

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

**SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE YÜKSEK DEVİRDE
BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 1040/AISI 304 ÇELİK ÇİFTİ
ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedat BULDAĞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Zülküf BALALAN**

BİNGÖL-2022



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE YÜKSEK DEVİRDE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI
1040/AISI 304 ÇELİK ÇİFTİ ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Zülküf BALALAN danışmanlığında, Sedat BULDAĞ tarafından hazırlanan bu çalışma 07/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Tanju TEKER

İmza:

Üye: Doç.Dr. Zülküf BALALAN

İmza:

Üye: Doç. Dr. Adem YAR

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun/ tarih ve nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisan tezin hazırlanmasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Başkanı ve aynı zamanda danışman hocam Doç. Dr. Zülküf BALALAN başta olmak üzere, Makine Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Dr. Ömer EKİNCİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca, tezimin hazırlık ve yazım aşamalarında manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve tüm dostlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Sedat BULDAĞ
Bingöl 2022

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
TABLOLAR LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1. Kaynaklı Birleştirme Yöntemleri.....	6
2.2. Kaynak İşlemi.....	6
2.3. Ergitme Kaynağı Yöntemi.....	7
2.4. Katı Hal Kaynağı.....	7
2.4.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	7
2.5. Sürtünme Kaynağı.....	8
2.5.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması	9
2.5.2. Sürtünme Kaynağı Parametreleri.....	11
2.5.3. Çevresel Hız.....	11
2.5.4. Sürtünme Basınç Kuvveti.....	12
2.5.5. Sürtünme Süresi.....	12
2.5.6. Yığma Basınç Kuvveti.....	13
2.5.7. Yığma Süresi.....	13
2.6. Sürtünme Kaynağı Çeşitleri.....	14
2.6.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	15
2.6.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	16
2.6.3. Hibrit Sürtünme Kaynağı.....	16
2.7. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı.....	17
2.8. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri.....	18

2.9. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzemeler.....	19
2.10. Sürtünme Kaynağı Uygulama Alanları.....	20
2.11. Sürtünme Kaynağının Avantajları.....	21
2.12. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları.....	22
2.13. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	23
2.13.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	23
2.13.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Edilebilirlikleri.....	25
2.13.3. AISI 304 Paslanmaz Çeliği.....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Kaynak Öncesi İşlemler.....	28
3.1.1. Deneilerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	28
3.2. Denei Numunelerinin Hazırlanması.....	29
3.3. Sürtünme Kaynağı Deneileri ve Kaynak Parametreleri.....	29
3.4. Kaynak Bölgesinin Sıcaklığının Ölçülmesi.....	30
3.5. Çekme Denei Testleri.....	31
3.6. Metalografik İncelemeler	33
3.7. Mikrosertlik Analizi.....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
4.1. Kaynaklı Bağlantıların Makro ve Mikroskobik Değerlendirilmesi.....	35
4.2. Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Test Sonuçlarının İrdelenmesi.....	49
4.2.1 Çekme Denei Sonuçları.....	49
4.3. Sertlik Deneileri Test Sonuçlarının İrdelenmesi.....	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Fe	: Demir
C	: Karbon
Cu	: Bakır
Ti	: Titanyum
Cr	: Krom
Mg	: Magnezyum
Mo	: Molibden
Nb	: Niobyum
Al	: Alüminyum
Ni	: Nikel
F	: Sürtünme kuvveti (N)
n	: Devir sayısı (dev/dak)
µm	: Mikrometre
AISI	: American iron and steel institute
EDAX	: Energy-dispersive x-ray spectroscopy
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
MPa	: Mega pascal
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EPMA	: Electron probe microanalyzer
XRD	: X-ray diffraction
TIG	: Tungsten inert gaz
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
SDH	: Sıkı düzen hegzagonal
HMK	: Hacim merkezli kübik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Sürtünme kaynağı uygulaması	9
Şekil 2.2.	Sürtünme kaynağı işlem basamakları.....	10
Şekil 2.3.	Sürtünme kaynağının sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.4.	Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı.....	15
Şekil 2.5.	Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri.....	19
Şekil 2.6.	Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parça	19
Şekil 3.1.	Sürtünme kaynağı için kullanılacak numune boyutları.....	29
Şekil 3.2.	Sürtünme kaynak makinası.....	29
Şekil 3.3.	Raynger 3i plus kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı.....	31
Şekil 3.4.	Çekme numunesinin ölçüleri.....	31
Şekil 3.5.	Çekme deneyi cihazı.....	32
Şekil 3.6.	S1(a) kaynaklı numune (b) kopmuş çekme numunesi.....	32
Şekil 3.7.	S9 (a) kaynaklı numune (b) kopmuş çekme numunesi.....	32
Şekil 3.8.	Kaynaklı makro yüzey fotoğrafı.....	33
Şekil 3.9.	Kaynak arakesiti üzerinde alınan mikro sertlik ölçüm noktaları.....	34
Şekil 4.1.	Sürtünme kaynaklı numunelerde birleşme arakesitinin şematik resmi.....	36
Şekil 4.2.	S9 nolu numune makro ve optik incelenmesi.....	37
Şekil 4.3.	Standart aısı 304 ve aısı 1040' ın mikroyapı sem fotoğrafları.....	37
Şekil 4.4.	1. grup numune optik mikroskop (OM) ve SEM resimleri.....	40
Şekil 4.5.	2. grup numune optik mikroskop (OM) ve SEM resimleri.....	41
Şekil 4.6.	3. grup numune optik mikroskop (OM) ve SEM resimleri.....	42
Şekil 4.7.	S1 numune mikroskobik EDS görüntüsü.....	43
Şekil 4.8.	S4 numune mikroskobik EDS görüntüsü.....	44
Şekil 4.9.	S7 numune mikroskobik EDS görüntüsü.....	45
Şekil 4.10.	S9 numune mikroskobik EDS görüntüsü.....	46
Şekil 4.11.	S6 nolu numunenin XRD grafiği.....	47
Şekil 4.12.	S9 nolu numunenin XRD grafiği.....	47
Şekil 4.13.	Deneylerdeki sıcaklığın zamanla değişimi.....	48

Şekil 4.14.	Çekme numunesinin şematik resmi.....	49
Şekil 4.15.	Çekme numunelerinin fotoğrafları.....	49
Şekil 4.16.	1.grup kaynaklı numunelere ait gerilme-uzama eğrileri.....	50
Şekil 4.17.	S1 nolu numunesinin çekme kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	50
Şekil 4.18.	2.grup kaynaklı numunelere ait gerilme-uzama eğrileri.....	51
Şekil 4.19.	S4 nolu numunesinin çekme kırık yüzey SEM incelenmesi.....	52
Şekil 4.20.	S6 nolu numunenin numunenin çekme kırık yüzey mikroskobik SEM resmi.....	52
Şekil 4.21.	3.grup kaynaklı numunelere ait gerilme-uzama eğrileri.....	53
Şekil 4.22.	S9 nolu numunesinin çekme kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	54
Şekil 4.23.	1.grup deney numunelerinin yatay eksenindeki sertlik dağılımı.....	55
Şekil 4.24.	2.grup deney numunelerinin yatay eksenindeki sertlik dağılımı.....	56
Şekil 4.25.	3.grup Numaralı deney numunelerinin yatay eksenindeki sertlik dağılımı...	57

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1	Malzemelere göre uygun kaynak parametreleri.....	13
Tablo 2.2.	Östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	24
Tablo 3.1.	Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri.....	28
Tablo 3.2.	Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	28
Tablo 3.3.	Sürekli tahrikli sürtünme kaynak cihazının teknik özellikleri.....	28
Tablo 3.4.	Deney numaraları ve kaynak parametreleri.....	30
Tablo 4.1.	Kaynak yapılmış numune flanş boyutları.....	35
Tablo 4.2.	Numunelere ait kaynakların boyca kısalma miktarları.....	36
Tablo 4.3.	S1 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri.....	43
Tablo 4.4.	S4 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri.....	44
Tablo 4.5.	S7 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri.....	45
Tablo 4.6.	S9 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri.....	46
Tablo 4.7.	1.grup çekme deney sonuçları.....	50
Tablo 4.8.	2. grup çekme deney sonuçları.....	51
Tablo 4.9.	3. grup çekme deney sonuçları.....	53

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 1040/AISI 304 ÇELİK ÇİFTİ ALAŞIMLARININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Teknolojinin gelişmesi ve ihtiyaçların artması imalat yöntemlerini etkilemiştir. Sürtünme kaynağı maliyetleri düşürebilmek, performansı artırmak ve tasarım esnekliği için farklı malzemelerin birleştirilmesinde önemli ve etkili bir yöntemdir. Sürtünme kaynağı yöntemi ile farklı parçalar birleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz çeliği ile AISI 1040 karbon çeliklerinin sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Birleştirmeye esnasında, kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı ile kaynak yerlerinin sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Kaynak yapılan deney numunelerinin mikroyapılarını incelemek için SEM, EDS ve XRD analizlerinin yanı sıra mekanik özelliklerini de tespit etmek için çekme ve sertlik testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, çekme testi sırasında numunelerin çoğunun sünek kırıldığı makro ve mikroyapı analizleri ile elde edilmiştir.

Bu deneysel çalışmanın sonucunda, benzer olmayan çelik çiftleri sürtünme kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilebileceği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünme kaynağı, AISI 304 paslanmaz çeliği, AISI 1040 karbon çeliği, mikroyapı, mekanik özellikler

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION WELDED AISI 1040/AISI 304 STEEL PAIR ALLOYS

ABSTRACT

The development of technology and the increase in needs have affected the manufacturing methods. It is of great importance in combining different materials to reduce costs, increase performance and design flexibility. Different parts can be joined by friction solid state welding, which is one of the solid state welding methods.

In this studies, the compatibility of AISI 304 stainless steel and AISI 1040 carbon steels with friction solid-state welding has been investigated. During the assembly, the temperature changes of the welds were measured with an infrared temperature measuring device. In addition to SEM, EDS and XRD combining to examine the microstructure of the welds, tensile and hardness tests were carried out to determine their mechanical properties. As a result, it was obtained by macro and microstructure analyses that most of the samples were ductile fractured during the tensile test.

As a result of this experimental study, it has been determined that dissimilar steel pairs can be successfully joined by friction welding.

Keywords: Friction welding, AISI 304 stainless steel, AISI 1040 carbon steel, microstructure, mechanical properties

1. GİRİŞ

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler hızlı ilerlerken, gelişmekte olan talebe karşılık verebilmek için gelişimini diğer alanlarda olduğu gibi kaynak yöntemlerinde her geçen gün artırarak sürdürmektedir. Bu gelişmelerde sürtünme kaynağı teknolojisi sürekli yeni alanlarda kullanıma sunulmak için dünyanın birçok ülkesinde sanayide uygulama alanı bulunan ticari ve ekonomik yöntemler arasında yerini almaktadır. Malzemelerin kaynak edilmesinde sürtünme enerjisi kullanılmaktadır. Sürtünme enerjisinin kaynak yöntemine uygulanmaya başlama tarihi 15 yy. olarak bilinmektedir. Sürtünme kaynağıyla alakalı ilk patent 1981'de Amerikan makineci J.H. Bevington tarafından alınmıştır. Bevington sürtünme ısılarından yararlanarak boruların kaynaklarını yapmıştır. 1924 senesinde W'Richter İngiltere'de H. Klopstock Sovyetler Birliğinde patent almıştır. 1941 senesinde A'R Nealsonds ve H. Klopstock silindir şeklindeki parçanın sürtünme kaynağı için birer patent almıştır. Bunun yanı sıra 2. Dünya savaşı sırasında Almanya ve Amerika'da plastik malzemenin kaynağında sürtünme kaynağı kullanılmıştır. Bu metod günümüz teknolojisi ile geliştirilmektedir.

