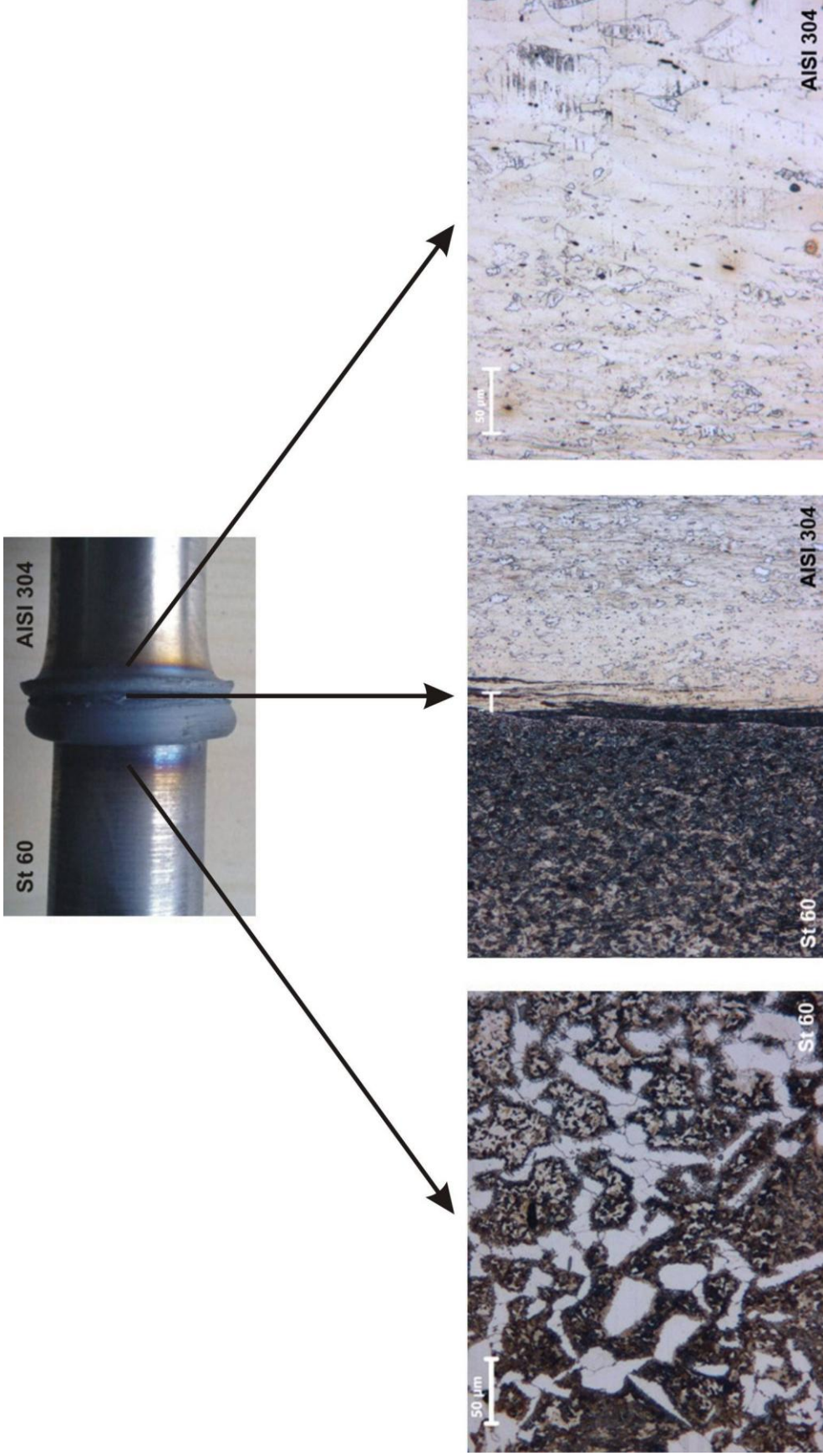
Resim 7.19. 3 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P_1 : 50 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 5 sn)



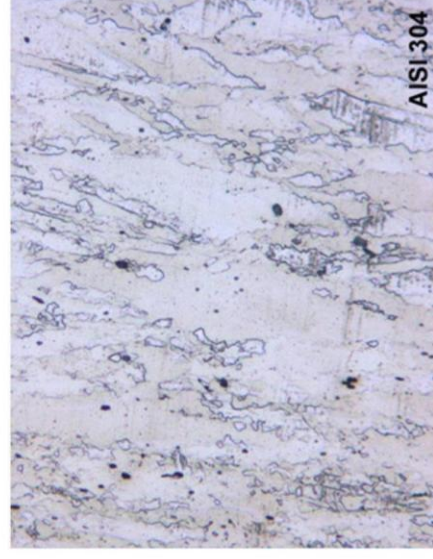
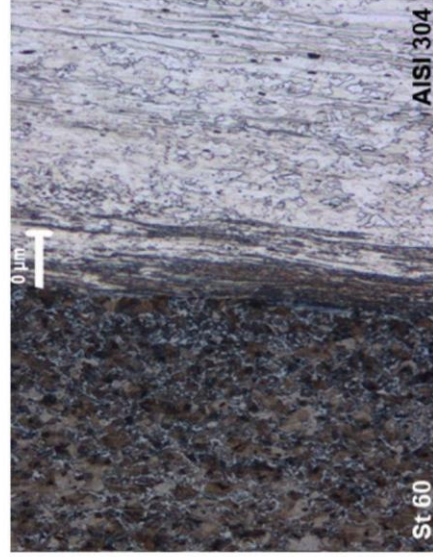
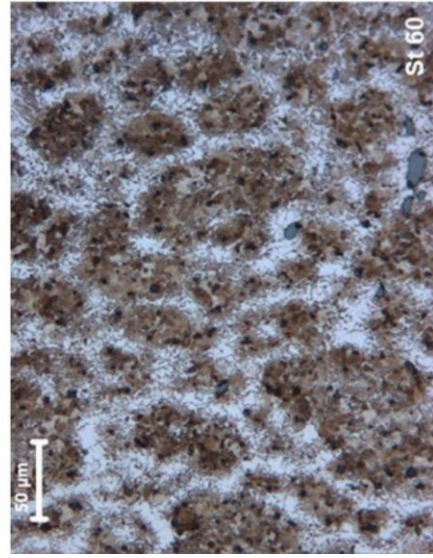
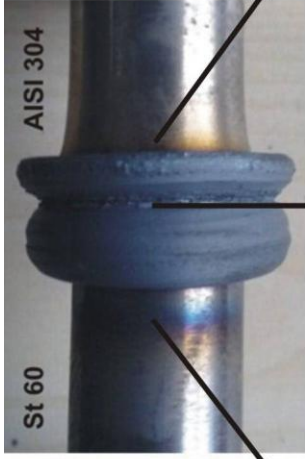
Resim 7.20. 4 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P_1 : 40 MPa, P_2 : 50 MPa, t : 5 sn)



Resim 7.21. 5 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P_1 : 40 MPa, P_2 : 70 MPa, t: 5 sn)



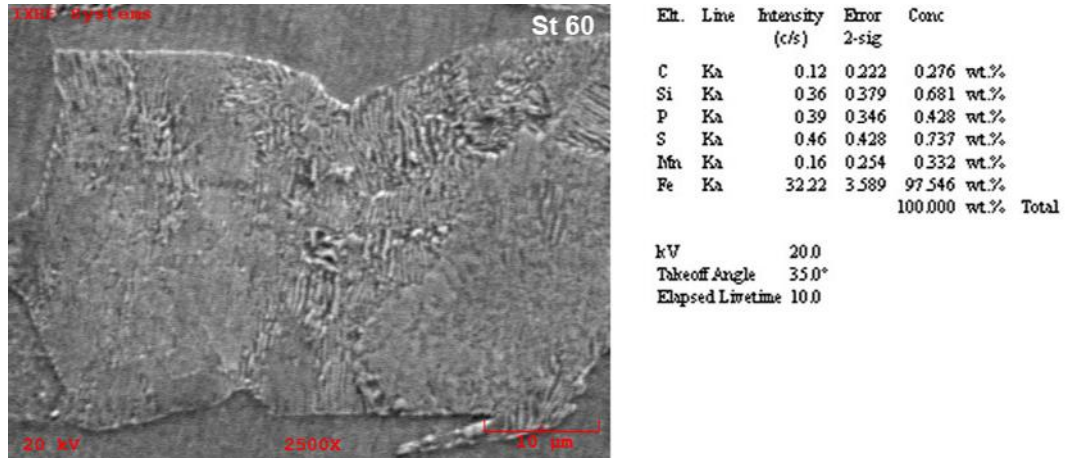
Resim 7.22. 6 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 3 sn)



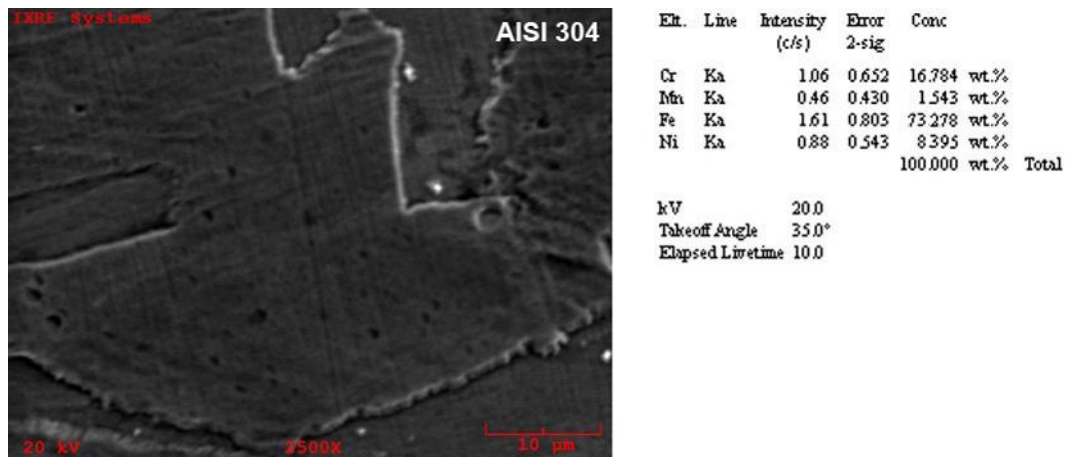
Resim 7.23. 7 numaralı deneye ait birleşme bölgesi görüntüleri (x20) (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 7 sn)

7.3. Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları

Ana malzemelerden elde edilen SEM fotoğrafları ve EDS analiz sonuçları Resim 7.24 ve 7.25’de verilmiştir. Resim 7.24’de St 60 çeliğin, Resim 7.25’de ise AISI 304 paslanmaz çeliğin 2500 büyütme görüntüleri verilmiştir. SEM fotoğrafları tek bir taneyi temsil ettiği için analiz sonuçları, kaynak öncesinde deney numunelerinden alınan analiz sonuçlardan farklılık göstermiştir.