AISI 304 paslanmaz çeliklerin kaynak bileşim noktasındaki gerilme dayanımı, sürtünme süresi ve basınçın artmasıyla çoğalır, maksimum değere ulaşır, fakat sürtünme süreci ve basınçta yükselmeye devam ederse gerilme dayanımında azalma meydana gelir. Ulaşılan en yüksek gerilme dayanımı ise ana metalin gerilme dayanımının %96'sı kadar olmaktadır. Kaynak yerinin yorulma dayanımları gerilme dayanımları ile yakın değerler göstermektedir. Çentik darbe dayanımı, ana metal AISI 304'ün iki katına yakın değerlerde olmaktadır. Kaynak bölgesi dinamik ve statik yükleri kolayca karşılayabilir. Sertlik değerlerine bakıldığında ayrıca mikroyapıdaki AISI 304 paslanmaz çeliğinin ek yerinin kaynaklı bölgesinde belirgin sertleşme tesiri olmadığı görülmüştür (Şahin vd., 2007).

Sürtünme kaynağı; bir parçanın döndürülerek başka parçaların aksenal yönde ötelenmeleri ve dönen veya sabit olan ara parça kullanılmasıyla oluşabilir. Farklı

olarak dönme hareketinin yerine vibrasyon kullanıp sürtünme hareketi yaptırılır. Genelde sürtünme kaynağının aksenal simetrideki, daire kesitli parçanın birleşmesinde kullanılmalarına rağmen cihazın dizaynı ve bilgisayarın kontrol fonksiyonunun gelişmesi ile beraber farklı kesitli parçaların birleşmesinde de kolayca kullanılmaktadır. Farklı türde sürtünme kaynak makineleri de vardır. Bunlar lineer sürtünme, tahrikli sürtünme, orbital sürtünme, sürekli, volan tahrikli sürtünme ve kombine sürtünme kaynağı makineleridir. Sürtünme kaynak makinesinin birçok avantajları vardır. Farklı yapıdaki malzemeleri birleştirir ve ergime sıcaklığının altında sıcaklıkta malzeme katı halde iken birleşme sağlanır.

Yapılan bu çalışmada endüstride kullanılan AISI 1040 orta karbonlu çelik ve AISI 304 paslanmaz çelik sertifikalı olan ürünlerden temin edilerek sürtünme kaynak metodu ile birleştirilmiştir. Kaynak parametreleri PLC kontrol sistemi ile kontrol edilen doğrudan tahrikli bir sürtünme kaynak makinesi kullanılmıştır. Yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı özellikleri, çekme testleri, mikrosertlik ölçümü yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Vill (1962) sürtünme basınçlarının büyük öneme sahip olduklarını ve değişimlerinin geniş aralıklarda olduklarını belirtmiştir. Vill için basınç, kaynak bölgesinde olan sıcaklık seviyesi ve eksenel kısalma miktarıyla kontrolü sağlanır. Nümerik şekilde 25-250 MPa aralığında değişim gösterir. Dönme hızı, hassasiyet olarak en düşük bulunan parametredir. Pratik şekilde kaynak bağlantılarını etkilemeden geniş değişim aralıkları kullanılabilir. Lucas (1971) EN 3B yumuşak çelikten elde edilen sürtünme kaynağı olan numuneye eğme testi yapılmıştır. Çalışmada 1 sn süreyle yığma basınçlarının uygulanmasının gerekli bulunduğunu, yüksek yığma basıncının yanında kaynak süresinin kısa olan deney numunesinde en iyi bileşiğin olduğu gözlenmiştir. Şahin (2001) sürtünme kaynağıyla birleştirilen ostenitik AISI 304 paslanmaz çelik kaynak bölgesi niteliklerinin incelenmesiyle artan sürtünme zamanı ve basıncıyla bağlantının mekanik niteliklerinin düştüğü belirtilmiştir. Taskın vd. (2005) 6 saniyelik sürtünme, AISI 430 ve AISI 1010 çelik çifti, 2000 ve 2200 dev/dak, 8 saniyelik yığma sürelerinde, 40 MPa yığma basıncı, 25 ve 35 MPa kuvvet ile farklı sürtünme basınçları, kullanılıp mikrosertlik ve mikroyapı incelemeleri sonucunda, bütün kaynak numunelerinin tahrikli sürtünme kaynak makinesinde birleştirilmiştir. Mikroyapı kaynak bölgelerinde oluşan mikroyapısında önemli değişiklikler görülmemektedir. Devir sayılarının artması ile ITAB'ın genişlemiş olduğu ve aşırı deformasyon gördüğü alanda sertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Şahin (2007) ostenitik-paslanmaz çelik AISI 304 sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, farklı sürtünme süresi ve sürtünme basıncı altında kaynak deneyleri yapılmıştır. Çentik darbe testleri uygulanmış ve sonuçlar malzemelerin mukavemetleri ile karşılaştırılmıştır. Arayüzlerdeki sertlik değişimleri incelenmiştir. James vd. (2016) farklı çelikler SS 304 ve AISI 1040 sürtünme kaynağında, kaynak bölgesinin incelenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Östenitik

paslanmaz çelik 304 ve orta karbonlu çelik AISI 1040'ın sürtünme kaynakları farklı parametreler ara tabakalı ve ara tabakasız kaynağın özelliklerini karşılaştırmıştır. Deneyler, sürtünme basıncı, dönme hızı ve sürtünme süresi gibi kaynak parametreleri ile yapılmıştır. Korkmaz (2017) alüminyum alaşımlı boru-plakaların dıştan takım yardımı alarak, sürtünme kaynağı yöntemi ile yapılabilişliğini incelemiştir. Bu çalışma da alüminyum alaşımları AA6063 borular, AA6082 plakaya dıştan bir takım yardımıyla sürtünme kaynağı metoduyla başarılı şekilde birleştirilmiştir. Ardından plakanın üstüne açılmış olan kaynak ağzı, boruyla plakanın arası boşluk ve boru çıkma yükseklikleri parametresi değiştirilip bütün parametrelerin kesme dayanım değerine, sertlik değeri ve kaynak bölgelerindeki içyapı oluşumuna tesirine bakılmıştır. Kimura vd. (2017) sürtünme kaynağı koşulunun, saf Al (CP-Al) ve östenitik paslanmaz çelik AISI 304 arasındaki sürtünme kaynaklı bağlantıların birleştirme olayı, çekme mukavemeti ve sünekliği üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Sürtünme torku, kaynak arayüzündeki sıcaklık değişiklikleri ve kaynak arayüzündeki geçiş değişiklikleri gibi sürtünme kaynak yöntemleri araştırılmıştır. Khidhir vd. (2019) sürtünme kaynak parametrelerinin farklı çelik malzemeleri, AISI 1045 orta karbonlu çelik ve AISI 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneysel sonuçlarda, sürtünme basıncı arttığında kaynak ara bölgesinde sertlik değerinin arttığını, çekme mukavemetinin ise azaldığını göstermektedir. Sertlik grafiği profili ayrıca kaynakların iki ana metal kısmında daha yüksek sertlik dereşerleri olduğunu göstermektedir. Wang vd. (2020) 6061 Al alaşımı ve 304 östenitik paslanmaz çelik, farklı kaynak parametreleri altında sürekli tahrik sürtünme kaynağı yöntemi ile başarıyla birleştirilmiştir. Arayüzde herhangi bir oluşumunun bulunmadığı düşük sürtünme süresinde ve yüksek yığıma basıncında %88 bağlantı verimliliğine ve 80° bükülme açısına sahip sağlam kaynaklı bir bağlantı elde edilmiştir. Chen vd. (2021) çalışmada, titanyum, SUS 304 östenitik paslanmaz olmak üzere iki tip paslanmaz çelik ile kaynaklanmıştır. SUS 304 ve SUS 821L1 dubleks paslanmaz, SUS 821L1'in dalgalı arayüzü SUS 304'ün kinden daha küçük ve girdap bölgesi hem boyuna hem de enine yönlerde olduğu gözlemlenmiş ve bileşimi analiz edilmiştir. Ma vd. (2021) arayüzey mikroyapısı üzerindeki etkisini tespit ederek çelik yüzey pürüzlülüğünün önemi ve elde edilen 6061 Al alaşımı ile 304 paslanmaz çelik sürtünme kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri incelenmiştir. Çelik yüzey pürüzlülüğü, bağlantı mukavemetinde gözle görülür bir artış gösterdiğini tespit

etmiştir. Çekme özelliklerinin değişimi daha sonra arayüzey mikroyapısı ve yüzey hatalarının olasılıklarının analizleri arasındaki etkileşimleri incelenerek netleşmiştir. Fukumoto vd. (2000) Al-Mg alaşımı ve östenitik çiftinin sürtünme kaynağı arayüzeyinin mikroyapısı, paslanmaz çelik, yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu ile araştırılmıştır. Alüminyum alaşımı ve paslanmaz çelik arasındaki sürtünme kaynağı arayüzeyi TEM kullanılarak araştırılmıştır. Kaynak arayüzeyinde oluşan amorf tabaka ve amorf/kristalin yığılmış tabakalar da gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta, intermetalik bileşiklerin oluşumuna kadar bir arafaz olduğu gözlemlenmiştir. Chatha vd. (2021) çekme mukavemeti değeri ve vickers mikrosertliğinin karşılaştırması ile seçilen malzemelerin kaynaklı bağlantıları yapılmış. Kaynak mukavemetini, çekme mukavemetini ve vickers mikrosertlik testi yapılmıştır. En uygun 3920 kN çekme değeri ve 278 vickers sertlik değeri tespit edilmiştir. Kaynak arayüzeyinde (HV) sertlik değeri belirtilen alaşım elementlerinin bileşiminin malzemeler kaynak kabiliyetini etkilemiştir. Matsuda vd. (2021) temel alaşımlardaki ve arayüzey yapısındaki mikroyapısal değişikliklerin kaynak bağlantısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Paslanmaz çelik ve A5083 alaşımı arasındaki farklı bağlantıların çekme mukavemeti araştırılmıştır. A5083'teki oksit tabakası ve alaşım elementleri arasındaki bileşik oluşumu ile kısa bir sürede birleştirilmiştir. Mekanik sürtünme basınçının yanısıra oksit tabakası ile alüminyum alaşımında bulunan Mg arasındaki arayüzey reaksiyonu, oluşturmada arayüzey yapısının ve birleşme yüzeyi özelliklerinin tasarımında önemli bir rol oynayan yüzey oksit tabakası oluşmamaktadır. Lineer sürtünme kaynağında paslanmaz çelik/alüminyum alaşımly arayüzey tabakası oluşturulmuştur. Kumar vd. (2021) karbon çeliği ve düşük alaşımly çelik borular arasında döner sürtünme kaynakly bağlantılar hazırlanmışlar. Genel olarak, mikroyapı karakterizasyonu, benzer ve farklı çelik birleştirme koşullarının tüm türlerinin arayüzeyine yakın tane boyutlarında incelmeyi ve karbür çökmesini ortaya çıkarmıştır. Çalışma aynı zamanda, farklı çeliklerde, kaynak arayüzünün mekanik özelliklerinin, otomatik bilye ile girinti tekniği kullanılarak uygun bir şekilde elde edilebileceğini gösterilmiştir. Kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, tane boyutu inceltme ve temperlenmiş mikroyapısının farklı özelliklere sahip iki maddenin birleşmesi ile bağlantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Zhang vd. (2021) çalışmada, alüminyum alaşımının paslanmaz çeliğe ile sürtünme kaynağında intermetalik bileşiklerin oluşumu üzerindeki plastik şekil

değişimi incelemiştir. Sürtünme kaynağı, intermetalik bileşik mikron seviyede sınırlayarak mekanik özellikler, korozyon direnci ile Al ve çelik alaşımları birleştirilmiştir. Balalan (2013) toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al matrisli SiC_p takviyeli metal matrisli kompozit (MMC) ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzeme çifti farklı üretim parametreleri (devir sayısı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı) kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Parametrelerin kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısındaki değişim ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiş. Aşırı deformasyona uğramış bölge, kaynak arayüzeyi sürtünmesi ile termomekanik etkisi sonucu, MMC tarafında tane incelmeleri ve karbür yığılması, AISI 304 östenitik paslanmazda ise pekleşme etkisi bir bant olarak görülmüştür.