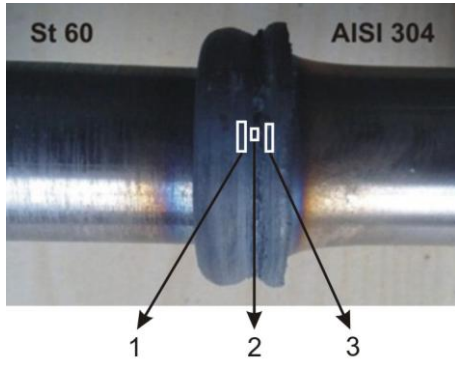


Resim 7.24. St 60 ana metal SEM fotoğrafı ve EDS analiz sonucu (x2500)



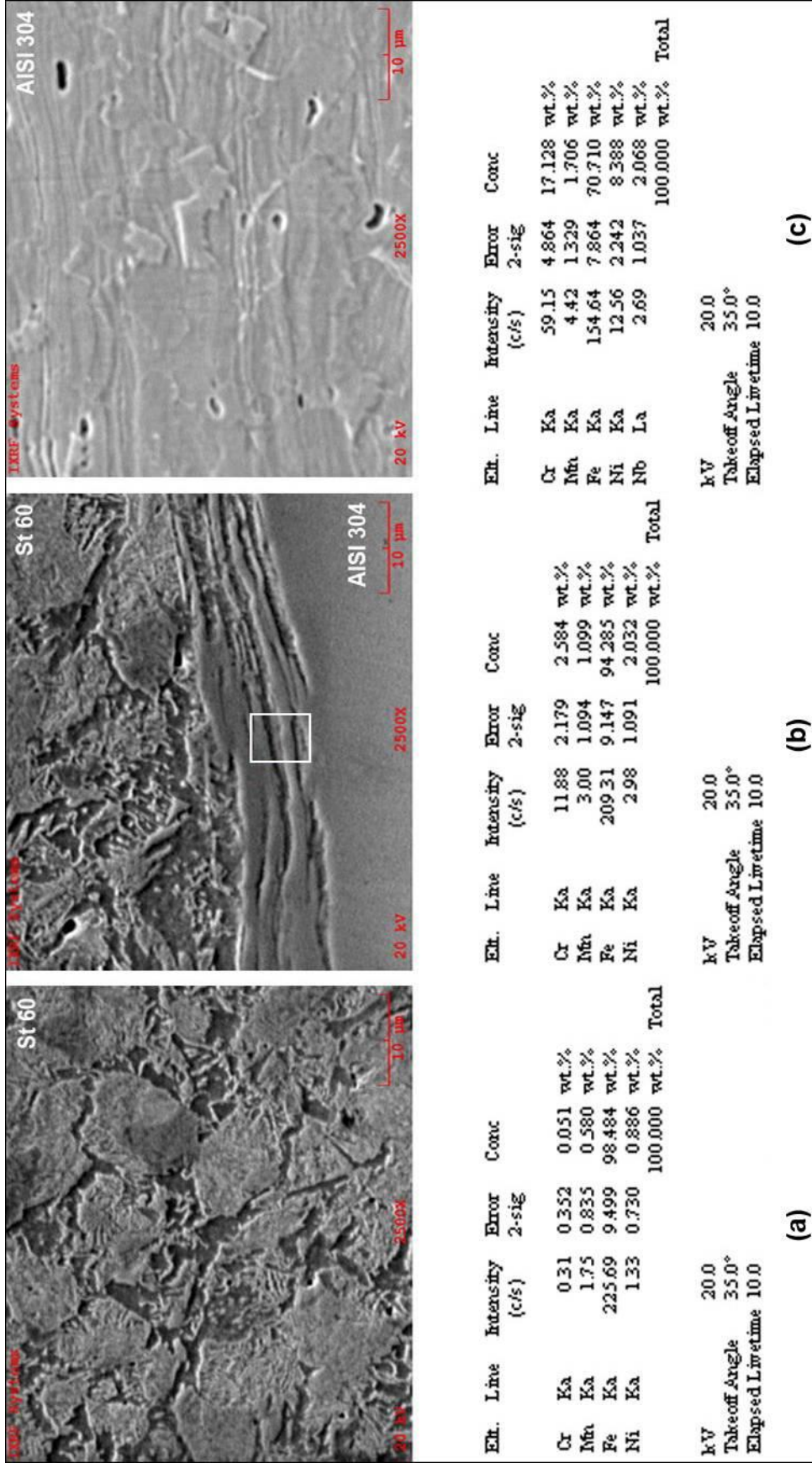
Resim 7.25. AISI 304 ana metal SEM fotoğrafı ve EDS analiz sonucu (x2500)

Birleşme bölgeleri için de, ana metalden alınan görüntülerde olduğu gibi, 2500 büyütme SEM fotoğrafları çekilmiş, EDS sonuçları alınmıştır. Resim 7.26’da SEM fotoğrafı çekilen ve EDS sonuçları alınan bölgeler gösterilmektedir. Numunelerin tümünde birbirine yakın sonuçlar elde edildiğinden, sadece 3 numaralı numuneye ait SEM ve EDS sonuçları verilmiştir.



Resim 7.26. 3 numaralı deney numunesinin SEM ve EDS alınan bölgeleri

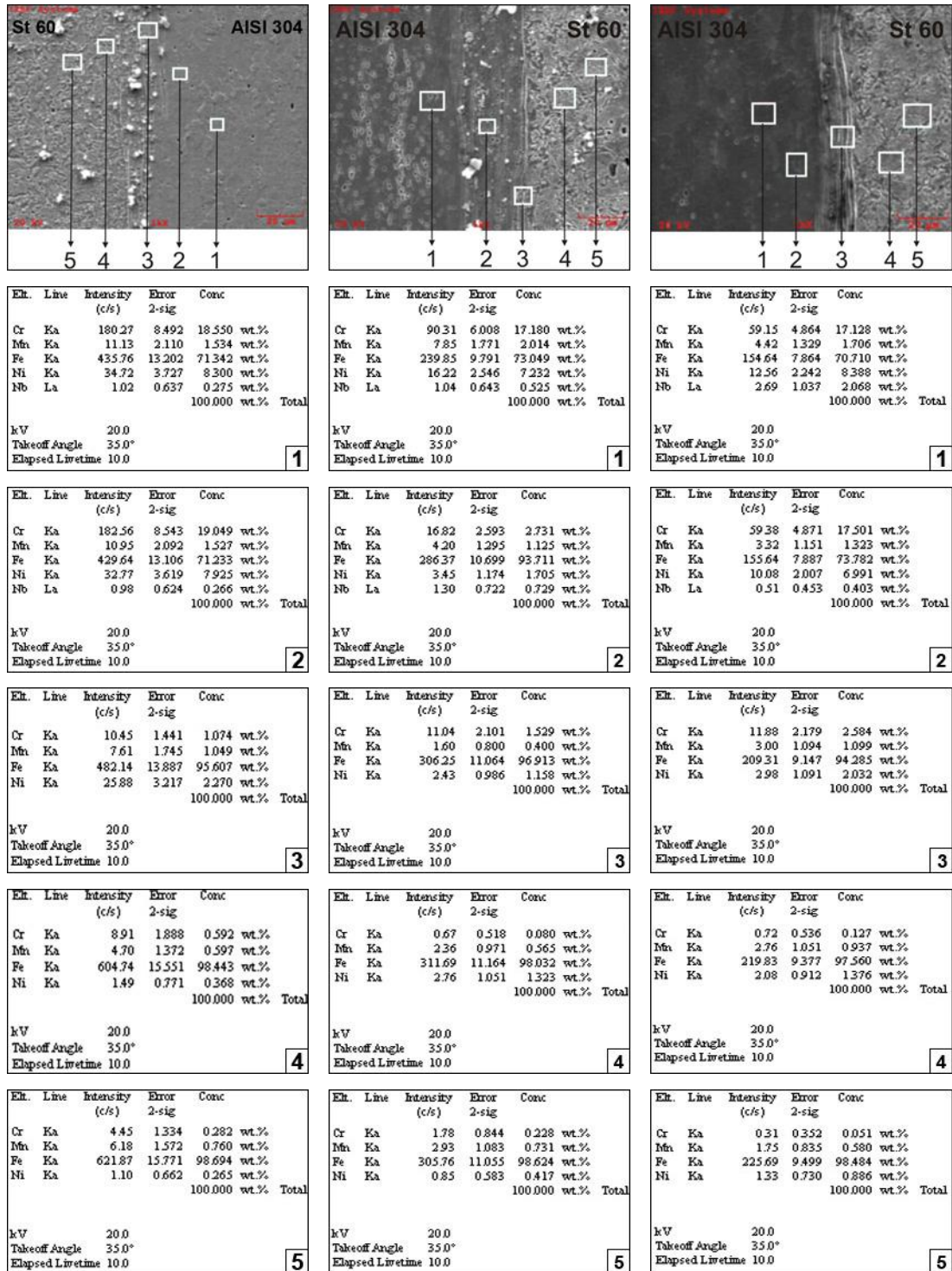
3 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri ve EDS analiz sonuçları Resim 7.27’de verilmektedir.



Resim 7.27. 3 numaralı deney, a) birleşme bölgesi 0,5 mm St 60 tarafı b) birleşme bölgesi c) birleşme bölgesi 0,5 mm AISI 304 tarafı

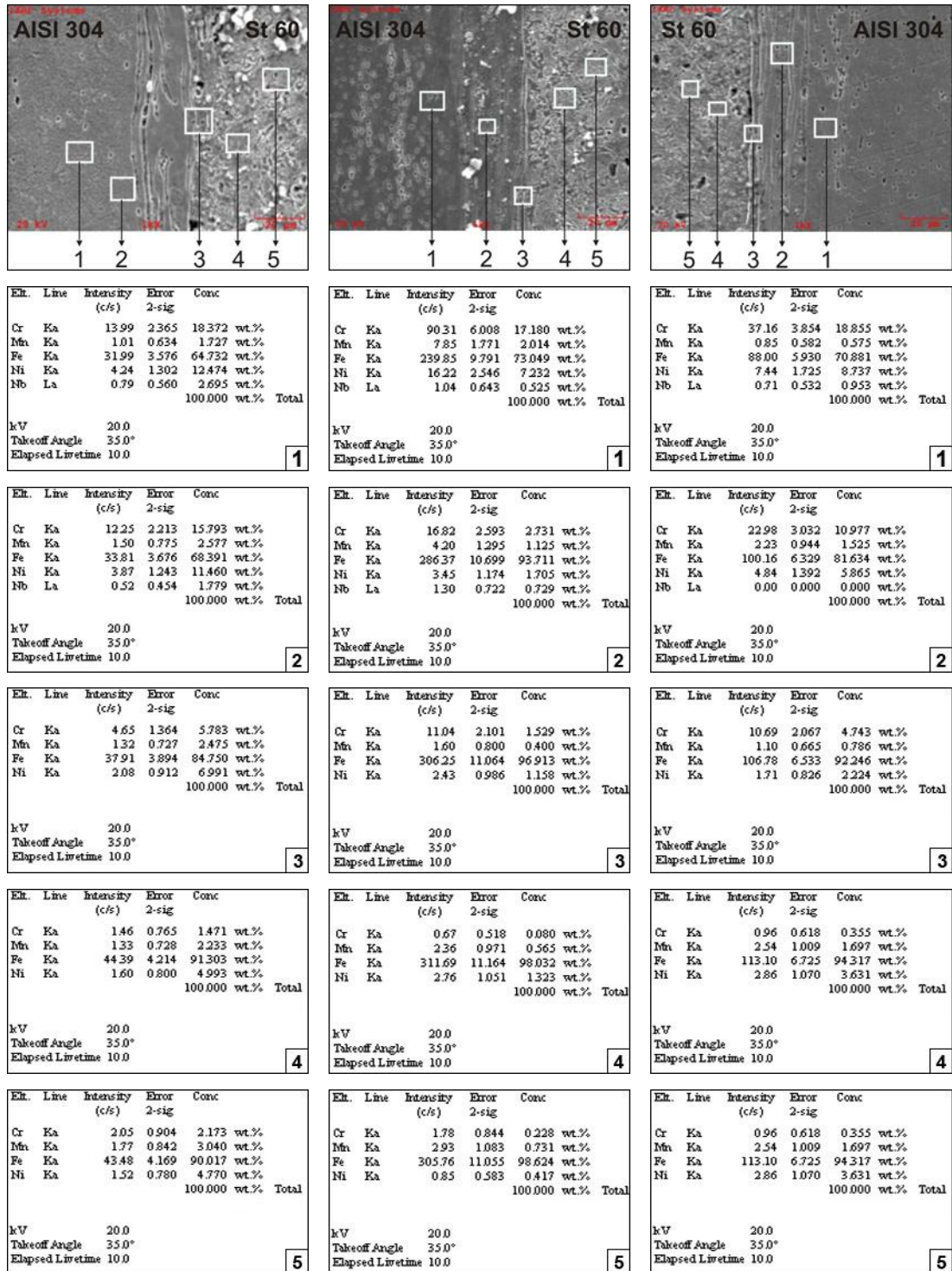
Resim 7.27 incelendiğinde birleşme bölgesinin analiz sonuçlarına göre elementlerde atomik yayınmanın ve mekanik karışımın olduğu anlaşılmaktadır. Kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinin 0,5 mm St 60 tarafından alınan EDS analiz sonuçlarında, çok az miktarda da olsa Cr ve Ni elementlerine rastlanmıştır.

Resim 7.28 - 30'da tüm numunelerin 1000 büyütme SEM fotoğrafları ve beş bölgeden alınan EDS analiz sonuçları verilmiştir. Deney parametrelerinin kaynaklanabilirliğe olan etkileri incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde bütün deneylerde iki malzeme arasında atomik yayınma ve mekanik karışım neticesinde alaşım elementleri oranlarında değişimin meydana geldiği görülmüştür.

1) $P_1: 30 \text{ MPa}$ 2) $P_1: 40 \text{ MPa}$ 3) $P_1: 50 \text{ MPa}$

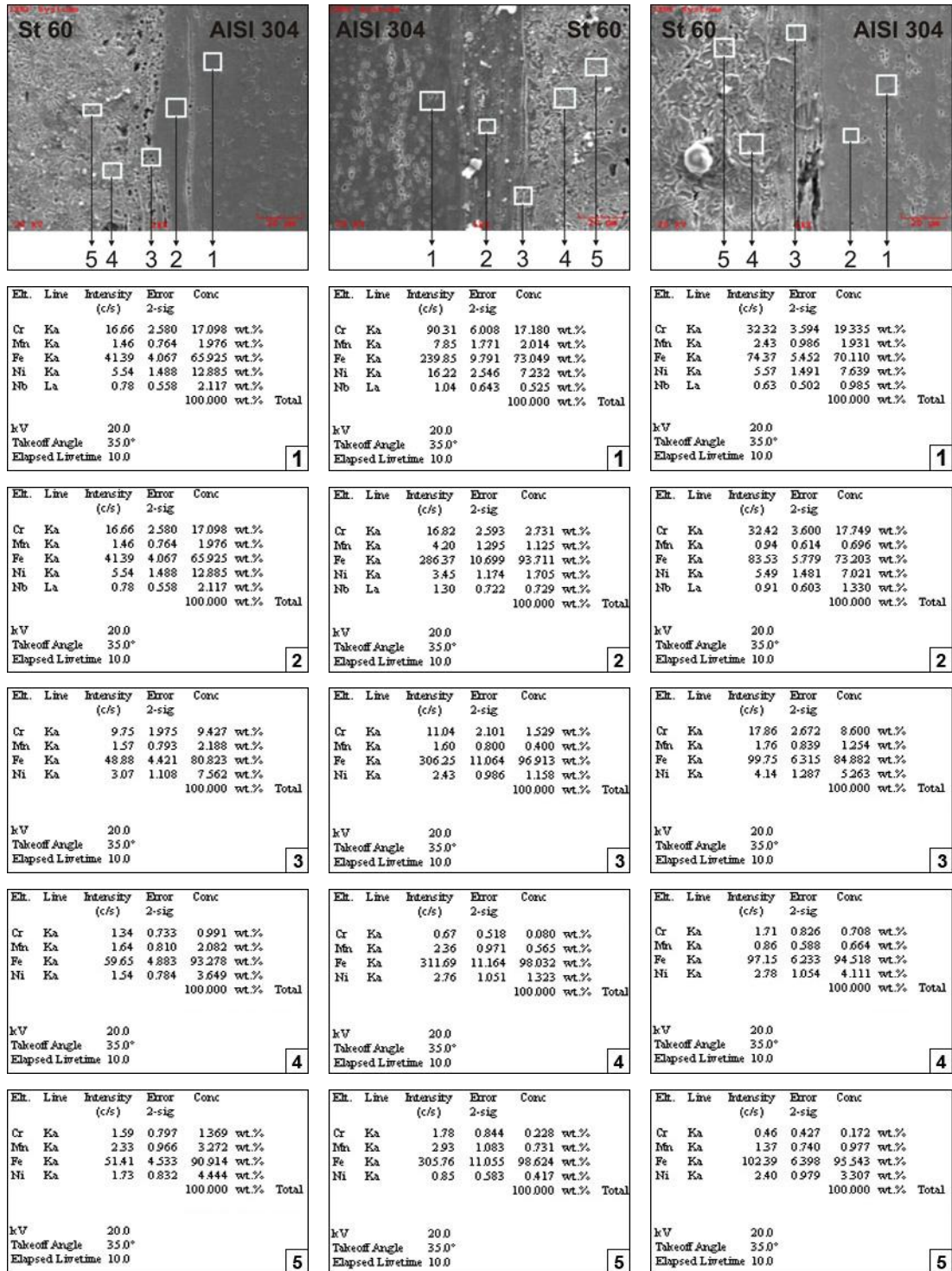
Resim 7.28. 1, 2 ve 3 numaralı deneylere ait EDS analiz sonuçları

Resim 7.28'de sürtünme basıncının değişken olduğu numunelerin 5 farklı bölgelerinden alınan analiz sonuçları incelendiğinde 3 numaralı analiz sonuçlarında sürtünme basıncının artmasıyla yayınan alaşım elementleri oranının da arttığı görülmüştür. 3 numaralı bölgede 30 MPa sürtünme basıncında Cr (% 1.074) ve Ni (% 2.270), 40 MPa sürtünme basıncında Cr (% 1.529) ve Ni (% 1.158), 50 MPa sürtünme basıncında Cr (% 2.584) ve Ni (% 2.032) olarak ölçülmüştür. 4 ve 5 numaralı analiz sonuçları incelendiğinde St 60 malzeme tarafında Cr ve Ni elementlerinin görülmesi malzemelerde difüzyonun gerçekleştiğini doğrulamaktadır. 40 MPa sürtünme basıncında 4 numaralı bölgede Cr (% 0.080) ve Ni (% 1.323) bulunmuştur. Benzer durum Din, D.'nin çalışmalarında da rapor edilmiştir [Din, 2006].

1) P₂: 50 MPa2) P₂: 60 MPa3) P₂: 70 MPa

Resim 7.29. 4, 2 ve 5 numaralı deneylere ait EDS analiz sonuçları

Resim 7.29’da yığıma basınçlarının değişken olduğu numunelerin analiz sonuçları incelendiğinde 3 numaralı birleşme bölgesinin analizinde yayınan alaşım elementleri oranlarının sürtünme basıncının değişken olduğu deneylerdeki oranlardan daha fazla olduğu görülmüştür. 50 MPa yığıma basıncında 3 numaralı bölgede Cr ve Ni elementi oranları Cr (% 5.783) ve Ni (% 6.991) olarak bulunmuştur. 70 MPa yığıma basıncında ise aynı bölgeden alınan değerler Cr (% 4.743) ve Ni (% 2.224) bulunmuştur.



1) t: 3 sn

2) t: 5 sn

3) t: 7 sn

Resim 7.30. 6, 2 ve 7 numaralı deneylere ait EDS analiz sonuçları

Resim 7.30'da ise sürtünme süresinin değişken olduğu deneylerde 3 numaralı birleşme bölgesi analiz sonuçlarının yığılma basıncının değişken olduğu deneylerdeki sonuçlardan daha yüksek olduğunu görüyoruz. 3 sn gibi kısa sürede kaynatılan deney numunesinin 3 numaralı birleşme bölgesinde en yüksek Cr (% 9,427) ve Ni (% 7,562) oranlarının görülmesinin elementlerin difüzyonundan kaynaklı olmadığı, burada meydana gelen kısa süreli düzensiz karışmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak birleşme hattından alınan EDS analiz sonuçlarında, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı ve yığılma basıncının yayınan alaşım elementleri oranlarına ve mekanik karışımın daha kolay olmasına etki ettiği söylenebilir. Daha önce yapılan mikroyapı incelemelerinde de, sürtünme süresi, sürtünme basıncı ve yığılma basıncının deformasyon ve yayınmaya etki ettiği görülmüştü. Element yüzdeleri karşılaştırıldığında ise en etkili parametrenin sürtünme süresi ve yığılma basıncı olduğu görülmüştür.

7.4. Sertlik Deneyi Sonuçları

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen St 60 çelik malzeme ile AISI 304 paslanmaz çeliğin 1 kgf'lik yük uygulanarak yatay ekseninde 25 noktadan alınan mikrosertlik ölçümleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Şekil 7.2'de farklı sürtünme basınçlarında, Şekil 7.3'de farklı yığılma basınçlarında ve Şekil 7.4'de farklı sürtünme sürelerinde kaynatılan deney numunelerine ait yatay ekseninde alınan sertlik değerleri verilmiştir. Şekil 7.5'de ise numunelerin sertlik değerleri toplu halde verilmiştir. Grafiklerin sol tarafındaki ölçümler St 60 malzemeye, sağ taraftaki ölçümler ise AISI 304 paslanmaz çeliğe aittir.

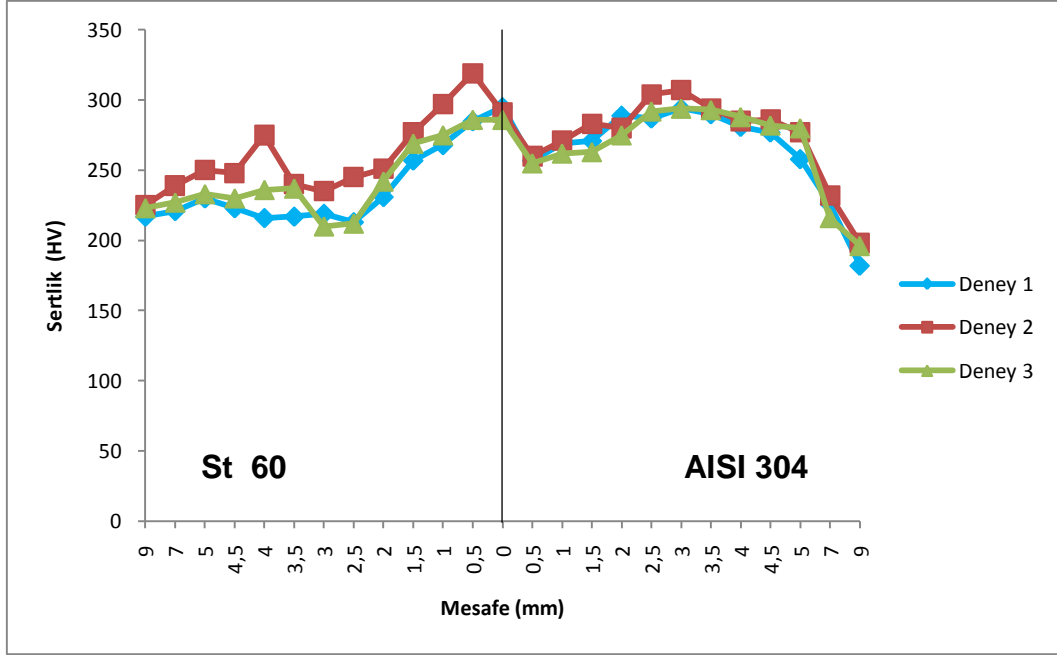
Çizelge 7.1'deki sertlik değerlerine bakıldığında merkez olarak adlandırılan kaynak ara yüzeyinde ki sertlik değerlerinde malzemelerin ana metal sertlik değerlerine (St 60 212 HV, AISI 304 185 HV) göre artış olduğu gözlenmiştir. Kaynak ara yüzeyinden ana metale doğru gidildikçe artan-azalan değerler ölçülmüştür. En

yüksek sertlik değeri 338 HV ile 6 numaralı numunede, en düşük sertlik değeri ise 167 HV ile 4 numaralı numunede ölçülmüştür.