2.1. Kaynaklı Birleştirme Yöntemleri

Kaynak, metalik veya plastik malzemenin basınç, ısı yada her ikisi kullanılarak bir malzeme ilavesi veya kullanmadan gerçekleşen kalıcı birleştirme yöntemidir. Katkı malzemesi ise birleştirilen malzemeler ile aynı türden malzeme veya aynı ergime sıcaklığına yakın malzemelerden seçilir. İki metal arasında kristal yapıyı meydana getirmek ve birleşimini oluşturmak için parça malzemeleri arasında benzerlik olmalıdır. İstenilen metalurjik bağ oluşması için; gaz, yağ ve oksitten temizlenen uyumlu ve düz yüzeylerde, metal ve tek kristalli ya da benzer kristalografik yapıya sahip olan iki metal gerekmektedir. Bu olanakların laboratuvar ortamında sağlanmaları oldukça güçtür, pratik uygulamalarda tamamen gerçekleşmesi imkânsız olmaktadır. Bundan dolayı bu güçlüğü aşmak için farklı türde kaynak yöntemi geliştirilmiştir (Çiğdem, 2006).

2.2. Kaynak İşlemi

Metallerin kaynağı, uygulama alanlarına göre ergitme kaynağı ve katı hal kaynağı olarak ikiye ayrılır.

2.3. Ergitme Kaynak Yöntemi

Metalik özellikleri olan, ergitme sıcaklığı aynı veya birbirlerine yakın malzemelerin basınç, ısı veya ikisini aynı anda kullanıp, ilave metal eklenip veya eklenmeden oluşturulan birleştirme işlemidir. Ergitme için gerekli ısının uygulanma şekline ve kaynak bölgesinin korunmasına göre aşağıdaki alt sınıflara ayrılır (Çiğdem, 2006).

- Elektrik ark kaynak metodu
- Oksi-Gaz kaynağı
- Gaz altı kaynak metodu
- Elektrik direnç kaynak metodu
- Özlü telle ark kaynağı
- Plazma kaynak metodu
- Elektron ışın kaynak metodu
- Lazer kaynakları metodu
- Toz altı kaynak metodu

2.4. Katı Hal Kaynağı

Aynı özelliklere sahip veya farklı özelliklerdeki iki malzemenin ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklık değerinde basınç etkisi ve plastik şekil değişikliğinin etkisi sonucunda meydana gelen bir birleştirme işlemidir (Gürler, 2000).

2.4.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Katı hal kaynağı iki malzemenin temizlenmiş yüzeyinin, birbirlerine göre izafi olacak şekilde atomsal bağa izin verecek kadar yakınlaştırmak gerekmektedir. Bunun sağlanması üzerine çoğu teknik uygulanmakta tüm işlemler de önemli olan, üstünde tabaka olmayacak şekilde iki yüzeyine basınç uygulamaktadır. Katı hal kaynağı işlemleri şöyle gruplara ayrılır (Dinç, 2006).

- a. Sürtünme Kaynak Yöntemleri,
- b. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemleri,
- c. Difüzyon Kaynak Yöntemleri,
- ç. Nokta Direnç Kaynak Yöntemleri,
- d. Patlamalı Kaynak Yöntemleri,
- e. Ultrasonik Kaynak Yöntemleri,
- f. Yüksek Sıcaklıkta Basınç Kaynak Yöntemleri,
- g. Soğuk Basınç Kaynak Yöntemleri,

2.5. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme: cisimin ya da maddenin birinin bir diğerine bağlı şekilde hareket ile kinetik enerji kaybı olarak ifade edilmektedir (ASM Handbook, 1992).

Sürtünme temas yüzeyi olan iki cismin ara yüzeyinde meydana gelen kuvvet ile oluşmaktadır. Bu kuvvet yükü birlikte teması olan malzemelerin nitelikleri ve temas alanlarının şekil tespit edilir. Gerçek temas alanları cismin görünmüş olan alanlarından çok daha küçüktür. Yüzey teması atomik düzeyde, bir düz yüzeyde gerçekleşmemektedir. İşlenmiş parçalar farklı yüzey şekline sahip olmaktadır. Bu farklar; çalışma parçasının atomik yapısı, sistemdeki titreşimler ve işleme aletinin geometrisidir.

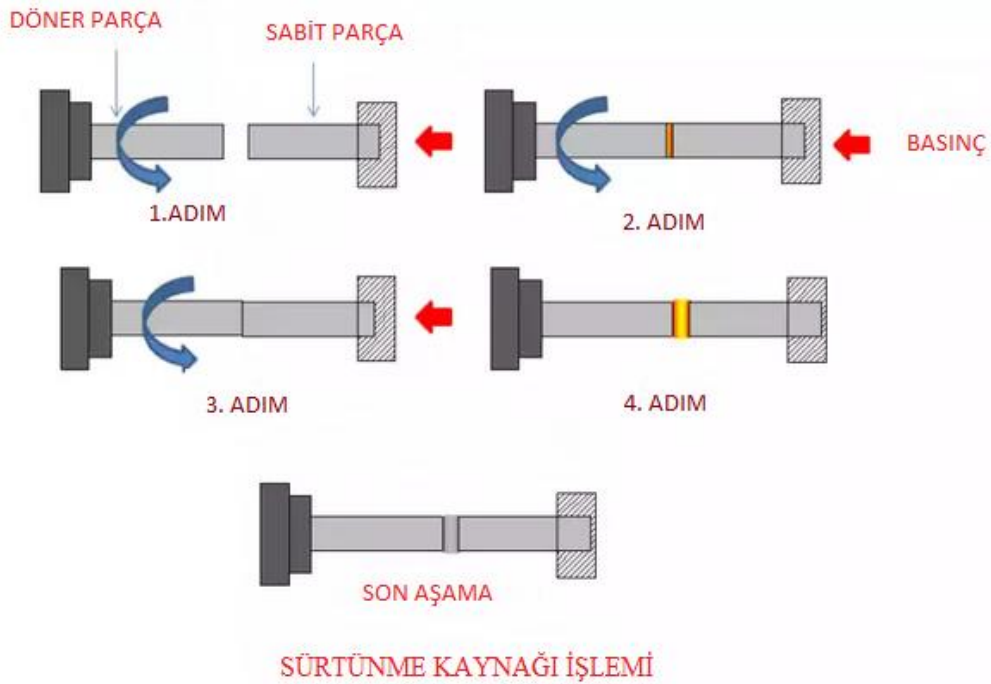
Sürtünme Kuvveti; bir katıyla teması olan cismin bir başkası üstünde kaymasını sağlayan teğet halinde olan yüzeysel kuvvettir. Sürtünme, yüzeyinde meydana gelir ve yüzeye dik şekilde kuvvet ile orantılı olmaktadır. Sürtünme kuvveti aşağıda bulunan deneysel formül ile tespit edilir.

$F = u \cdot N$ Burada; F = Sürtünme kuvveti, u = Sürtünme katsayısı, N = Yüzeye dik bulunan normal kuvveti belirtmektedir.

Sürtünme kaynağı (SK); biri sabit diğeri ise dönel hareketlere sahip olan iki parçanın ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme yoluyla mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesi sonucunda ısıdan yararlanıp aksenal basınç altında ara yüzeyde plastik deformasyonlar meydana getirilerek oluşan katı hal yöntemidir. Sürtünme kaynağında sürtünme süreci boyunca sürtünen yüzeylerin aksenal basıncının altında olmaktadır. Isıtma ya da sürtünme aşaması birleşme bölgelerinde plastik deformasyonun sıcaklığına kadar devam eder. Bu sıcaklıklarda dönme hareketi ani frenlemeyle durdurulur ve aksenal basıncı yaklaşık olarak iki kat çoğaltılarak yığılma meydana getirilir. Normal şartlarda ara yüzeyde ergime olmaz. Sebebi ise meydana gelen sıcaklık malzemelerinin ergime sıcaklıklarından daha düşük olmasıdır. Bu kaynağın tekniğinde ilave olarak koruyucu ve metal gaza gereksinim duyulmaz. Bu birleştirme metodu dairesel kesitli parçaların kaynaklarında yaygın bir kullanımı bulunmaktadır.

Kaliteli bağlantıların oluşmaları için bir mekanizma bulunmaktadır (Darby, 1982).

- a. Sürtünme kuvveti tüm oksit ve diğer tabakaları parçalanıp yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Sürtünen yüzeyler de sürekli temas kaynağı esnasında oksit filmin meydana gelmesini engellemektedir.
- b. Sürtünme kaynakları esnasında kaynak oksit bileşiklerinin büyük bölümü uzaklaştırılmıştır.
- c. Bağlantı bölgeleri, hızlı yerel soğuma ve ısıtma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli yapıda bulunmaktadır.
- Ç. Hızlı yerel ısınma ve bağlantılara oranla bitişik bir şekilde geniş ısıtılmayan alanların ısıyı yerel ısınmayan alandan hızla çekmesi sonucunda çok dar ITAB meydana oluşur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sürtünme kaynağı işlem basamakları (Özdemir, 2003)

Kaynak esnasında meydana gelen flanş şeklinde olan yığılma kaynak cihazında yada farklı bir torna makinesinde alınması gerekir. Bu flanş olmadığı durumda çentik tesiri olacak bu da kaynaklı bağlantıların dayanımlarını kötü anlamda etkisi olacaktır. Sürtünme ısısı, yatay ve enine olacak şekilde parçaların ergime sıcaklıklarının altında olan sıcaklığa vardığında oluşmaktadır (Özdemir, 2003).

Sürtünme temas yüzeylerinde bölgesel şekilde birbirlerine teması olan ve sürtünme ani yükseltilerden kaynaklandığı ve bunun hemen koparıldıkları bu esnada noktasal değme yerinde sıcaklığın kısa süre için çok yüksek düzeylere vardıkları ile ilgili bir takım görüşler bulunmaktadır. Sürtünme yüzeyinde kısa süre içerisinde yüksek sıcaklığa ulaşılmakta ve uygulanmış olan baskı kuvveti altında parçanın birleşmesi için yeteri kadar oluşmamaktadır. Sürtünme kaynağında, yalnızca parçanın kaynak ile birleşeceği kısımda ısı üretimleri söz konusu olmaktadır. Kaynak süresinde sürtünme olan yüzeyler basınç altındadır. Isıtma fazı şeklinde isimlendirilen sürecin yüzeyde plastik şekil değişikliği sıcaklık oluşuncaya kadar sürer. Genellikle, çelikler için kaynak bölgelerindeki sıcaklık 900-1300°C aralığındadır (Çiğdem, 2006).

2.5.2. Sürtünme Kaynağı Parametreleri

Sürtünme kaynak yöntemlerinde dikkat edilmesi gereken çok fazla parametre vardır. En önemli parametre; sürtünme basınç kuvveti, çevresel hız, sürtünme süresi, yığma basınç kuvveti, yığma süresi ve sürtünme süresidir. Parça geometrisi, malzemelerin şekil değiştirme kabiliyeti, malzemelerin ısıl kapasitesi, parça boyutlarında oluşan kısalmaya da dikkat edilmelidir (Dinç, 2006).

2.5.3. Çevresel Hız

Sürtünme kaynaklarında birleşmede olan kaliteyi etkileyen önemli parametre çevresel hız olmaktadır. Çevresel hızın yüksek olması durumlarında ara yüzeyde bulunan sıcaklık çoğalırken, çevresel hızın düşük olması arayüzeyde yetersiz ısınmaya sebep olacaktır. Bu durum çalışmaya etki edecek kadar büyük momentin oluşmasına ve düzenli olmayan ısıtmalardan ötürü üniform olmayan yığmalara sebep olmaktadır. Sonuç olarak kaynak bağları bu durumdan olumsuz şekilde etkilenir. Başka metal bağlantılar için düşük çevresel hızlar, gevrek intermetalik yapı oluşumu sınırlandırılabilir. Çevresel hızın yüksek olması halinde ısı tesirinin altında olan bölge (ITAB) genişler, kaynak bölgesin de böyle oluşacak yüksek ısının kontrolleri için sürtünme süresi ve sürtünme basıncı dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Çelikler için çevresel hızda 1,2-1,8 m/s aralığında olması önerilir (Çiğdem, 2006).

2.5.4. Sürtünme Basınç Kuvveti

Sürtünmenin basınç kuvveti, parça geometrisi ve kaynağı olacak malzeme çiftlerinin plastik şeklini değiştirme özelliklerine bağlı olmaktadır. Sürtünme basıncının arayüzeyde olan oksit filmini, yabancı tabaka, kir, yağları ortadan kaldırarak yüzeyin atmosferle ilişkilerini kesecek ve düzenli olarak ısıtmayı sağlayacak değerlerde seçilmesi gerekmektedir. Düşük alaşımlı ve alaşımsız çeliklere uygulanmış olan basıncın iki katına çıkarılması güç ihtiyacını % 50 yükseltir. Düşük alaşımlı ve alaşımsız çeliklerden yapılmış olan sürtünme kaynakları için güç isteği, başlangıç durumu için 4,8 kw/cm² olmaktadır. Daha hızlı yüksek basınç ve enerji girişi, ısı tesirinin altında olan bölgenin (ITAB) genişliklerinde önemli olmaktadır. Metal yer değiştirme düzeyini hızlandırır ve bu şekilde kaynak süresi kısalıp paralelliği olmayan kenarlı ısı şeritleri meydana getirir. Eğimi az olan sıcaklık gradiyentinin iç yüzeyinde hızlı soğumaya yol açması ve kaynak becerisini düşüren sert yapının meydana gelmesi sebebiyle, havayla sertleşen çeliğin kaynaklarında bu durumlar önemli olmaktadır. Sürtünme süresinde gereken basıncın değeri malzemelerin cinslerine bağlı olmaktadır. Atmosfer etkilerini önlemek adına iki yüzeyin yakın teması olması gerekmektedir (Çiğdem, 2006).

2.5.5. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresi malzemenin özelliğine göre değişim gösterir. Bu süre, sürtünen yüzeydeki bütün kalıntıyı ve pisliği uzaklaştıracak, kaynak bölgesi için gereken sıcaklığa kısa sürede varmasına yardımcı olacak şekilde ayarlanmalıdır. Zamanın çok ya da az olması malzemelerin ısınmasına etki edeceğinden kaynak kalitelerine etkisi olacaktır. Normal seviyeyi geçen ısıtma süresi, düşük iletkenliklere, daha çok malzeme tüketimlerine, aşırı yığılma ile beraber geniş bir ITAB'ın meydana gelmesine sebep olur. Uygun olmayan sürtünme süresi, düzenli olmayan ısıtma ile ara yüzeylerde birleşmeyen bölgelerin meydana gelmesine ve kirlenmeye sebep olur (Dinç, 2006).

2.5.6. Yığma Basınç Kuvveti

Çeliğin kaynaklı birleşiminde kaliteyi arttırmak için sürtünmeden sonra yığma basınç uygulanması gerekmektedir. Burada ki basınç malzemesinin akma sınırına bağlıdır. Yığma basıncının yüksek olması kaynak yığılmalarına sebep olur, düşük olması farklı şekillenmelere ve yetersiz kaynaklanmalara neden olmaktadır. Yığma basıncının, malzeme birleşiminin iyi olması için malzemenin sıcak dövme mukavemetinin altındaki değeri bulunmalıdır. Aksi halde yığma basıncı çok yüksek olursa malzeme fazla deformasyona uğrayacak, kaynak bölgelerinde metalik olmayan yapılara enine akış gösterip tekrar şekillenecektir. Bu da kaynağın kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz yönde etkiler.

2.5.7. Yığma Süresi

Kaynaklanacak parçaların ara yüzeylerinde plastik deformasyon meydana getirmek ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından olan difüzyonu hızlandırmak için yığma basıncının kuvveti ve uygulanma süresi olmaktadır. Tamamiyle malzeme türüyle alakalıdır. Yığma süreci malzemelerinin soğuma hızına bağlı şekilde değişim göstermektedir. Yığma süresinin de az yada çok olması, aynı sürtünme sürecindeki gibi malzemelerinin ısınmasına etki edeceğinden kaynak kalitelerine tesiri bulunur. Sürtünme kaynakları üstüne yapmış olduğu araştırmada, malzemeye göre uygun kaynağın parametresinin neler olacağını tespit etmeye çalışmıştır (Ellis, 1976).

Malzeme türüne göre uygun kaynak parametreleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Malzemelere göre uygun kaynak parametreler

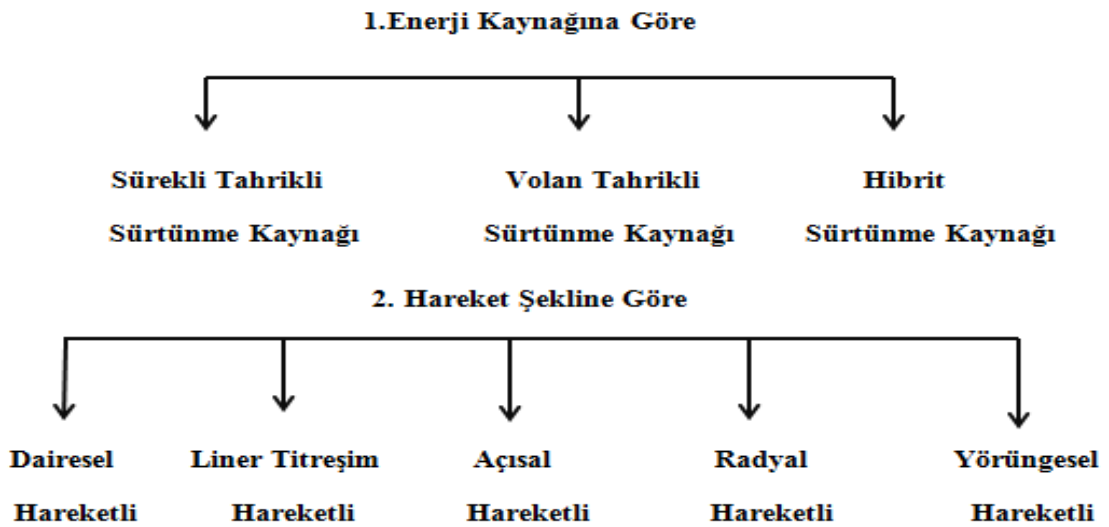
Malzeme	Çap (m)	Sürtünme Kuvveti (N/mm ²)	Yığma Kuvveti (N/mm ²)	Sürtünme Süresi (sn)	Yığma Süresi (sn)	Çevresel Hız (m/sn)
Alaşimsız ve Alaşımlı Çelikler	20	20-80	80-200	1-100	250	0,5-5
C60	20	50-80	150-250	3-6	2-3	3,5-6
42CrMo ₄	20	50-80	150-250	3-6	2-3	1,5-3

Tablo 2.1. (Devam): Malzemelere göre uygun kaynak parametreler

Yüksek Alaşımli Çelikler	20	40-100	120-400	3-120	2-10	0,5-5
X5CrNi188	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
Nimonic80	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	1-4
TiAl ₆ V ₄	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
AlMgSiO 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

2.6. Sürtünme Kaynağı Çeşitleri

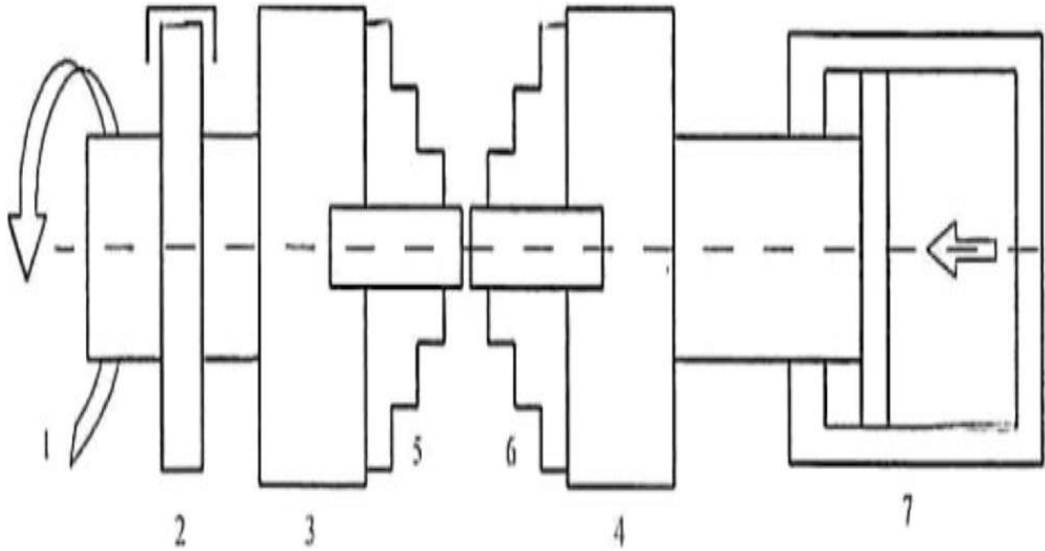
Sürtünme kaynağı, enerji kaynaklarına göre üç grup, hareket şekillerine göre beş grup altında incelenmektedir. Sürtünme kaynaklarının sınıflandırılmaları Şekil 2.3'te verilmiştir (Kaluç, 2007).



Şekil 2.3. Sürtünme kaynağının sınıflandırılması

2.6.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu yöntemde parçalardan birine elektrik motoruyla sürekli dönme hareketi verilirken, diğer parça hidrolik veya pnömatik olarak baskı kuvvetini sağlar. Sürekli olan tahrikli sürtünme kaynakları şematik olarak Şekil 2.4’de verilmiştir. Sürekli olan tahrikli sürtünme kaynağı yığma ve ısıtma şeklinde iki aşamayla gerçekleşmektedir. Birleştirilmiş olan yüzeylerin plastik şekil değiştirme sıcaklıklarına kadar ısıtılmaktadır, yüzeyin basınç altında döndürülmesi ile birbirine sürtünmektedirler. Kaynak yapılacak malzemenin özelliğine göre ön ısıtma yapılabilir. Isıtma aşamasından sonra ki işlem yığma işlemidir. Sürtünme işlemi tamamlandığı zaman ani fren uygulanmaktadır. Frenleme esnasında birleştirilmiş olan parçanın yüzey aralarında boyun oluşumu ile kaynak işlemi tamamlanır. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı bulunan parçaları ve Şekil 2.4’de sürekli tahrikli sürtünme kaynağının zamana göre sürtünme parametreleri; sürtünme zamanı, sürtünme hızı, yığma basıncı görülmektedir (Dinç, 2006).



Şekil 2.4. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı (Dinç, 2006)

1-Tahrik motoru, 2-Fren, 3-Dönen parçanın bağlandıkları ayna, 4-Sabit iş parçasını bağlandığı ayna, 5-Dönen iş parçası, 6 -Sabit iş parçası, 7 -Yığma silindiri

2.6.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Elektrik motoruyla ilk hareketi oluşturan, volan üzerinde bir dönme hareketi ile kaynak işlemi için gerekli olan enerjiyi depolanır. Dönen volanda toplanmış olan dönme enerjisi, sürtünme esnasında üzerine uygulanan basınçla malzemeler arasında sürtünme ile ısı açığa çıkar ve volan bu esnada yavaşlamaya başlar. Oluşan ısı ve basınçla parçalar birleşmiş olur ve volan üzerinde depolanan enerji bittiği için durur. Volanın ataletinden dolayı oluşan enerji atalet sürtünme kaynağı olarak bilinmektedir. Volan tahrikli sürtünme kaynak sisteminde sürekli tahrikliden farklı olarak fener mili üzerine bağlanmış bir volan mevcuttur. Hızlanma ve yığıma aşamaları benzer olmasına rağmen volan tahrikli sistemde sürtünme hızı sürekli düşmesine rağmen sürekli tahriklide sabit kalmaktadır. Her iki yönteminde avantaj ve dezavantaj olmasına rağmen kaynak parametrelerinin hassas olarak kontrol edilmesi nedeni ile sürekli tahrikli sistemin yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır (Kaya, 2010).