Yatay ekseninde alınan sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek ve en düşük sertlik değerlerinin sürtünme kaynak parametrelerinin soğuma hızı, deformasyon setleşmesi ve farklı sert fazların oluşumuna olan etkisinin sebep olduğu söylenebilir. Bu parametrelerden sürtünme süresinin bu değişimde etkin rol oynadığı düşünülmektedir. Sürtünme süresi en düşük olan 6 numaralı numunede en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmasında ısı girdisinin az olması ve soğuma süresinin hızlı olmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7.1. Sertlik deney sonuçları

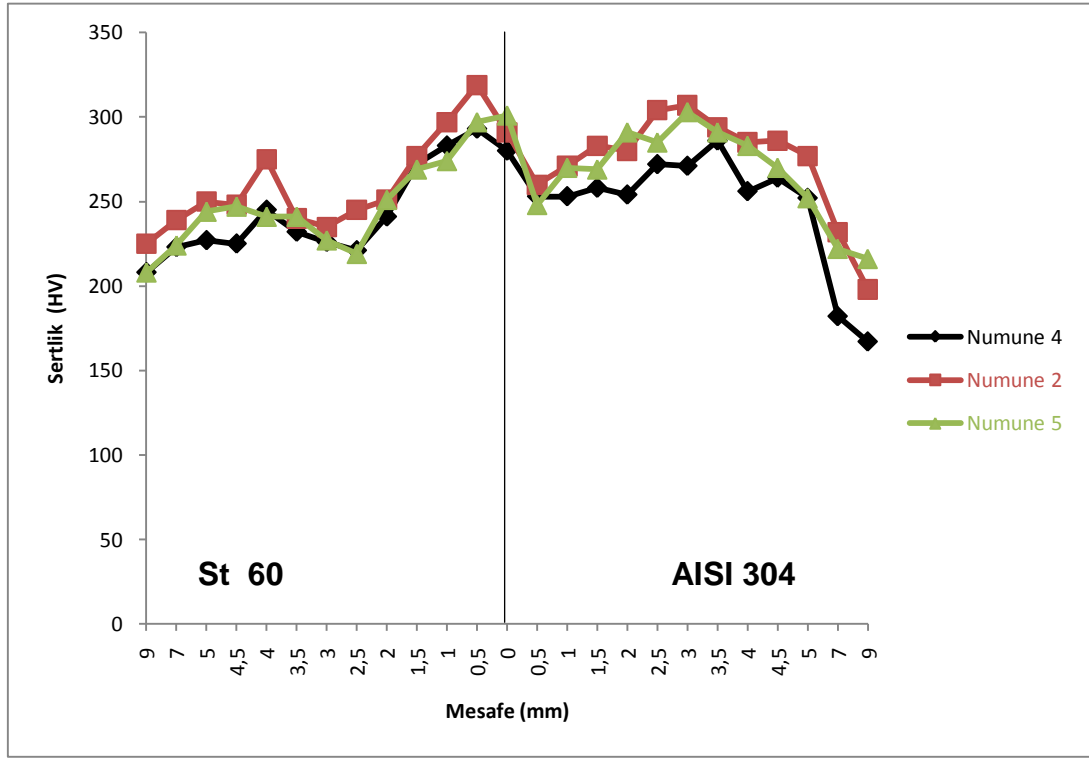
Sertlik Bölgeleri (mm)	Sertlik Değerleri (HV)						
	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5	Deney 6	Deney 7
9,0 (St 60)	217	225	223	208	208	207	232
7,0 (St 60)	221	239	227	223	224	214	233
5,0 (St 60)	230	250	233	227	244	239	246
4,5 (St 60)	223	248	230	225	247	216	235
4,0 (St 60)	216	275	236	245	241	236	232
3,5 (St 60)	217	240	237	232	241	243	226
3,0 (St 60)	219	235	210	226	227	247	236
2,5 (St 60)	213	245	212	221	219	235	232
2,0 (St 60)	231	251	242	241	251	233	247
1,5 (St 60)	257	277	269	272	269	245	251
1,0 (St 60)	268	297	275	283	274	299	270
0,5(St 60)	285	319	286	293	297	338	278
Merkez	295	291	286	280	301	301	280
0,5 (AISI 304)	257	260	255	253	248	258	259
1,0 (AISI 304)	269	271	262	253	270	266	274
1,5 (AISI 304)	271	283	263	258	269	238	260
2,0 (AISI 304)	289	280	275	254	291	288	283
2,5 (AISI 304)	287	304	292	272	285	280	282
3,0 (AISI 304)	294	307	294	271	303	284	276
3,5 (AISI 304)	290	294	293	286	291	302	292
4,0 (AISI 304)	281	285	288	256	283	264	278
4,5 (AISI 304)	277	286	282	264	270	252	276
5,0 (AISI 304)	264	277	280	252	252	230	256
7,0 (AISI 304)	226	232	216	182	222	205	207
9,0 (AISI 304)	182	198	196	167	216	185	170



Şekil 7.2. 1, 2 ve 3 numaralı deneylere ait yatay eksendeki sertlik değişimi

Şekil 7.2’de yığılma basıncı ve sürtünme süresinin sabit tutulup sürtünme basıncının değişken olduğu (30, 40 ve 50 MPa) 1, 2 ve 3 numaralı deney numunelerinin sertlik grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin 2 numaralı deneyin (40 MPa sürtünme basıncı) birleşme bölgesinin 0,5 mm St 60 tarafında 319 HV ölçülmüştür. 1, 2 ve 3 numaralı deneylerin birleşme bölgesindeki sertlik değerleri sırasıyla 295, 291 ve 286 olarak ölçülmüştür. Birleşme bölgesinden ana metallere doğru gidildiğinde sertlik miktarlarının azalan artan bir eğri şeklini aldığı görülmektedir. Grafiğe bakıldığında St 60 çelik tarafında ölçülen sertlik değerlerinin, AISI 304 paslanmaz çelik tarafında ölçülen değerlerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sertlik değeri farklılığında malzemelerin tane yapısının etken olduğu düşünülmektedir. Resim 7.5 - 7.6 - 7.7’de verilen mikroyapı fotoğrafından da görüleceği üzere St 60 çelik tarafındaki tane yapısı kaynak bölgesine çok yakın yerlerden başlamak üzere genelde eş eksenli - küresel tanelerden oluşmaktadır. AISI 304 östenitik paslanmaz çelikte ise ana metale kadar farklı bir tane yapısı gözlemlenmektedir.

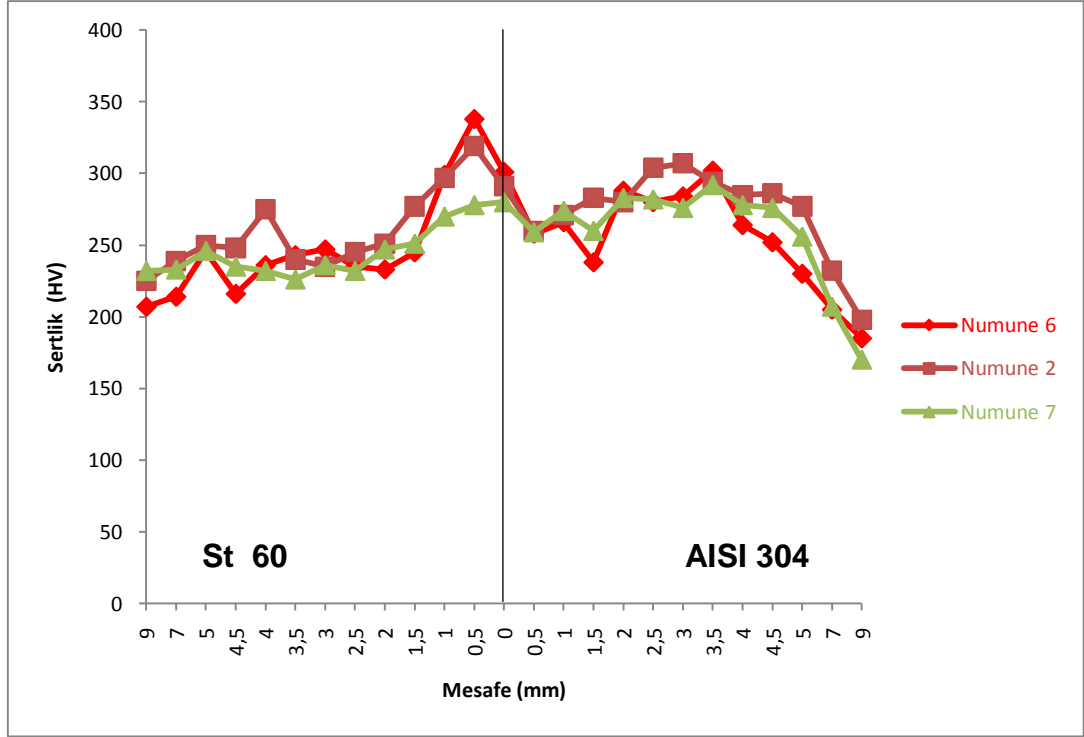
Ana metallerdeki sertlik değerlerine bakıldığında ise tam tersi bir durum söz konusudur. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin sertlik değeri St 60 çelik malzemenin sertlik değerinden daha düşük çıkmaktadır. Bunda ısıdan etkilenilmeyen bölgelerde ıslah edilmiş östenit tanelerinin daha düşük sertlik değerleri göstermesi neden olmaktadır. Çizelge 6.2’de ana malzemelerin mekanik özellikleri incelendiğinde AISI 304 paslanmaz çeliğin sertlik değerinin, St 60 malzemedan daha düşük değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.3. 4, 2 ve 5 numaralı deneylere ait yatay eksenindeki sertlik değişimi

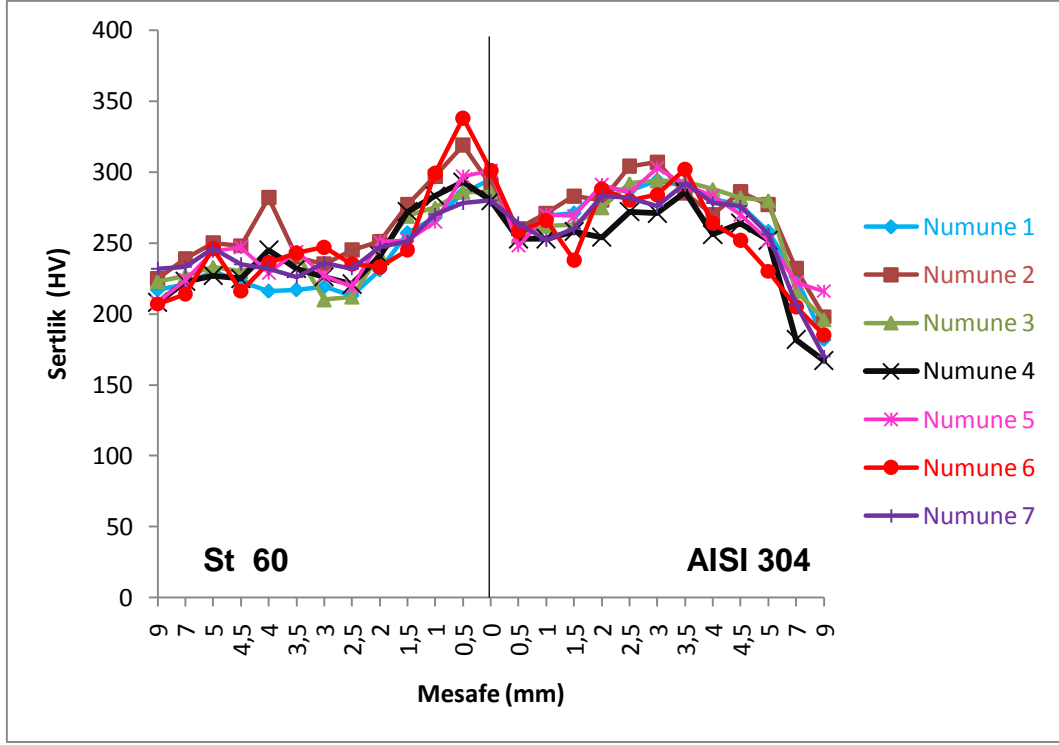
Şekil 7.3’de sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin sabit tutulup yığma basıncının değişken olduğu (50, 60 ve 70 MPa) 4, 2 ve 5 numaralı deney numunelerinin sertlik grafiği verilmiştir. Şekil 7.3’de grafik görüntüsü 1, 2 ve 3 numaralı deneylerden elde edilen grafik görüntüsüne benzerdir. Birleşme bölgesindeki sertlik değerleri sırasıyla 280, 291 ve 301 ölçülmüştür. Yığma basıncının artmasıyla birleşme bölgesindeki sertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bu duruma deformasyon sertleşmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Resim 7.6 – 7.8 – 7.9’da verilen mikroyapı fotoğrafı

ile paralel olarak değerlendirilen sertlik değerlerinde tane yapısı morfolojisindeki değişimin sertlik değerlerinde değişikliklere neden olduğu görülmüştür.



Şekil 7.4. 6, 2 ve 7 numaralı deneylere ait yatay eksenindeki sertlik değişimi

Şekil 7.4'de sürtünme ve yığıma basıncı sabit tutulup sürtünme süresinin değişken olduğu (3, 5 ve 7 sn) 6, 2 ve 7 numaralı deney numunelerinin sertlik grafiği verilmiştir. Şekil 7.4'de en yüksek sertlik değeri 6 numaralı deney numunesinin (3 sn sürtünme süresi) birleşme bölgesinin 0,5 mm St 60 tarafında 338 HV olarak ölçülmüştür. Birleşme bölgesinin sertlik değerleri sırasıyla 301, 295 ve 280 ölçülmüştür. Sürtünme süresinin artmasıyla birleşme bölgesindeki sertlik değerlerinde düşme meydana gelmiştir. Meydana gelen bu düşüşün artan sürtünme süresiyle ısınmanın artması ve en çok ısınan bölgenin geç soğumasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme süresinin en düşük olduğu 6 numaralı deney numunesinde sertlik değerleri içerisinde belirgin artma ve azalmalar gözlenirken, sürtünme süresinin en yüksek olduğu 7 numaralı deney numunesinde ise ısının etkisiyle birbirine çok yakın sertlik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 7.5. Tüm deney numunelerin yatay eksenindeki sertlik değişimleri

Şekil 7.5 tüm numunelerden yatay ekseninde alınan sertlik değerlerini göstermektedir. Birleşme bölgesinde, 6 numaralı numunede en yüksek sertlik değeri görülürken, 7 numaralı numunede en düşük sertlik değerlerine rastlanılmıştır. Diğer deney numunelerinde ise birbirlerine yakın sertlik değerleri elde edilmiştir. Buradan sonuç olarak, sürtünme süresinin en belirleyici parametre olduğunu söylemek mümkündür. Yığılma basıncı ve sürtünme basıncının değişken olarak verildiği deneylerde ise birbirine yakın sertlik değerlerinin elde edilmesinden bu parametrelerin sertlik değerlerinin değişiminde, sürtünme süresi gibi etki etmediği görülmüştür.

Numunelerde farklı sertlik değerlerinin ölçülmesinde sürtünme süresinin artırılması ile numunelere uygulanan ısının artmasının yanı sıra soğuma hızı da sertlik değerlerinin değişiminde etkili olmuştur. Az ısınan malzemeler daha hızlı soğuyacağından bu malzemeler ısının daha etkin olduğu malzemelere oranla daha sert değerlere sahip olmuştur. Ayrıca, özellikle birleşme bölgesine yakın bölgelerde

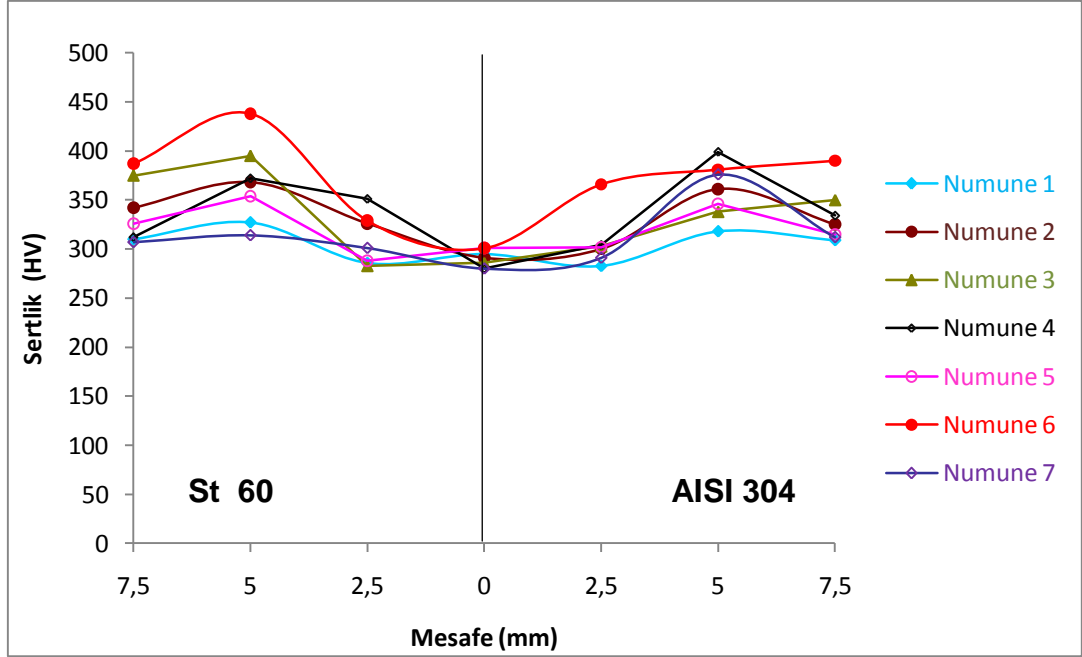
deformasyon nedeniyle oluşan deformasyon sertleşmesinin de bu bölgelerdeki sertlik değerlerini arttırdığı düşünülmektedir.

Farklı iki malzemenin birleştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmada [Paylaşan, 2000] en yüksek sertlik değerlerinin kaynak ara yüzeyinde elde edildiği, ana metale doğru belli bir eğimle sertlikte düşme olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma yukarıda sonuçları verilen çalışmadan kısmen farklılık göstermektedir. Çünkü burada St 60 malzemenin 0,5 mm mesafesinde en yüksek değerler elde edilirken hem St 60 ve hem de AISI 304 tarafında düşüş gözlemlenmiştir.

Sürtünme kaynağıyla birleştirmeleri gerçekleştirilen numunelerin birleşme bölgesinden alınan dikey eksendeki sertlik değerleri Çizelge 7.2’de, toplu haldeki sertlik grafiği ise Şekil 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.2. Dikey eksenden alınan sertlik değerleri

Sertlik Bölgeleri (mm)	Sertlik Değerleri (HV)						
	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5	Numune 6	Numune 7
7,5	310	342	375	312	326	387	307
5,0	327	368	395	372	354	438	314
2,5	286	326	283	351	288	329	301
Merkez	295	291	286	280	301	301	287
2,5	283	300	303	304	302	366	291
5,0	318	361	338	399	346	381	376
7,5	309	325	350	334	315	390	312



Şekil 7.6. Dikey eksenden alınan sertlik değerleri

Çizelge 7.2 ve Şekil 7.6’da verilen dikey eksenden alınan sertlik değerleri incelendiğinde; en yüksek sertlik değeri 438 HV ile 6 numaralı numunede (P1: 40 MPa, P2: 60 MPa ve t: 3 sn), en düşük sertlik değeri ise 280 HV ile 4 numaralı numunede (P1: 40 MPa, P2: 50 MPa ve t: 5 sn) ölçülmüştür. Burada elde edilen farklı sertlik değerlerinin ölçülmesinde kaynak merkezinden kenarlara doğru gidildiğinde daha az ısı girdisi oluşması ve buradaki soğuma hızının kaynağın merkezinden daha hızlı olması nedeniyle kenarlarda daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. En düşük sertlik değerleri ise en fazla ısıya maruz kalan ve soğuma hızının en yavaş olduğu kaynak merkezinde gerçekleşmiştir. Dikey eksende, kaynak ara yüzeyinin merkezinden çevreye doğru gidildikçe sertlik değerinin arttığı, uç noktaya yaklaştığında ise düşüşe geçtiği gözlenmiştir. En yüksek sertlik değerleri kaynak merkezinden 5 mm dikey mesafede ölçülmüştür.

7.5. Çekme Deneyi Sonuçları

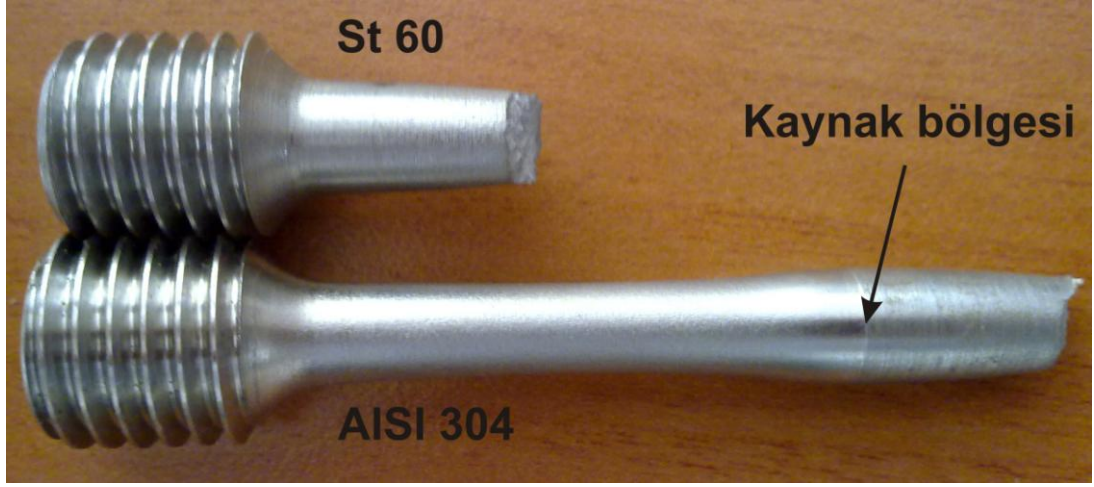
AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ve St 60 çeliğinin sürtünme kaynağı yapılmadan çekme deneyleri üçer numune olarak gerçekleştirilmiş ve paslanmaz çeliğin ortalama

akma dayanımı 379,3 MPa ve çekme dayanımı 714 MPa bulunurken, St 60 çeliğinin ortalama akma dayanımı 407,9 MPa ve çekme dayanımı 655,9 MPa bulunmuştur. Çekme deneyine tabi tutulan sürtünme kaynaklı numunelerin son boyları ve çapları ölçülmüş ve deney numunelerinin her birinin % uzama ve % kesit daralmaları hesaplanmıştır. Numuneler için elde edilen çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma dayanımı, % uzama ve % kesit daralma değerleri Çizelge 7.3’de verilmiştir.

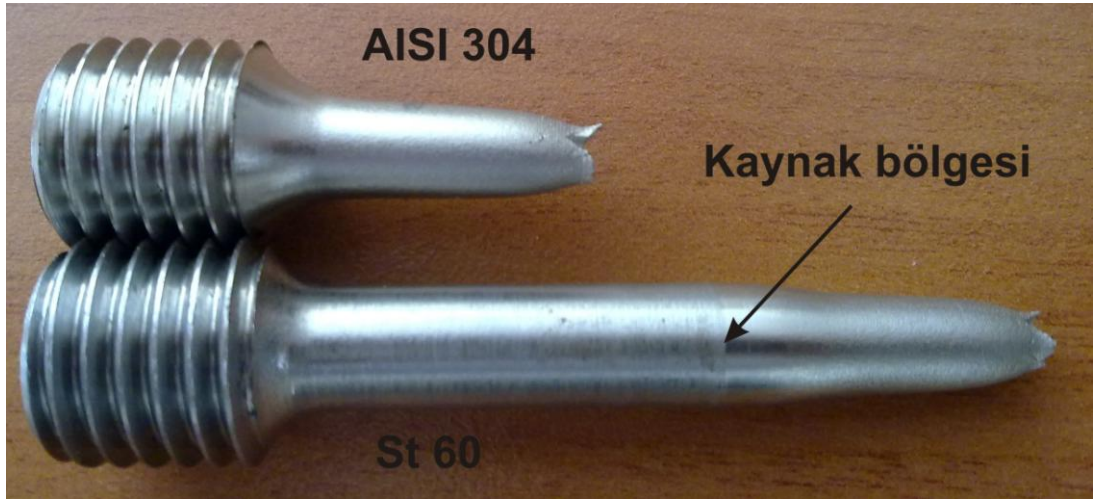
Çizelge 7.3. Çekme deneyi sonuçları

	% Uzama (mm)	% Kesit Daralması (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)
Deney 1	32,80	24,08	299,2	655,7	570,1
Deney 2	33,20	18,16	302,1	656,7	534,5
Deney 3	33,00	19,24	306,5	661,5	599,9
Deney 4	34,10	18,88	307,4	655,6	579,9
Deney 5	28,20	22,39	327,4	670,0	588,4
Deney 6	38,60	19,10	295,7	657,9	609,7
Deney 7	35,40	42,00	309,6	659,1	465,1

Çizelge 7.3’de verilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek akma ve çekme dayanımının (327,4 MPa akma dayanımı, 670 MPa çekme dayanımı) 5 numaralı deney numunesinde, en düşük akma dayanımının (295,7 MPa) 6 numaralı deney numunesinde, en düşük çekme dayanım değerinin (655,6 MPa) ise 4 numaralı deney numunesinde olduğu görülmektedir.