Volan tahriki ile çalışan, sürtünme kaynak işlemleri ilk olarak sürtünme, ısınma ve yığıma şeklinde üç aşamadan meydana gelir. İlk sürtünme parçaların birbirine sürtünmesi ile başlamaktadır, moment maksimum düzeye çıkıp ardından sabit seviyeye inmesi ile bitmektedir. Isınma esnasında oluşan sıcaklık, yüzeylerin arasında birbirine doğru iletilmektedir. Aynı zamanda parçalar arasında bir miktar aksenel kısalma azalma meydana gelir. Yığıma aşamasında hız belirli düzeye düşer, volan tarafından dağıtılmış olan enerji, yüzeylerden ileten miktarlardan az bulunmaktadır. Sıcaklık ve hız düşerken yığıma başlar. Kaynak bölgesi sertleşirken moment tekrar maksimum seviyeye yükselir. Birleşme bölgesi soğurken hız ve moment tekrar sıfıra düşer (Gül, 2006).

2.6.3. Hibrit Sürtünme Kaynağı (Kombine Edilmiş Sürtünme Kaynağı)

Büyük kapasitesi olan parçaların birleşmesinde avantajlıdır. Bu kaynak metotunda iki aşama bulunmaktadır. Aşamalar yığıma ve sürtünmedir. İşlem başlangıcında kuru sürtünme ve bu sürtünme etkisi ile moment eğrisinin zirve yapmasının ardından tekrar denge halini alır. Bununla birlikte oksit tabakaların parçalanmasının sonucunda yüzeyde temas esnasında kuvvetli atomsal bağların oluşması başlar. Oluşmuş olan

bağları sürtünme hareketiyle koparılmaya çalışılmaktadır. Sonuç olarak temas noktasında büyük adezyon kuvveti oluşur, moment yükselir ve sıcaklık istenen düzeye varır. Frenleme sonrasında hız düşerken momentte sıfır oranına iner. İkinci aşama da, kaynak numunesi sürtünmeyle yeteri kadar ısındığında, atalet momentlerine sahip olan mili durdururmaktadır. Yığıma işlemleri için basınç korunarak veya arttırılmaktadır. Bu basıncın, kaynak olacak malzemelerinin sıcaklık mukavemetlerine göre seçimi gerçekleşir. Kaynak parametreleri; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme kuvveti, yığıma süresi, yığıma kuvveti ve frenlemeye başlama zamanıdır (Özdemir, 2003).

2.7. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı

Sürtünme kaynağında kaynak dikişlerinin, difüzyon ve ergitme kaynaklarındaki kaynak malzemesinin birbirlerine karışmış olduğu bölge ve bu bölgelerin etrafında her iki malzemenin iki tarafında da ısıdan etkilenen alanlar bulunmaktadır. Malzemelerin birbirlerine karıştığı bölgelerde difüzyon oluşur ve atomlar yer değiştirir. Isıdan etkilenmiş olan bölgelerin genel olarak kaynak esnasında meydana gelen sıcaklıklar, malzemenin erime sıcaklığının yarısına kadar çıkmış olduğu veya daha da üstüne çıktığı alanlardır (Özdemir, 2003).

Sürtünme kaynağının esnasında farklı malzemelerdeki içyapı değişim türleri aşağıda şekilde sıralanmıştır:

- a- İntermetalik fazın meydana gelmesi,
- b- Yüksek karbon oranına sahip alaşımız çelikler de karbon miktarlarının düşmesi,
- c- İçyapıda oluşan rekristalizasyon,
- ç- Ergitme sıcaklıkları malzemelerinin içeriğinden daha düşük olan ötektik alaşımlarının meydana gelmesi,
- d- İçyapıda tane irileşmelerinin oluşması,
- e- Çelikler de martenzitik içyapının dönüşümleri.

Yukarıdaki maddelerde verilen durumların, kaynak bağlantısının mekanik niteliklerini azaltır. İntermetalik fazların gevrek ve sert olmalarından dolayı kalınlığı belli

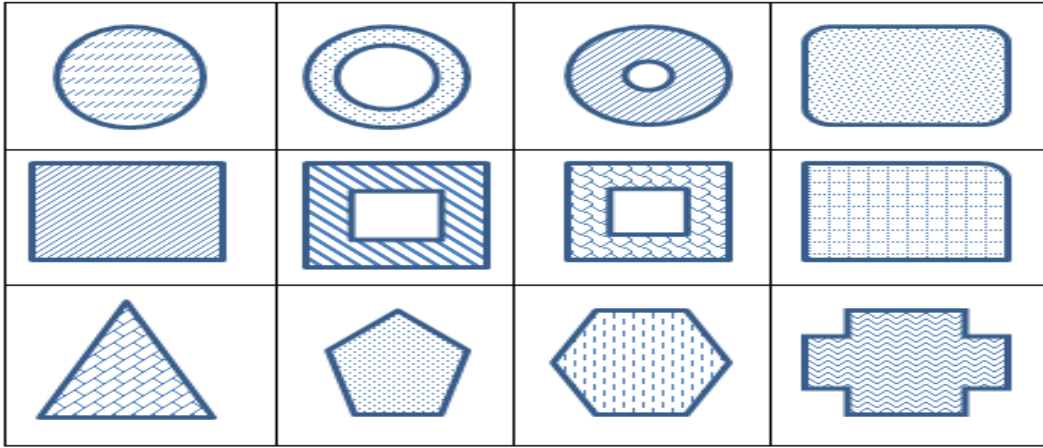
genişlikleri aşınca bulunduğu tabaka boyunca aşırı sertlik göstermektedirler. Alaşımsız çelikler de karbonun azalması mukavemet değerinin azalması anlamına gelmektedir. Böylece meydana gelen sünek bölgenin kaynak bağlantısının mukavemetide azaltacaktır. İçyapıda rekristalizasyon ya da tanelerin irileşmeleri, yumuşak bölgenin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Martenzitik dönüşüme uğramış olan bölgelerde belirli bir sertliği ve büyüklüğü aşınca intermetalik fazlar da olduğu şekilde gevrekleşmeye sebep olmaktadırlar (Özdemir, 2004).

Sürtünme kaynağının, kısa sürmesi ve aynı esnada sıcaklık yükselmesi, ardından flanş oluşumu sırasında plastik deformasyonunun oluşması, başka kaynak yöntemlerine göre malzemelerin içyapı dönüşümlerini azaltıcı bir avantaj olmaktadır (Karabulut, 2004).

2.8. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri

Sürtünme kaynağı genellikle aksenal simetrisi bulunan ve dairesel kesitli parçanın birleştirilmesinde kullanılan, cihazın otomasyonu ve bilgisayar ile kontrol olanağının gelişmesi ile beraber daire dışı kesitli parçanın birleştirilmesinde kolayca kullanımı sağlanmaktadır. Sürtünme kaynağıyla hem içi dolu hem de boş kesitlerin kaynağını yapmak mümkün olmaktadır. Dolu kesitler de parça için çap değerleri 1mm'den 300 mm'ye kadar bulunabilir. Boru şeklinde, birbirlerine benzer büyüklükteki kesit alanına sahip olan sürtünme kaynağıyla birleştirilebilirler. Günümüzde yapılan araştırmaların neticesinde, sürtünme kaynağıyla çoğu basit biçimli parçanın birleştirilme imkânı meydana gelmiştir. Teknolojinin gelişimiyle, sürtünme kaynağı cihazlarında dönel aynanın istenen pozisyonda frenlenmesinin sayesinde, dönel simetrisi bulunmayan kesitli parçalarında alın kaynaklarının yapılacağı ve oluşabilecek açısız çarpılmanın önleneceği ortaya çıkmıştır (Şahin vd., 2002).

Bir takım çalışmalar da, dikdörtgen kesiti olan yüksek kalite çeliğinin de kaynaklarının mümkün oldukları gözlemlenmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sürtünme kaynağı uygulanan yüzey kesitleri

2.9. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzemeler

Nitelikleri farklı olan malzemelerin birleştirilmesi endüstride büyük bir önem taşımaktadır. Sürtünme kaynağı tekniği, benzer ve benzer olmayan birçok malzeme çifti için uygun olmaktadır. Kolayca seri imalat için uygulanan sürtünme kaynağının, eritme kaynak yönteminin uygulanamadığı malzeme ve malzeme kombinasyonlarına da uygulanabilmektedir. Yapılmış olan araştırmalarda, zirkonyum-zirkonyum, çelik-zirkonyum titan-çelik çiftlerinin kaynakları bu metotla başarı ile gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parça (www.mtiwelding.com)

2.10. Sürtünme Kaynağı Uygulama Alanları

Sürtünme kaynakları günümüzde çoğu alan da uygulama alanı bulmaktadır. Sürtünme kaynağı seri imalata uygun olduğu kadar, tamirat işlerinin yapılmasında söz konusu olmaktadır (Özdemir, 2003).

Sürtünme kaynağının çeşitli endüstrilerde kullanım alanları şunlardır:

A) Makine İmalatı ve Hidroelektrik Endüstrisi

Flanslar, sonsuz vidalı miller, miller, fittingler, valflar, dizel motor pistonu sürtünme kaynağı, hidrolik silindirler, disli çarklar, borular, piston kolları, krank milleri, matkap uçlarının sürtüne kaynak yöntemleri ile üretimi gerçekleştirilmektedir (mtiwelding, 2022).

B) Kesme ve Delme Takım Endüstrisi

Matkap uçları, delik zımbaları, freze bıçakları, raybalar vb. elemanların üretiminde sürtünme kaynağı metodu uygulanmaktadır (Kaluç, 2007).

C) Otomotiv Endüstrisinde

Supaplar, dişli-mil parçaları, aks milleri, çatal-mil bağlantıları, vb. üretilmesinde sürtünme kaynağı metodu uygulanmaktadır (Kaluç, 2007).

D) Hidrolik Endüstrisi

Hidrolik silindirler, radyal pompa pistonu vb. parçalarında üretiminde sürtünme kaynağı metodu kullanımı gerçekleştirilmektedir (Özdemir, 2003).

E) Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisinde

Sürekli lehim ucu, devre kontağı, kromatograflar için ayırma sütunu, gaz analizi için alıcı kamera, röntgen cihazı tüpünde anot mili, geçiş parçası, flanşlar, boru tesisatı vb. parçaların üretiminde sürtünme kaynağı uygulaması bulunmaktadır (Kaluç, 2007).

F) Havacılık ve Uzay Endüstrisinde

Miller, flanşlar, borular, yanma odaları, rotorlar, bağlantı parçaları, fittingsler vb. malzemelerin üretimi sürtünme kaynağı yöntemi ile yapılmaktadır (Özdemir, 2003).

G) Onarım Amaçlı

Sürtünme kaynağı, yüklenmeden dolayı aşınan, plastik deformasyona uğrayıp eğilmiş parçaların atılması yerine onların onarılarak çalışır duruma gelmesinde de verimli şekilde kullanımı gerçekleşmektedir. Bu alanlar dışında farklı olarak, kimya endüstrisi ve gemi inşaatı sektörlerinde de sürtünme kaynağı kullanım alanları olmaktadır (Özdemir, 2003).

2.11. Sürtünme Kaynağının Avantajları

- a) Kullanılan enerji, başka kaynak metotlarına göre daha tasarruflu olmaktadır.
- b) İlave metal kullanılmadığından, bütün kesitlerde düzgün kaynak kaliteleri sağlanmaktadır.
- c) Kaynak bölgeleri, kir, pas ve oksit içermemektedir.
- d) Kaynağın ardından meydana gelen kaynak bölgelerinin mukavemeti, birleştirilmiş olan malzemenin dayanımına eşit hatta bir takım durumlarda daha çok olabilir.
- e) Bilinmiş olan kaynak metotlarıyla birleştirilmesi zor bulunan farklı kompozit malzemelerin sürtünme kaynak metoduyla kolayca birleştirilmektedir.
- f) Kaynak uygulamasında çok kolay ve kaynak yüzeyinde tam birleşme söz konusu olmaktadır.
- g) Kaynak parametre kontrolünü sağlamak basittir.

- h) Yalnızca silindirik değil, çok farklı kesitte olan malzemenin kaynağın kaynaklarını yapmak mümkün olmaktadır.
- i) Kaynak esnasında ve sonrasında ısı değişikliklerinde olan hızlı değişimlerin, kaynak bölgelerinde ince taneli bir yapı oluşmasına neden olmaktadır, bu durumda mukavemeti korumaktadır.
- j) Sürtünme kaynağı esnasında sürtünmenin etkisi ile oksit, yağ şeklinde yabancı maddelerin yüzeyden uzaklaştırılması sağlanır.
- k) Kaynağın öncesinde ayrı bir temizleme gerekli değildir.
- l) Kaynak süresi kısa, birleştirilme sıcaklığı düşük olmaktadır.
- m) Isıdan etkilenmiş olan bölge dar olmaktadır.
- n) Koruyucu atmosfere gerek duyulmamaktadır (Kaluç, 2007).

2.12. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları

- a) İş parçasının boyutu, sürtünme kaynağı makinesinin boyutuyla sınırlı olmaktadır.
- b) Kaynak ardından gevrekleşme söz konusu olmaktadır.
- c) Oksijene karşı büyük bir reaksiyon yönelmesi vardır.
- d) Kaynaktan sonra parçaların boylarında belli bir kısalma olduğundan, malzeme sarfiyatı söz konusu olmaktadır.
- e) Genellikle malzemeler kendi ekseninde dönen malzemelerden meydana gelmektedir.
- f) Büyük kesitli parçaların her bölgesinde aynı ısıtma söz konusu olmadığından kaynak bileşimi zor olmaktadır.
- g) Sürtünme kaynak makinelerinin ve teçhizatlarının maliyeti fazladır.
- h) Su verilen ya da su alınan malzemeler de mukavemet azdır.
- i) Özellikle yüksek karbon olan çeliklerde kaynaktan sonra sertleşme söz konusu olmaktadır.
- j) İş parçası, aksenal yönde basınç, ısı ve torka karşı dayanıklılığı bulunmaktadır (Kaluç, 2007).

2.13. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Katkı elementine göre değişim gösteren ve östenitik ve ferritik niteliklerde olan beş farklı çeşit paslanmaz çelik çeşidi bulunmaktadır.

Bunlar:

- a. Östenitik Paslanmaz Çelik,
- b. Ferritik Paslanmaz Çelik,
- c. Martenzitik Paslanmaz Çelik,
- ç. Çift Fazlı (Dubleks) Paslanmaz Çelik,
- d. Çökelme Yolu ile Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler olmaktadır (Sarıtaş, 2004).

2.13.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Bahsedilen paslanmaz çeliğin bileşimlerinde %12-25 Cr ve %8-25 Ni içermektedirler. Nikel, yüksek oranda östenit yapıcı olarak bulunduğu için, böyle çelikler de katılaşma esnasında meydana gelen östenit oda sıcaklığı altında olan sıcaklıkta dahi dönüşüm olmadan kalmaktadır. Soğuma esnasında Östenit-Ferrit dönüşümleri bulunmadığından su verme yolu ile sertleştirilemezler. Bunun içerisinde en çok bilinen 18/8 çeliği diye adlandırılan, bileşimde %18 Cr ve %8 Ni içermiş olan tür olmaktadır. Mıknatıslanamayan bu paslanmaz çeliğe korozyon dayanımı artırmak için bir miktar molibden ilave edilir (Makine Mühendisi, 1994).

Östenitik paslanmaz çeliklerin genel olarak nemli alanlarda kullanılır. Artan krom ve molibden içeriği çözelti oluşumuna karşı korozyon direncini çoğaltmasına yardımcı eder. Yüksek nikel içerikli gerilmeli korozyon çatlamlarına karşı riski düşürür. Östenitik paslanmaz çeliklerin katılan alaşım elementinin miktarlarına bağlı olarak genel korozyona, çukurcuk ve aralık korozyonuna direnci artar. Bu olayda çelik klor barındıran alanlarda kullanılmaları halinde daha fazla önem taşımaktadır. Aralık ve çukurcuk korozyonlarına direnci çoğalan molibden ve kromla yükselir (Kaluç, 1995).

Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliğin üretiminde, sıvı halinden beri katılaşma olunca, δ -ferrit ve östenit tanesi meydana gelmeye başlar. Bu δ -ferrit, östenit dönüşümlerinin sonucu olarak meydana gelen δ -ferritten farklı olmaktadır.

Katılaşmalar, normal şekilde çeliğin yapısı östenit tanelerinin aralarına serpilen δ -ferrit taneciğinde meydana gelir. Bu faz, krom ve δ -ferriti dengede tutan elementler bakımından zengin, östenit ve nikeli dengede tutan elementler bakımından fakirdir. Bu fazın meydana gelmesi çelik üreticisinin istemedikleri bir durum olmaktadır: zira malzemelerin sıcak şekillendirilmelerini zor hale getirir ve malzemelerde çatlağın meydana gelmesini teşvikler. Bu faz durmadan tanecik sınırında olması korozyon direncini düşürür. Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklıkta uzun sürede δ -ferrit fazı ile karşı karşıya kalmasının neticesinde, malzemelerin mukavemeti ve şekillendirilme yeteneğini düşürücü şekilde etkileyen gevrek ve sert sigma fazlarının meydana gelmesi şeklinde problemlerle karşılaşılır (Makine Mühendisi, 1994). Östenitik çeliklerin mekanik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Östenitik çeliklerin mekanik özellikleri

Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri						
AISI	Oda Sıcaklığı				Çalışma Sıcaklığı F°	
	Çekme Kuvveti (1000 Psı)	Akma Kuvveti 0,2% (1000 Psı)	Uzama 2" (%)	Sertlik Rockwell B')	Devamlı	Kesintili
201	115	55	55	90	1550	1450
202	105	55	55	90	1550	1450
301	110	40	60	85	1650	1500
302	90	40	50	85	1650	1500
302 B	95	40	55	85	1750	1600
304	84	42	55	80	1650	1550
304 L	81	39	55	79	1650	1550
305	85	38	50	80	1650	
308	85	35	50	80	1700	1550
309	90	45	45	85	1950	1850
310	95	45	45	85	2050	1900
314	100	50	40	85		
316	84	42	50	79	1650	1550
316 L	81	42	50	79	1650	1550
317	90	40	45	85	1700	1600
321	90	35	45	80	1650	1550
347	95	40	45	85	1650	1550

2XX serisinde, en fazla %7 nikel, %5 ile %20 aralığında azot ve mangan östenit içerisinde çözünürlükleri dolayısıyla dayanımları çoğalır. Katı çözeltilerde olan kristal kusura yerleşmiş olan azot, östenit içyapılarının mukavemetlerini yükseltir. 3XX serisiyse daha çok nikel ve en çok %2 mangan içermektedir. 301 ve 304 kalitesi en az alaşımı olan türlerdendir ve 3XX serisinin ana alaşımı şeklinde kabul edilir. Mükemmel şekillendirildiği, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımıyla 304 kalite östenitik çelik en yaygın şekilde kullanımı sahiptir (Sarıtaş, 2004).

2.13.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Edilebilirlikleri

Paslanmaz çeliklerin çoğu kaynak kabiliyetleri yüksek ve ark kaynakları, direnç kaynakları, elektron ışını ve lazer kaynağı, sürtünme kaynakları ve sert lehimleme vb. kaynak yöntemleriyle kaynak yapılabilir. Bahsedilen yöntemlerde birleştirilecek yüzeyin ve dolgu metallerinin temiz olmaları gerekmektedir. Günümüz de yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik, değişik kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirler, fakat paslanmaz çeliğin farklı bileşimlerinin, fiziksel ve mekanik özelliklerine etki etmesi, kaynak kalitesi bakımından kaynak hatalarına sebep olmaktadır. Bu hataları, kullanım ömrü bakımından da önemi vardır (Baylan, 2004).

Bu karakteristikleri özellikler;

- a) Paslanmaz çeliğin düşük ısı iletme katsayısı,
- b) Yüksek ısıl genleşme katsayısı,
- c) Yüksek elektrik iletme dirençleri,
- d) Soğuk şekillendirmelere karşı hassasiyet,
- e) Kaynak bölgesindeki yapısal değişimler tane irileşmeleri, karbür oluşumları, delta ferrit, sigma fazı'dır
- f) Korozyon oluşumuna karşı hassasiyetler,

Östenitik paslanmayan çeliğin kaynak edilebilirliklerindeki özellikler aşağıda verilmiştir.

1. Isı iletme katsayısı oda sıcaklığında düşük alaşımlı ve sade karbonlu çeliğin 1/3'ü kadar olmaktadır.

2. Isıl genleşme katsayısı sade karbonlu ve az alaşımlı çelikten %50 den daha fazladır.

3. Alaşımsız karbonlu çelikler düşük elektrik iletkenlik direnci bulunmaktadır. Bu tür paslanmaz çeliklerdeki elektrik iletkenlik direncinden 5 ile 7 kat daha fazladır.

Östenitik krom-nikelli paslanmaz çeliğin kaynak yeteneklerine etki eden fiziksel nitelikleriyle birlikte bir dizi metalurjik etkende bu çeliğin kaynağında önemli rol oynamaktadır; bunlar delta ferrit fazlarının meydana gelmesi, tanelerin arasında korozyona hassasiyetler, gerilmeli korozyonlara hassasiyet ve sigma fazlarının meydana gelmesidir.

Östenitik paslanmaz çelik kaynağında meydana gelen bir diğer sorunda, özellikle 18/8 çelikleri şeklinde bazı krom-nikelli çeliğin 450-850 °C sıcaklık aralığında olan bir sıcaklıkta uzun zaman kalmasında dolayı meydana gelen krom karbür çökmesi eğilimi olmaktadır. Bu çeliklerin üretimi esnasında krom karbürün östenit içinde çözüldükleri 1100 °C'den itibaren hızlıca soğutulurlar. Böylece bu elementin çökme tehlikesi yok olur ve oda sıcaklığında karbonun difüzyon hızı az olduğundan, kullanım sırasında krom karbürün oluşturma olanakları bulunmamaktadır. Sıcaklığı 450 °C'nin üstüne çıkmasıyla karbonun difüzyon hızı, karbonu tane sınırından dışarı çıkartacak seviyede çoğalır. Tane sınırında biriken karbon, kroma karşı olan yüksek ilgiden ötürü bu alanda kromla birleşip krom karbür meydana getirir (Cr_3C_2). Meydana gelen krom karbürün ağırlıklı şekilde %90'ını krom meydana getirdiğinden, tane sınırında olan çok az karbon bile östenit tanenin çevresinde olan krom miktarlarını aşırı oranda azaltır. Bunun sonucunda malzeme krosif bir alanda olduğunda, krom oranı düşmüş olan tane sınırında korozyon meydana gelir. Çelik karbon içeriği yükseldikçe meydana gelen taneler arasında korozyon tüm malzemenin çok kısa süre içinde kullanılamaz hale getirir. Isı etkisi altında olan bölge (ITAB), kaynak süreci boyunca, 500-900 °C sıcaklık aralıklarında tavlı şekilde kalmakta ve bununla birlikte burası esas metal bulunduğundan, karbon içeriklerinin çok olması durumunda östenit tane sınırında taneler arasında korozyona sebep olacak karbür çökmesi olayı meydana gelmektedir (Taşdemir, 2006).