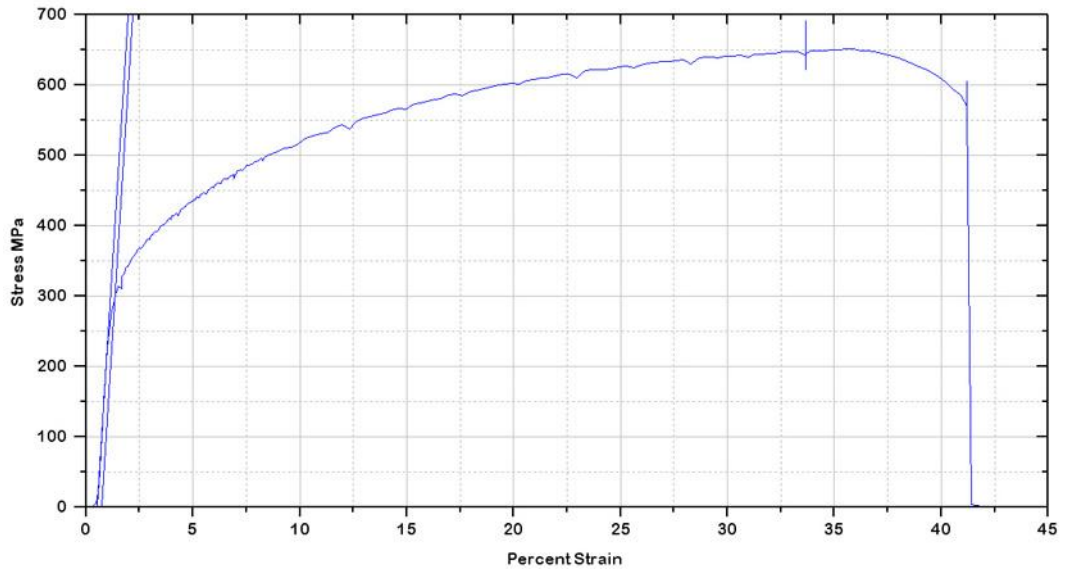
Resim 7.31. St 60 tarafından kopmuş deney numunesi



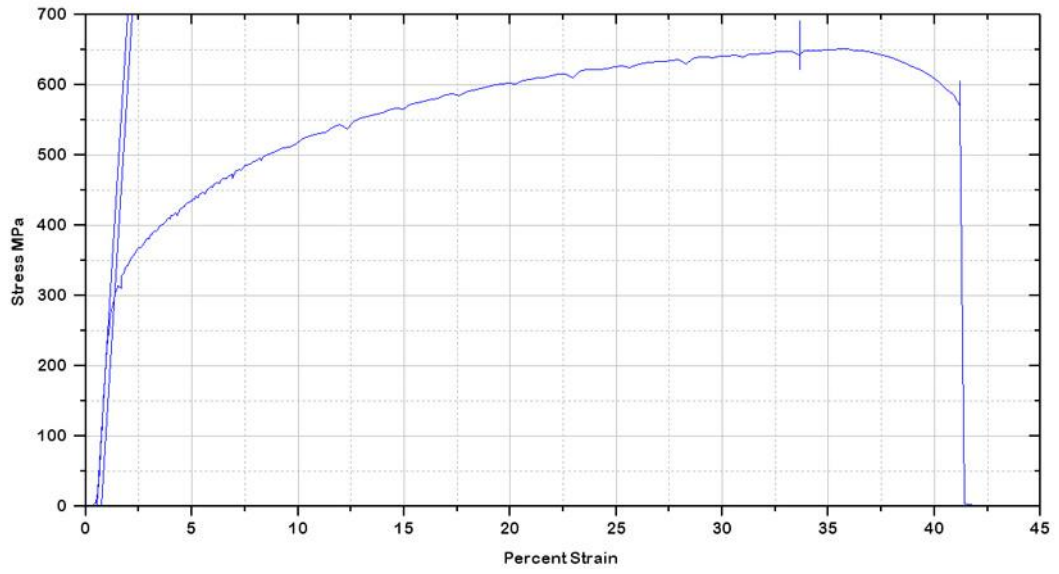
Resim 7.32. AISI 304 tarafından kopmuş deney numunesi

Kopma noktaları incelendiğinde ise 7 numaralı deney hariç diğerlerinin St 60 çelik tarafından koptuğu görülmüştür. Kopmaların, kaynak bölgelerinden uzakta, ana malzeme tane yapısının hakim olduğu bölgelerde gerçekleştiği görülmüştür. Resim 7.31 ve 7.32’de kopmuş çekme numunelerinin fotoğrafları verilmiştir. Resim 7.31’de St 60 tarafından, Resim 7.32’de ise AISI 304 tarafından kopan çekme numunelerinin fotoğrafları görülmektedir.

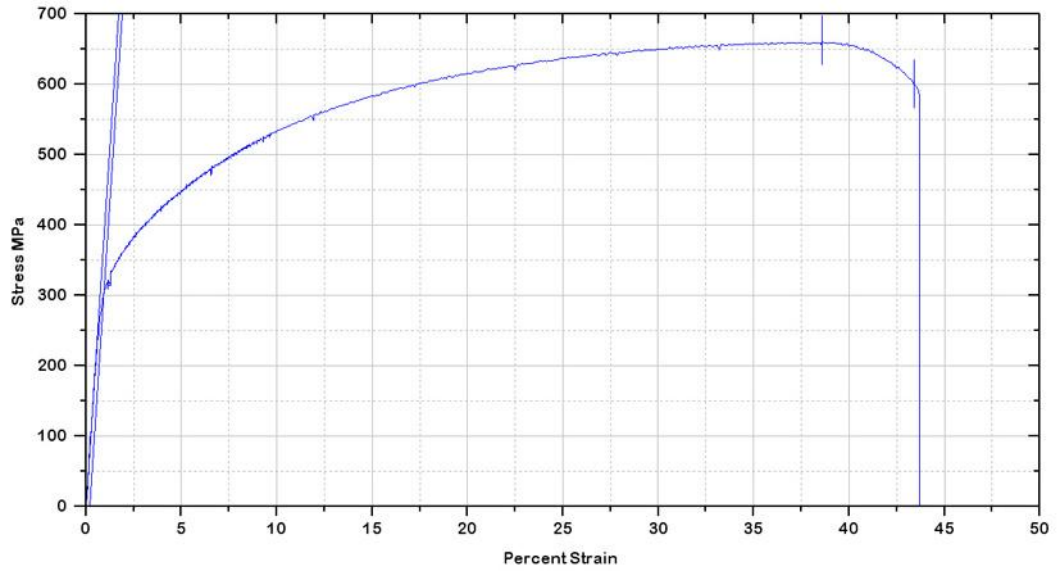
Şekil 7.7 – 7.13’de deney numunelerinin ayrı ayrı çekme grafikleri verilmiştir.



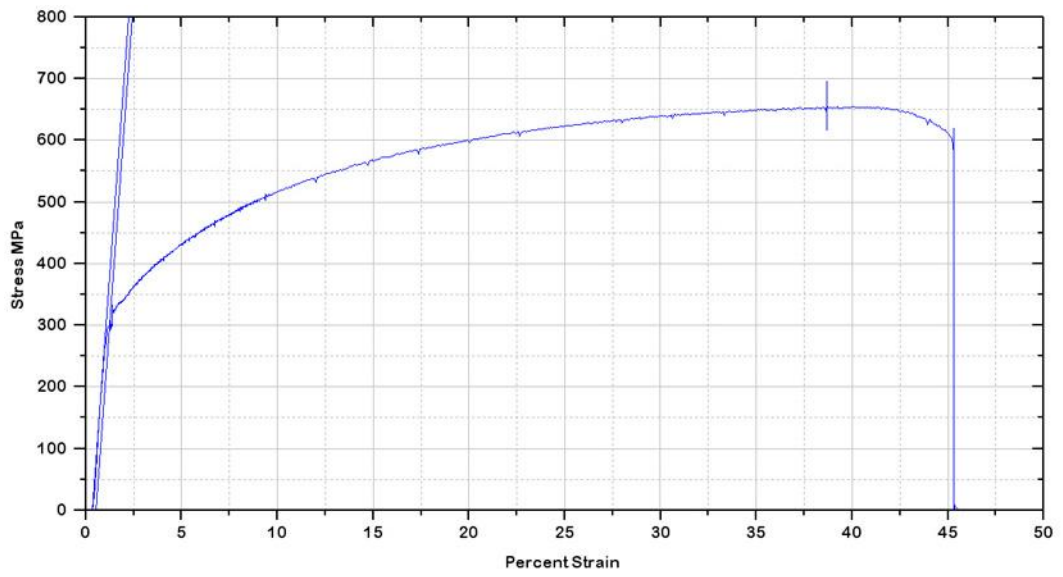
Şekil 7.7. 1 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 30 MPa, P_2 : 60 MPa, t : 5 sn)



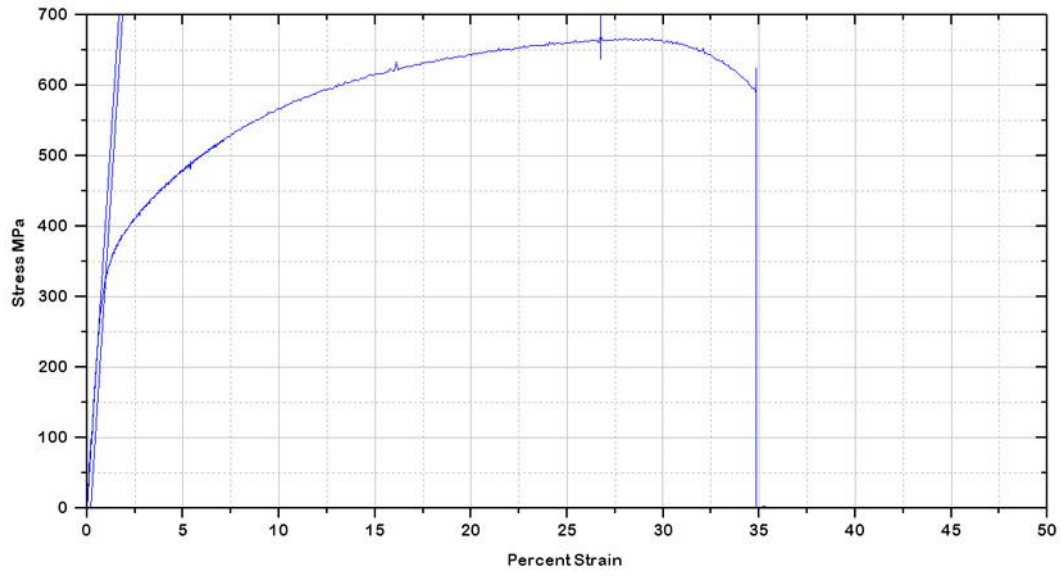
Şekil 7.8. 2 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t : 5 sn)



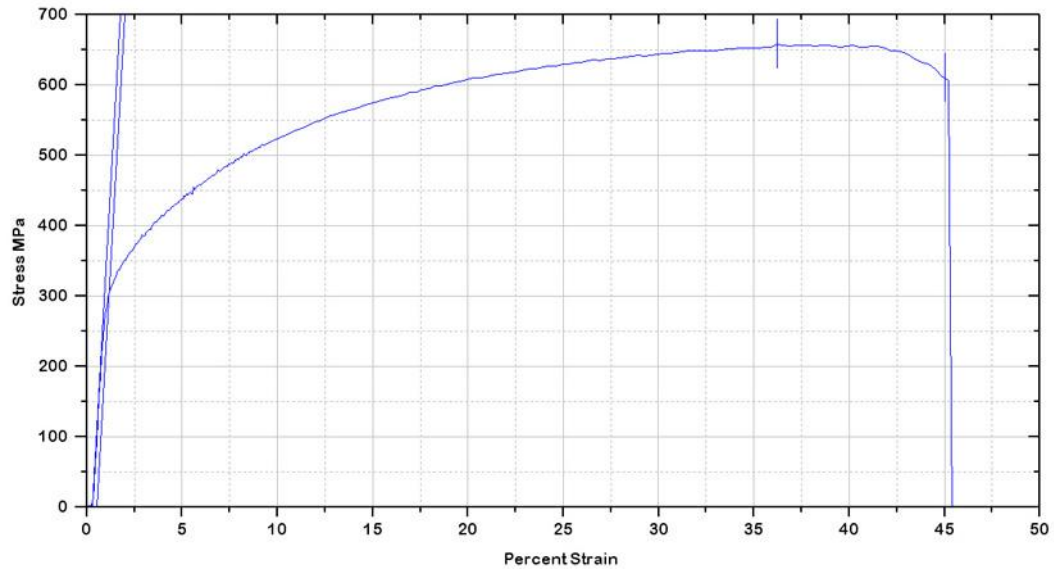
Şekil 7.9. 3 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 50 MPa, P_2 : 60 MPa, t : 5 sn)



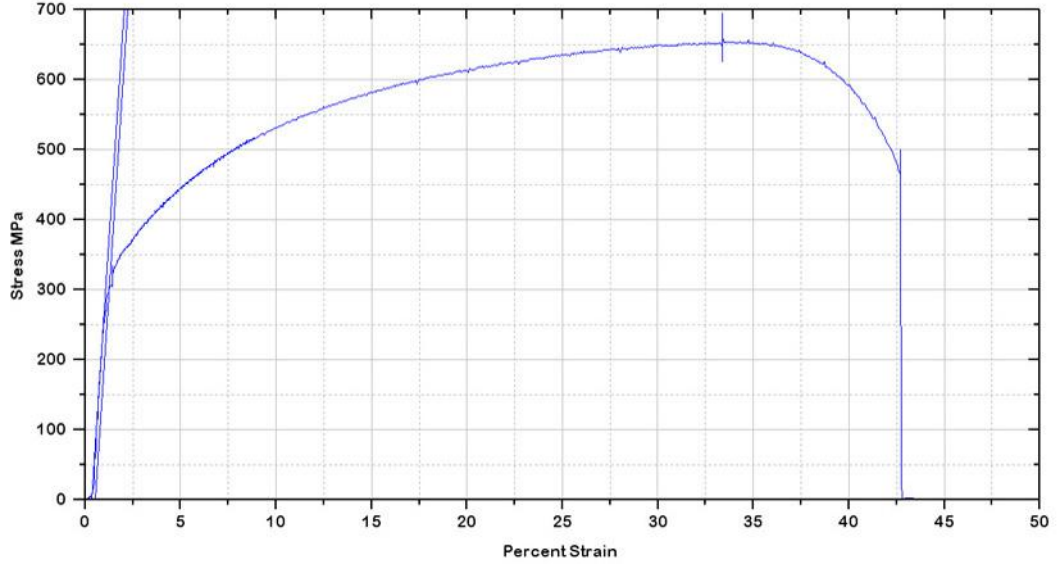
Şekil 7.10. 4 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 50 MPa, t : 5 sn)



Şekil 7.11. 5 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 70 MPa, t : 5 sn)



Şekil 7.12. 6 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t : 3 sn)



Şekil 7.13. 7 numaralı deneye ait çekme grafiği (P_1 : 40 MPa, P_2 : 60 MPa, t: 7 sn)

Sürtünme süresi ve yığma basıncının sabit olup, sürtünme basınçlarının değişken olduğu deneyler (1, 2 ve 3) incelendiğinde, sürtünme basıncının artmasıyla numunelerin çekme dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür.

Sürtünme süresi ve sürtünme basıncının sabit olup, yığma basınçlarının değişken olduğu deneyler (4, 2 ve 5) incelendiğinde ise, yığma basıncının artmasıyla malzemenin çekme dayanımı değerlerindeki artış gözlemlenmiştir. Yığma basıncının en yüksek olduğu 5 numaralı deney numunesinde en yüksek akma ve çekme dayanım değerlerinin elde edilmesi yığma basıncının akma ve çekme değerlerinde etkili parametre olduğu söylenebilir. Sürtünme süresinin değişken olup, diğer parametrelerin sabit olduğu deneylerde (6, 2 ve 7) ise sürtünme süresinin artmasıyla deney numunelerinin akma dayanım değerlerinde bir artış görülmüştür.

Çekme dayanım değerlerine göre sürtünme basıncı ve yığma basıncının artmasıyla çekme dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür.

Literatürdeki bazı çalışmalarda [Otmanbölük, 1998; Ay ve ark., 2001] sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelere çekme testi uygulanmış ve meydana gelen kopmaların kaynak ara yüzeyi dışında meydana geldiği ifade edilmiştir. Kaynak ara

yüzeyinde birleşme mekanizması için uygun şartların meydana gelmesi kırılmanın kaynak bölgesi dışında oluşmasına sebep olmaktadır.

8. SONUÇLAR

1. Değişik parametreler ile yapılan deneyler sonucunda numunelerin temas yüzeyinden dışa doğru taşan çapağın geometrisi ve büyüklüğü farklılıklar göstermiş, sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığılma basıncının artmasıyla oluşan çapağın arttığı gözlemlenmiştir. AISI 304 tarafında, St 60 tarafında meydana gelen çapaktan çok daha az çapak meydana gelmiştir.
2. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak deney numunelerinin hepsinde benzer bir tane yapısının olduğu görülmüştür. Kaynak birleşme hattına yakın bölgelerde ince bir tane yapısı görülürken, birleşme hattından ana metale doğru ilerlediğimizde, tanelerin irileştiği ve ana metal tanelerinin değişmeden kaldığı görülmüştür.
3. Basıncın neden olduğu deformasyon yönlenmesi kaynak merkezinden kenarlara doğru oluşmuştur. Sıcaklık ve basıncın etkisi ile oluşan deformasyon sonucunda, tanelerin yönlenme miktarları karşılaştırıldığında St 60 çelikte meydana gelen yönlenme miktarının, AISI 304 paslanmaz çelikte olan yönlenme miktarından daha fazla olduğu görülmüştür.
4. Sürtünme esnasında oluşan yüksek ısı ile deformasyon kolaylaşmış, numuneler deformasyon neticesinde birbirleriyle taneler bir alışveriş gerçekleştirmiş ve mekanik kilitleme meydana gelmiştir.
5. AISI 304 paslanmaz çelik tarafında oluşan deformasyon alanı, St 60 malzemede oluşan alandan daha küçüktür.
6. Birleşme bölgelerinde oluşan yönlenmeler St 60 tarafında daha belirgindir ve daha büyük bir alanda gerçekleşmiştir.

7. EDS analizlerine ve SEM fotoğraflarına bakılarak, sonuçların tümünde bütün deneylerin birleşme hattında iki malzeme arasında yayınmanın tam anlamıyla gerçekleştiği görülmüştür.
8. Aynı mesafelerde St 60 çelik tarafında ölçülen sertlik değerleri, AISI 304 paslanmaz çelik tarafında ölçülen değerlerden daha düşüktür. Bu değerlerin değişkenliğinde tane büyüklüğü ve geometrisi etkin rol oynamaktadır.
9. Ana metallerdeki sertlik değerlerine bakıldığında ise 17. maddedeki sonucun tam tersi bir durum söz konusudur. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin sertlik değeri St 60 çelik malzemenin sertlik değerinden daha düşük çıkmaktadır. Bunda ısıdan etkilenilmeyen bölgelerde daha önce ıslah edilmiş östenit tanelerinin daha düşük sertlik değerleri göstermesi neden olmaktadır.
10. Sürtünme basıncı ve yığıma basıncının sabit (40 MPa, 60 MPa), sürtünme süresinin ise değişken olduğu 2, 6 ve 7 numaralı deneylerin sertlik değerleri birbirleri ile mukayese edildiğinde sürtünme süresinin çok etkin bir rol oynadığı grafiklerden görülmektedir. Sürtünme süresinin en düşük olduğu 6 numaralı deneyde sertlik değerleri içerisinde keskin değişiklikler gözlenirken, sürtünme süresinin en yüksek olduğu 7 numaralı deneyde ise ısının etkisiyle birbirine çok yakın sertlik değerleri elde edilmiştir.
11. Numunelerde farklı sertlik değerlerinin ölçülmesinde sürtünme süresinin arttırılması ile numunelere uygulanan ısının artmasının yanı sıra soğuma hızı da sertlik değerlerinin değişiminde etkili olmuştur. Az ısı girdisi olan malzemeler daha hızlı soğuduğundan bu malzemeler ısının daha fazla olduğu malzemelere oranla daha sert değerlere sahip olmuştur. Ayrıca, özellikle kaynak merkezine yakın bölgelerde deformasyon nedeniyle oluşan deformasyon sertleşmesi ve karbonun kroma olan ilgisinden dolayı oluşan krom karbür çökeltilerinin varlığı da bu bölgelerdeki sertlik değerlerini arttırmıştır.

12. Dikey ekseninde, kaynak ara yüzeyinin merkezinden çevreye doğru gidildikçe sertlik değerinin arttığı, uç noktaya yaklaştığında ise düşüşe geçtiği gözlenmiştir. En düşük sertlik değerleri en fazla ısıya maruz kalan ve soğuma hızının en yavaş olduğu kaynak merkezinde gerçekleşmiştir. En yüksek sertlik değerleri ise kaynak merkezinden 5 mm dikey mesafede ölçülmüştür.
13. Çekme dayanımı sonuçlarına göre sürtünme basıncı ve yığma basıncının artmasıyla çekme dayanım değerlerinin arttığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Alvise, L.D., Massonia, E., Wallqeb, S.J., “Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials”, *Journal of Materials Processing Techonology*, 125-126: 387 (2002).

Anık, S., “Kaynak Tekniğinde Schaeffler Diyagramının Kullanılması”, Kaynak Tekniği, *Oerlikon Yayınları*, 10 (1970).

Anık, S., “Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar”, *Gedik Holding Yayını*, İstanbul, 18-20 (1991).

Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E., “Örtülü Elektrod İle Ark Kaynağı”, *Gedik Holding Yayını*, İstanbul, 157-160 (1991).

Anık S., Anık E. S., Vural M., "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Cilt I", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 215-309 (1993).

Anık, S., Vural, M., “Gazaltı Ark Kaynağı (TIG, MIG, MAG), Yayın 3”, *Gedik Eğitim Vakfı*, İstanbul, 24-26 (1996).

Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., “İmal Usulleri”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 117-123 (1999).

Aran, A., Temel M.A., “Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller”, *Sarıtaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, 165 (2003).

Aran, A., Temel, M.A., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları, *Acar Matbaacılık A.Ş.*, İstanbul, 58-65 (2004).

Ateş, H., “Ferritik Süper Alaşımların Sürtünme Kaynağı İle Kaynaklanabilirliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 87-90 (2003).

Ateş, H., Türker, M., Kurt, A., “Effect of Friction Pressure on the Properties of Friction Welded MA956 Iron Based Superalloy”, *Materials and Design*, 28 (3): 948-953 (2007).

AWS, “Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes”, *Welding Handbook*, Miami, 240 (1980).

Ay, İ., Çelik, S., Çelik, İ., “Alüminyum ve Bakır Çubukların Sürtünme ve Difüzyon Kaynağı Özelliklerinin Araştırılması,” *II. Uluslar Arası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, İstanbul, 177-189 (2001).