2.13.3. AISI 304 Paslanmaz Çeliği

Günlük kullanımlarda ve standart üretim için yeteri kadar olan kalite, daha korrozif ortamda paslanacağından tercih edilmez. Daha sert koşullar da, 304 kalite paslanmaz çeliğin yerine 316, 316L, 316Ti ya da dubleks (1,4462) kalite paslanmaz çelik tercih edilmelidir. Mekanik dayanım bakımından çoğu zaman yeteri kadar olan bu paslanmaz çeliğin kalitesi, yüksek akma ve kopma dayanımları istenilen yerde tercih edilmez. Mekanik özelliklerin ön plana çıktığı zaman malzeme yapısına da bakılmalıdır. Bu kalite malzeme, standart dövülebilme yeteneğine sahip olmaktadır. Metal dövmenin aşırı yoğun bulunduğu yerde tercihi olmamalıdır. Aşırı kaynak olmayan yerler içinse düz 304 kalite paslanmaz çelik ideal bir malzeme olmaktadır. Kaynak daha yoğun olduğu yerlerde daha düşük karbonlu bulunan düşük karbonlu 304L kalite malzeme tercih edilmelidir. İşlenebilirlik bakımından çokta kötü bulunmayan bu malzeme, işlemenin yoğun bulunduğu alanlarda tercih edilmez. 304 kalite paslanmaz çelik özellikle torna tezgahında talaş sardığından daha az tercihi edilir. Bu tarz işlemlerin yoğun olduğu alanlarda 304'ün otomat türü olan 303 kalite paslanmaz çelik tercih edilmelidir (Bircelik, 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan çalışmada farklı özelliklere sahip metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak etmek bazı olumsuz sonuçlar meydana getirmektedir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırabilmek ve sürtünme kaynağı ile yüksek mukavemetli birleştirmeler elde edilebilmesi amaçlanmaktadır. Deneysel çalışmada 12 mm çapında AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 1040 çeliği kullanılmıştır. İki farklı çeliğin devir sayısı sabit tutularak (2200 dev/dak), sürtünme basıncı ve sürtünme süresi değiştirilerek kaynak kabiliyetleri incelenmiştir. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik piyasada temini zor ve pahalı bir malzeme olarak bilinmektedir. AISI 1040 çelik malzemesi piyasasında kolayca bulunmaktadır ve maliyetleri düşüktür. Böylece bu iki çelik birleştirilmesi ve gereken mukavemet sağlanması için malzeme maliyetlerinde tasarruf sağlanmaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler literatür ile karşılaştırılarak üretim parametrelerinin kalitesine olan etkilerinin ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 1040 çeliğinin kaynak sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerinin etkisi araştırılmıştır.

3.1. Kaynak Öncesi İşlemler

3.1.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

AISI 304 çeliklerinin kullanım yeri; gıda işleme makinesi, mutfak aracı ve gereci, makine ve imalat sanayi, asansörler, bina dış cephe kaplamaları, kimya endüstrisi şeklinde gözlemlenmektedir. AISI 1040 çeliği genellikle dişli yapımında, transmisyon millerinin ve rayların imalatında kullanımı gerçekleştirilmektedir (Özdemir, 2004). Deneysel çalışmada kullanılan soğuk çekme yöntemiyle üretilen malzemelerin kimyasal bileşimleri, sertifika malzeme değerleri ve mekanik özellikleri Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de sürekli tahrikli sürtünme kaynak cihazının teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri

Malzeme Adı	C (%)	Mn (%)	Cr (%)	S (%)	Ni (%)	P(%)	Mo(%)
AISI 1040	% 0,37-0,44	0,60-0,90	-	0,050	-	0,040	-
AISI 304	0,042	1,47	18,25	0,032	8,09	0,032	0,30

Tablo 3.2. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

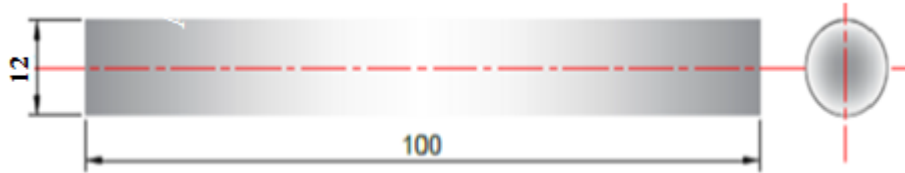
Malzeme Adı	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (HV30)
AISI 304	210	564	35	211
AISI 1040	361	518	25	180

Tablo 3.3. Kullanılan sürekli tahrikli sürtünme kaynak cihazının teknik özellikleri

Hidrolik Pompa	Değerler
Tezgâh Genişliği	(2460 mm x 120mm)
Piston Çapı	(80 mm)
Tezgâh Yüksekliği	(1400 mm)
Elektrik Motoru Devri	(0-3500 d/dak)
Elektrik Motoru Gücü	(11,5 kW)
Hidrolik Pompa Motor Devri	(1420 d/ dak)
Hidrolik Pompa Motor Gücü	(2,2 Kw)
Sıcaklık Detektörü	(0-1800 °C)
Hız Ayar Valfi	(28 V)
Basınç Ayar Valfi	(40 V)

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Malzemeler $\text{Ø}12 \times 6000$ mm'lik çubuk halinde, AISI 1040, AISI 304 çelik malzemeler Teknikmetal Malzeme Ticaret San. A.Ş'den temin edilmiştir. Kesilen numunelerin alın yüzeyleri torna tezgâhında işlenmiş ve yapım resmi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sürtünme kaynağında kullanılacak numune boyutu

3.3. Sürtünme Kaynağı Deneyleri ve Kaynak Parametreleri

Uygulanan sürtünme kaynak yöntemiyle AISI 304 ve AISI 1040'ın kaynak edilebilirliği ve yapılmış olan kaynak kalitesi araştırılmıştır. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâhı kullanılarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sürtünme kaynak makinası

Sürtünme kaynaklarında kullanılan kaynak parametreleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Deneyleerde kullanılan kaynak parametreleri

Deney Numaraları	Devir Sayısı(n) (dev/dak)	Sürtünme Basıncı(P_1) (da. N/cm ²)	Sürtünme Süresi (t_1)(s)	Yığma Basıncı (P_2) (da. N/cm ²)	Yığma Süresi (t_2)(s)
S1	2200	30	5	60	6
S2	2200	30	7	60	6
S3	2200	30	9	60	6
S4	2200	40	5	80	6
S5	2200	40	7	80	6
S6	2200	40	9	80	6
S7	2200	50	5	100	6
S8	2200	50	7	100	6
S9	2200	50	9	100	6

Deneyleerde, sürtünme basıncı 1. grup (P_1)= 30 daN/cm², yığma basıncı (P_2)= 60 daN/cm², 2. grup (P_1)= 40 daN/cm², yığma basıncı (P_2) 80 daN/cm² ve 3. grup için (P_1)= 50 daN/cm², yığma basıncı (P_2)= 100 daN/cm² şeklinde alınmıştır. Sürtünme süresi 5, 7 ve 9 ve yığma basınçlarının süresi sabit tutularak 6 saniye şeklinde ayarlanmıştır. Yapılmış olan çalışmada yığma basıncı, sürtünme basıncıyla aynı olması durumu kaynak kalitelerini nasıl etkilediği görülmeleri ve incelenmesi istenmiştir. Sürtünme kaynakları deneyi esnasında, cihazın motoruna bağlı olan dönel aynaya AISI 1040 numunesi, hidrolik mekanizmalara bağlı şekilde sabit ayna AISI 304 numunesi bağlanmıştır.

3.4. Kaynak Bölgesinin Sıcaklığının Ölçülmesi

Sürtünme kaynakları deneyinde sürtünmeyle meydana gelen ısı ölçümü, “Raynger 3i Plus” isimli kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazıyla olmuştur (Şekil 3.3). Bu cihaz rahatça taşınmakta, sıcaklık ölçümlerinde teması olmadan kullanımı gerçekleştirilmektedir.

Sıcaklık ölçüm cihazları yayılmış olan kızıl ötesi enerjileri toplar ve hedefteki yüzey sıcaklıklarını hesaplar. Bu sıcaklıkların dijital şekilde cihaz üstünden takibi olabilir.

Bu değerler cihazın kendisine ait programı ile bilgisayardan sayısal veriler şeklinde alınabilirler. Yine de bu program ile zaman içerisinde meydana gelen sıcaklık değeri grafiksel şekilde elde edilebilirler.

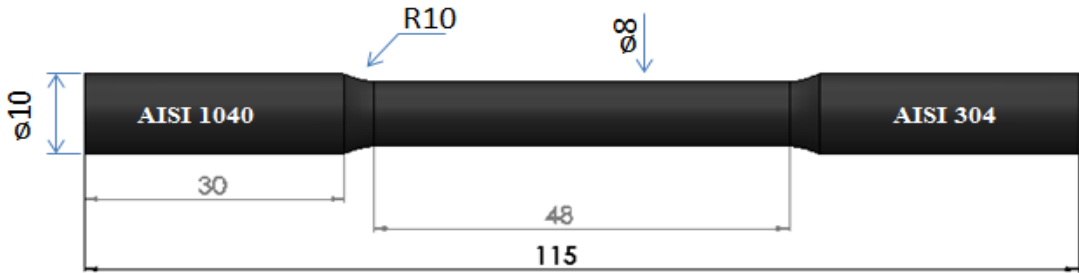
'Raynger 3i Plus', 200 °C-1800 °C arası sıcaklığın ölçümünü yapabilmektedirler. 200 °C' nin altında olan sıcaklık ölçülememektedir. Ölçüm doğruluğu için kaynak esnasında cihaz lazeri tam olarak kaynağın gerçekleşmiş olduğu yere dik bir halde yansıtılması gerekmektedir. Sıcaklık ölçme cihazlarında buna yardımcı olacak, üstüne monte edeceği tripot bir ayak kullanımı olmuştur. Böylece hazırlanmış olan düzenek kaynak numunesinden 50 cm uzaklıklarda sabittir.



şekil 3.3. Raynger 3i plus kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı

3.5. Çekme Deneyi Testleri

Yapılan kaynaklı bağlantılar TS 138 EN 895 standartına göre torna tezgahında hazırlanmıştır (şekil 3.4).



şekil 3.4. Çekme numunesinin ölçüleri

Çekme deneyleri, INSTRON marka 200 kN çekme cihazında 0.05 mm/dak çekme hızında yapılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çekme deneyi cihazı

S1 ve S9 numunesinin kaynaklı yüzey fotoğrafları ve çekme sonrası kopmuş numune resimleri Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.6. S1(a) Kaynaklı numune (b) Kopmuş çekme numunesi



(a)



(b)

Şekil 3.7. S9 (a) Kaynaklı numune (b) Kopmuş çekme numunesi

3.6. Metalografik İncelemeler

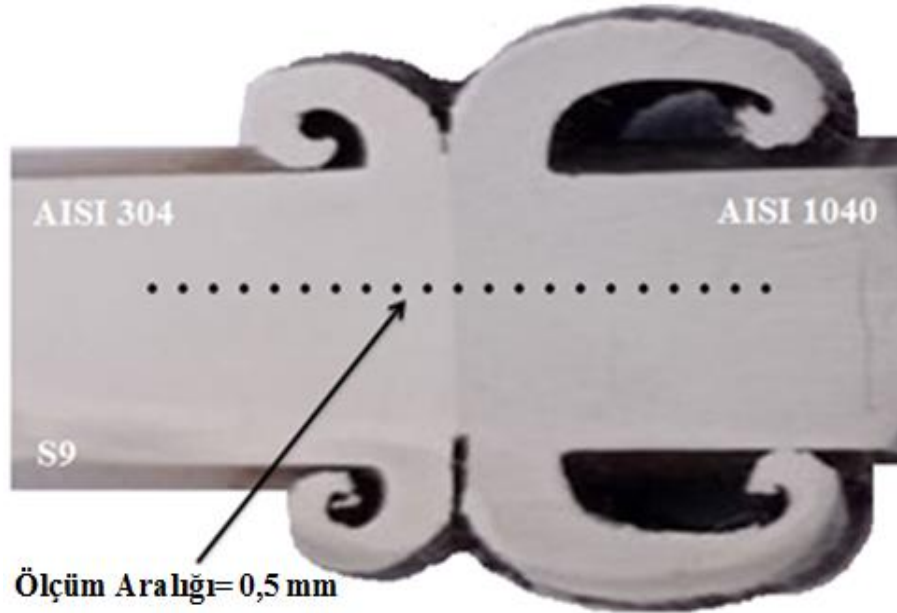
Sürtünme kaynağıyla birleştirilen kaynaklı bağlantıların yüzey karakteristiğini görmek için makro yüzey fotoğrafı Şekil 3.8’de verilmiştir. Kaynak sonrası numunelerin birleşme bölgesinde oluşan yapısal değişimleri tespit etmek için; numunelerin birleşme hatlarına dik şekilde kesilip, yüzeyleri 80-1200 Mesh’lik zımparayla temizlenmiş ardından 3 µm’luk elmas pasta ile parlatılarak, dağlama işlemleri için % 47,6 HCl + % 47,6 saf su + % 4,8 NHO₃ nitrik asit çözelti kullanılarak 12 volt değerinde elektrolitik olarak dağlanmıştır. AISI 1040 çeliğinin 10 saniye ve AISI 304 paslanmaz çeliği için 25 saniye bekletilerek dağlanmıştır. Daha sonra mikroyapı fotoğrafları optik mikroskop (OM), elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri JEOL JSM6510 marka taramalı elektron mikroskobu test cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Oluşan metallerarası bileşikleri tespit etmek için dağlanmış kesit alanından x-ray diffraction patterns (XRD) analizi Rigaku Ultima IV marka bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Kaynaklı makro yüzey fotoğrafı

3.7. Mikrosertlik Analizi

Kaynağın ardından, numunenin ITAB ve birleşme bölgelerinde oluşan sertlik değişimlerinin tespiti için mikrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümü, Vickers mikrosertliği THV-1D model marka mikrosertlik cihazında 0,3 kg yük ve 10 sn bekleme süresi uygulanarak ölçülmüştür. Şekil 3.9'da 0,5 mm aralıkla Vickers (HV) yöntemi ile alınmıştır. Elde edilen veriler grafik olarak düzenlenmiştir.



Şekil 3.9. Kaynak arakesiti üzerinde alınan mikro sertlik ölçüm noktaları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kaynaklı Bağlantıların Makro ve Mikroskobik Değerlendirilmesi

Kaynaklı bağlantıların arakesitin şematik resmi Şekil 4.1’de verilmiştir. Yapılmış olan sürtünme kaynakları deneyinin sonucunda numunenin temas yüzeylerinden dış tarafa doğru taşan flanşların farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Yığılma basıncı ve sürtünme basıncının artmasıyla meydana gelen flanşların arttığı görülmüştür. Bu artışta, sürtünme basınçlarının yığılma basıncından daha etkili bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu deneyde farklı bileşimlere sahip olan iki çeliğin kullanılmalarından ötürü kaynak yerlerinin her iki tarafta farklı boyutlarda flanş meydana gelmiştir (Tablo 4.1 ve Tablo 4.2). AISI 304 tarafından meydana gelen flanşların AISI 1040 tarafından oluşan flanşların daha düşük orandadır. AISI 1040 çeliklerinin ITAB bölgesi daha çok olduğu görülmüştür. Bu kaynaklarda birleşme bölgesinden alınan makroskobik inceleme fotoğraflarına bakıldığında; artan devir sayıları, sürtünme basıncı, yığılma basıncı ve sürtünme süresine bağlı şekilde arayüzeylerden dışarı doğru taşmış olan malzeme oranında artışlar bulunmaktadır. Kaynak ardından numuneler üstünden alınmış olan boyca kısalma oranı, artan sürtünme süresine ve devir sayısına bağlı şekilde dışarı taşmış olan malzeme miktarlarında artış olmuştur.

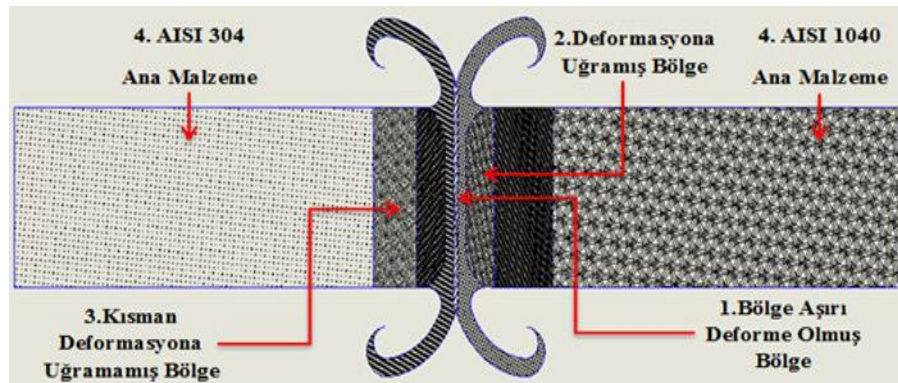
Tablo 4.1. Kaynak yapılmış numune flanş boyutları

Uzunluk	Malzeme	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Flanş Genişliği (mm)	AISI 1040	5,01	6,55	7,24	7,54	8,21	8,54	8,48	8,90	9,38
	AISI 304	2,98	3,45	3,90	4,07	4,67	4,82	3,96	4,16	4,24
Flanş Uzunluğu (mm)	AISI 1040	18,87	20,06	20,50	19,60	20,35	21,65	20,55	20,75	21,50
	AISI 304	16,36	17,30	18,27	17,90	18,50	18,90	17,85	18,45	18,95

Tablo 4.2. Numunelere ait kaynakların boyca kısıalma miktarları

Numune No	(Boyca Kısıalma) (mm)
S1	13,10
S2	16,10
S3	17,10
S4	13,50
S5	16,40
S6	17,40
S7	14,70
S8	16,90
S9	17,80

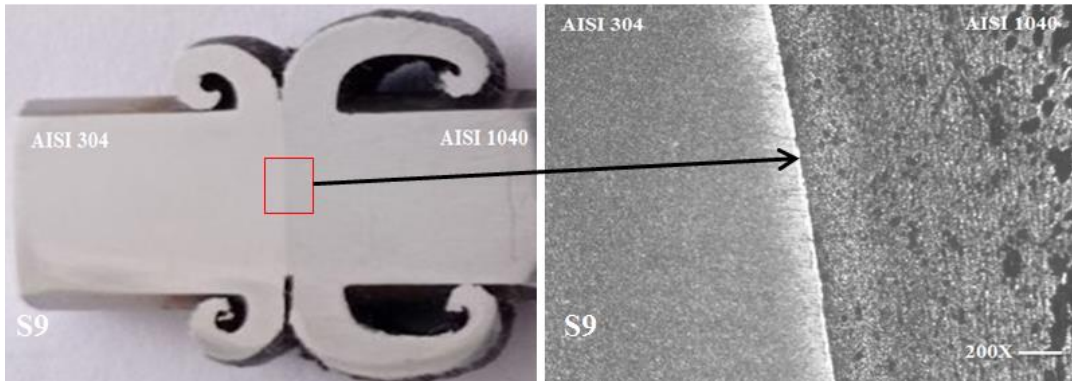
Bu kaynaklı bağlantılara ait yüzey fotoğraflara bakıldığında, birinci gruptaki dışarı taşma ve flanş geometrisinin diğer guruplara göre daha az meydana geldiği ve ikinci ve üçüncü grupta arayüzeylerden dışarı taşmış olan malzeme miktarlarında artma olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 4.1). Bunun yanı sıra, numuneye ait arayüzey makroyapı fotoğrafına bakıldığında, artmış olan devir sayılarına bağlı şekilde literatür verilerine göre arzu edilmiş olan çanak şeklinde dışarı taşmaların olduğu gözlemlenmektedir. Devir sayılarının lineer yükselişi, bağlantılarının geometrisi ve merkezden dışarı taşan malzeme miktarları üstünde önemli bir tesiri bulunmaktadır. Boyca kısıalma miktarları he numune için Tablo 4.2’de gösterilmiştir.



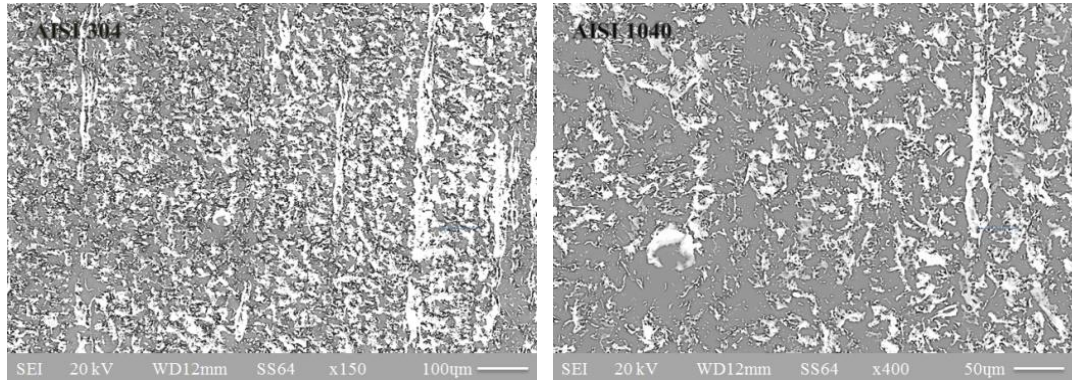
Şekil 4.1. Sürtünme kaynaklı numunelerde birleşme arakesitinin şematik resmi

Sürtünme kaynak metodunda, kaynağın ardından birleşme arayüzünde oluşan yapısal değişimler üç farklı bölge gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde esas malzeme (EM), deformasyon bölgesi (DB), kısmi dönüşüme uğramış bölge (KDUB), şeklinde adlandırılmaktadır. Bunun yanı sıra deformasyon bölgesi (DB) içerisinde olan, ancak yapısal şekilde farklılıkları göstermiş olan aşırı deformasyon olmuş bölgenin (ADB) varlığı yapılmış olan detaylı SEM çalışmasıyla tespit edilmiştir. Aşırı deformasyon olan bölgenin deformasyon bölgelerinin dışında, ek bölge şeklinde kabul edilmesiyle yapı dört farklı bölüm şeklinde tespit edilmiş ve gözlemlenmiştir. Tanımlanmış olan bu dört bölgenin boyutunun, işlem parametresine bağlı şekilde değişim gösterdikleri literatürde belirtilmektedir (Özdemir, 2005).

Sürtünme kaynağı numune makro ve optik mikroskop (OM) resmi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. S9 nolu numune makro ve optik incelenmesi



Şekil 4.3. Standart AISI 304 ve AISI 1040’ ın mikroyapı SEM fotoğrafları

Deneyde kullanılan AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik kaynak işleminin öncesinde yüzeyden alınmış olan SEM fotoğrafı Şekil 4.3’de verilmiştir. Ostenitik paslanmaz çeliğin kaynak alanında σ (sigma)-fazının bulunmaları, kaynak edilebilirliği negatif tarafta tesiri altında bırakmaktadır. Metallerarası bileşik olan bu sert fazın oluşması için ostenitik yapı içerisinde biraz da ferrit olması gerekli olmaktadır. Ostenitik mikroyapısında kimyasal bileşimlerin çok büyük tesiri bulunmaktadır. Bu paslanmaz çelikte azot etkisi, alaşımın oyuk oluşumu korozyon direnci ve dayanımlarını önemli oranda düzeltmektedirler. Ostenitik paslanmaz çelik, öteki paslanmaz çeliklere göre daha çok Mn içeriği barındırmaktadır. Ostenitik paslanmaz çeliğin kaynağı olarak ikinci bir problem de, özellikle 18/8 çelik gibi bir takım paslanmaz çeliğin 450-850 °C sıcaklık aralığında olan bir sıcaklıkta uzun zaman kalmasının sonucunda oluşan krom karbür çökmesi eğilimi olmaktadır. Oluşan krom karbürün ağırlık olarak % 90’ını Cr meydana getirdiğinden, tane sınırında olan çok az karbon bile ostenit tanesinin çevresinde olan krom düzeyini aşırı düzeyde azaltır. Sonuçta, malzeme korozif bir alanda kaldığı zaman kromca zayıflamış tane de korozyon meydana gelir (Kaluç 1990; Anık vd., 1993). Bir katı hal kaynağı tekniği olan sürtünme kaynakları, düşük sıcaklık ve çok kısa sürede gerçekleştiklerinde yukarıda anlatılmış olan negatifliği büyük oranda düşürmek mümkün olmaktadır. Yapı, yaklaşık aynı oranda perlit ve ferrit barındıran eş yönlenmiş tanelerden meydana gelmektedir. AISI1040 çelik kaynak yöntemiyle birleşmesinde, bu çeliğin kaynak kabiliyeti büyük önem taşımaktadır. Çeliğin sahip olduğu kimyasal özellikleri sebebiyle, kaynak sonrası birleşmenin olduğu bölgelerinde istenmeyen yapıların meydana gelmesi kaçınılmazdır. AISI 1040 çelik kaynak yeteneği ve sertleşme eğilimleri, malzeme içerdiği elementler esas alınıp karbon eşdeğerleri formülüyle tespit edilmiştir.