Bayındır, R., Ateş, H., “Comparison of the Constructed Control Methods for a Friction Welding Machine”, *Materials and Manufacturing Process*, 20 (2): 131-146 (2005).

Bayındır, R., Ateş H., “A Novel Control Unit for a Friction-Welding Machines Based on Computer”, *Materials and Manufacturing Process*, 22 (3): 102-106 (2007).

Bayındır, R., Ateş H., “Low-cost and high sensitively microcontroller based control unit for a friction welding machine,” *J. of Materials Processing Technology*, 189 (1-3): 126-131 (2007).

Baylan, O., “Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik–Martenzitik Farklı Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklı Bağlantılarında, Mikroyapı İle Özellikler Arasında İlişkinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi*, Zonguldak, 3-33 (2004).

Castner, H.R., “Material and Procedure Considerations for Welded Austenitic Stainless Steels”, *8th Annual North American Welding Research Conference*, Ohio, 1-6 (1992).

Ceyhun, V., “Ferritik ve Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Karbonlu Çelik İle Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Çekme – Makaslama Dayanımına ve Taneler Arası Korozyona Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-50 (1992).

Chen, Y.J., Shi, Y.W., Zhang, X.P., “Detection of Weak Bonding in Friction Welds by Ultrasound”, *Ultrasonics*, 36: 141 (1998).

Coşkun, O., “Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağının Bilgisayarla Kontrolü İçin Bir Simülasyon”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 41-46 (1992).

Çelik, İ., “Alüminyum ve Bakır Çubukların Sürtünme Kaynağı Üzerine Bir Araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 53-59 (1997).

Develi, K., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Argon Hidrojen Karışımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-26 (2003).

Dinç, D., “AISI 1040 ve AISI 304 Çeliklerinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 10-28 (2006).

Duffin, F.D., Crossland, B., “Friction welding with sudden release of the fixed component, advances in welding processes, solid phase joining of the conference”, *The Welding Institute*, Cambridge, 25 (1971).

Dupont J.N., Banovic, S.W., Marder A.R., “Microstructural Evolution And Weldability Of Dissimilar Welds Between A Supper Austenitic Stainless Steel And Nickel-Based Alloys”, *Welding Journal*, 125-135 (2003).

Ellis, C.R.G., “Recent indutrial developments in friction welding”, *Welding Journal*, 582 (1976).

Erdoğan, M., “Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri, Cilt 1”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 169 (2000).

Ertuğ, A., “Sürtünme Kaynağı”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 21 (241): 45 (1977).

Gourd, L.M., “Principles of Welding Technology”, *Hodder Headline PLC.*, 1-12 (1995).

Grünauer, H., “Döküm Parçalarının Sürtünme Kaynağı”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 30 (357): 13 (1989).

Gürler, M., “Alüminyum Alaşımalarının Sürtünme Kaynak Özellikleri”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 89-96 (2000).

Gürleyik, M., “Sürtünme Kaynağı”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 16 (1982).

Gürleyik, M., “Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilen Alüminyum İle Bakırın Mikroskobik Yapısı ve Mekanik Özellikleri”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 29 (337): 37 (1988).

Gürleyik M., "Sürtünme Kaynağı Yapılan Döküm Alaşımları" *II. Kaynak Sempozyumu*, İstanbul, 231-241 (1989).

Hasçalık, A., Orhan, N., “Effect of particle size on the friction welding of Al₂O₃ reinforced 6160 Al alloy composite and SAE 1020 steel”, *Materials and Design*, 28 (1): 313-317 (2007).

Jenning, P., “Some properties of dissimilar metal joints made by friction welding”, *Welding Institute*, Abinghton Hall Cambridge, 147-153 (1971).

Kahraman, N., Yılbaş, B., Odabaş, D., “H2210 Çeliği İle Alüminyumun Sürtünme Kaynağıyla Kaynak İşlemi ve Kaynak Parametrelerinin Kaynak Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması”, *6. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 217 (1995).

Kahraman, N., Gülenç, B., Akça, H., “Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 17 (2): 75-85 (2002).

Kahraman, N., Gülenç, B., “Modern Kaynak Teknolojisi”, *EPA-MAT Basım Yayın*, Ankara, 21-28 (2009),

Kaluç, E., Tülbentçi, K., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği”, Seminer Notları, *Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Eğitim ve Uygulama Merkezi*, Kocaeli, 201 (1995).

Kaluç, E., “Östenitik Krom – Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, *Gedik Kaynak Dünyası*, 18–21 (1996).

Karabulut, A., Taşgetiren, S., “Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesi Tasarım ve İmalatı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1 (3): 38-50 (2004).

Kato, M., Kagaya, C., Kawaguchi, Y., Tokisue, H., “Influence of normalization on impact fracture behaviour of friction welded joints”, *Society of Mechanical Engineers*, 62 (602): 2236 (1996).

Kayır, Y.Z., “Türkiye paslanmaz çelik üretebilir mi?”, *II.Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu Ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 11-23 (2003).

Kıyıcı, H.K., “Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Örtülü Elektrotla Ark Kaynağında Parametrelerin Bilgisayarla Tespiti”, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 14-29 (1994).

Korkut, M.H., “Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 5-10 (1997).

Kovan, V., “Materials 2006”, *11th International Materials Symposium*, Denizli, 84 (2006).

Kurban, A., Kahraman, N., “Farklı Metallerin Sürtünme Kaynağı ve Kaynak Parametrelerinin Kaynak Üzerine Etkisi”, *6. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 226 (1995).

Lee, W., Kim, Y., Jung, S., “Effects of copper insert layer on the properties of friction welded joints between TiAl and AISI 4140 structural steel”, *Intermetallics*, 12 (6): 671-678 (2004).

Lippold, J.C., “Recent Developments in The Welding and Weldability of Austenitic Stainless Steels”, *8th Annual North American Welding Research Conference*, Ohio, 1-7 (1992).

Lucas, W., “Process parameters and friction welds”, *Welding Journal*, 293-297 (1971).

Odabaş, C., “Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri”, *Askaynak yayını*, İstanbul, 32-38 (2004).

Odabaş C. “Paslanmaz çeliklerin temel özellikleri, kullanım alanları ve kaynak yöntemleri”, *Kaynak Tekniği Sanayi Ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, 3 (15): 59 (2007).

Odabaş, C., “Kaynak Teknolojisi”, *Kaynak Tekniği Sanayi Ve Ticaret A.Ş.*, İstanbul, 169 (2008).

Orhan, A., “Al Matrisli Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 49-55 (2003).

Otmanbölük, A.N., “Sürtünme kaynağı prosesleri üzerine bir araştırma”, *7. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 507 (1997).

Otmanbölük, A.N., Ay, İ., Çelik, İ., “Alüminyum ve Bakır Çubukların Sürtünme Kaynağı, ” *II. Uluslar Arası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu*, İstanbul, 120-129 (1998).

Önal, E., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Schaeffler, De Long ve WRC 92 Diyagramlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 8-50 (1997).

Özdemir, N., Orhan, N., “Yeni Tasarlanmış Bir Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinasının İmalatı” *Mühendis ve Makina*, 508: 31-35 (2002).

Özdemir, N., Orhan, N., “Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş süperplastik haldeki ötektoid üstü çeliğin ara yüzey mikroyapı değerlendirmesi”, *11. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, Antalya, 13-14 (2004).

Özlü, M., “Transmisyon Çeliği İle Martenzitik Paslanmaz Çeliğin Sürtünme Kaynağı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 53-55 (2002).

Paylaşan, Ü., “Bronz ve Düşük Karbonlu Çeliğin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Parametrelerinin İncelenmesi”, *Y. Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 79-81 (2000).

Sarioğlu, C., “Demir-çelik ve alaşımlarının yüksek sıcaklıkta oksidasyonu ve oksidasyondan korunma yolları”, *I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu Ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, 731-741 (2001).

Sereign, S.A., Sabantsev, V.P., “The Friction Welding of Plastically Deformed Steel”, *Weld. Prod.*, 34-35 (1975).

Silva, A., Meyer, A., Santos, Jorge., Kwietniewski, C., Strohaecker, T., “Mechanical and metallurgical properties of friction-welded TiC particulate reinforced Ti-6Al-4V”, *Composites Science and Technology*, 64 (2004).

Smith, W.F., “Paslanmaz Çelikler”, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Cilt 1, Çeviri: Erdoğan, M., *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 169-214 (2000).

Sulazec A., "Thermal Effects In Friction Welding" *Int. J. Mech. Sei.*, 32 (6): 467-478 (1990).

Şahin, A.Z., Yılbaş, B.S., Al-Garni, A.Z., “Friction Welding of Al-Al, Al- Steel, and Steel-Steel Samples”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 5 (1): 89 (1996).

Şahin, M., “Sürtünme Kaynağı İle Birleştirmede Parça Boyutları ve Plastik Şekil Değiştirmenin Etkilerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 94 (2001).

Şahin, M., “Simulation of friction welding using a developed computer program”, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 1011-1018 (2004).

Şahin, M., Akata, H.E., Özel, K., “Soğuk şekil verilmiş alüminyum malzemelerin sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma”, *Kaynak Teknolojisi Beşinci Ulusal Kongresi*, Kocaeli, 3-12 (2005).

Şahin, M., “Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding”, *Materials and Design*, 28 (7): 2244-2250 (2006).

Sönmez, F., “Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Yüksek Hız Çeliği (HSS) ve AISI 1040 Çeliklerinde Mukavemet ve Metalurjik Özelliklerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 45-51 (2007).

Tanicheva, O.N., ET AL, “Nature of the defect “bright ring” forming in friction welding of tool steel”, *Metal Science and Heat Treatment*, 31 (3): 200-202 (1989).

Taşkın, M., Çay, V.V., Özdemir, N., “Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 430/Ç 1010 çelik çiftinin ara yüzey mikroyapı değerlendirmesi”, *Teknoloji*, 8 (1): 65, (2005).

Tekin, A., “Çeliklerin Metalurjik Dizaynı”, *İ.T.Ü. Metalurji Fak.*, İstanbul, 225 (1981).

Tülbentçi, K., “Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı”, *Böhler Kaynak Dünyası*, 11: 10 (1985).

Tülbentçi, K., ve Yılmaz, M., “Farklı Takım Çeliklerinin Katı Hal Kaynağı”, *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu*, İstanbul, 303-314 (1989).

Tülbentçi, K., "MIG-MAG Gazaltı Kaynak Yöntemi", *Arcotech Kaynak Elektrodları ve Telleri A.Ş.*, İstanbul, 193-201 (1998).

Wang, H.S., Yang, J.R. and Bhadeshia D.H, "Characterisation Of Severely Deformed Austenitic Stainless Steel Wire", *Materials Science And Technology*, 21: 11-21 (2005).

Woollin, P., "Developments in Fusion Welding of Stainless Steels", *Welding&Metal Fabrication*, Cambridge, 18-26 (1994).

Varol, R., Tunay, R.F., Tüfekçi, K., "Toz Metal (T/M) Parçaların Elektron Işın Kaynağı ile Birleştirilmesi" *Mühendis ve Makine*, Ankara, 43 (513): 32-35 (2002).

Yılmaz, M., " Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 32-39 (1993).

Yılmaz, M., Kaluç, E., Karagöz, Ş., Tülbentçi, K., "Alaşımız C45 ve HS 6-5-2 Yüksek Hız Çeliği Çiftinin Sürtünme ve Yakma Alın Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mikroyapısal Analizi", *6. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 185 (1995).

Yılmaz, M., Çöl, M., Acet, M., "Interface properties of aluminium/steel friction-welded components", *Materials Characterization*, 49: 421 (2003).

Yüksel, M., "Malzeme Bilgisi, 271-1", *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, 368-386 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAYA, Nihat
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1981 - Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 394 73 65
Faks : 0 (312) 394 73 64
e-mail : nihatkaya2004@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniv./ Metal Eğt. Böl.	2003
Lise	Akhisar Teknik Lisesi/Makine	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
01.2008-05.2008	Tipisan San.Tic.Ltd.Şti.	Üretim Planlama
05.2008-Halen	HFMG İnşaat Makine	Proje Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce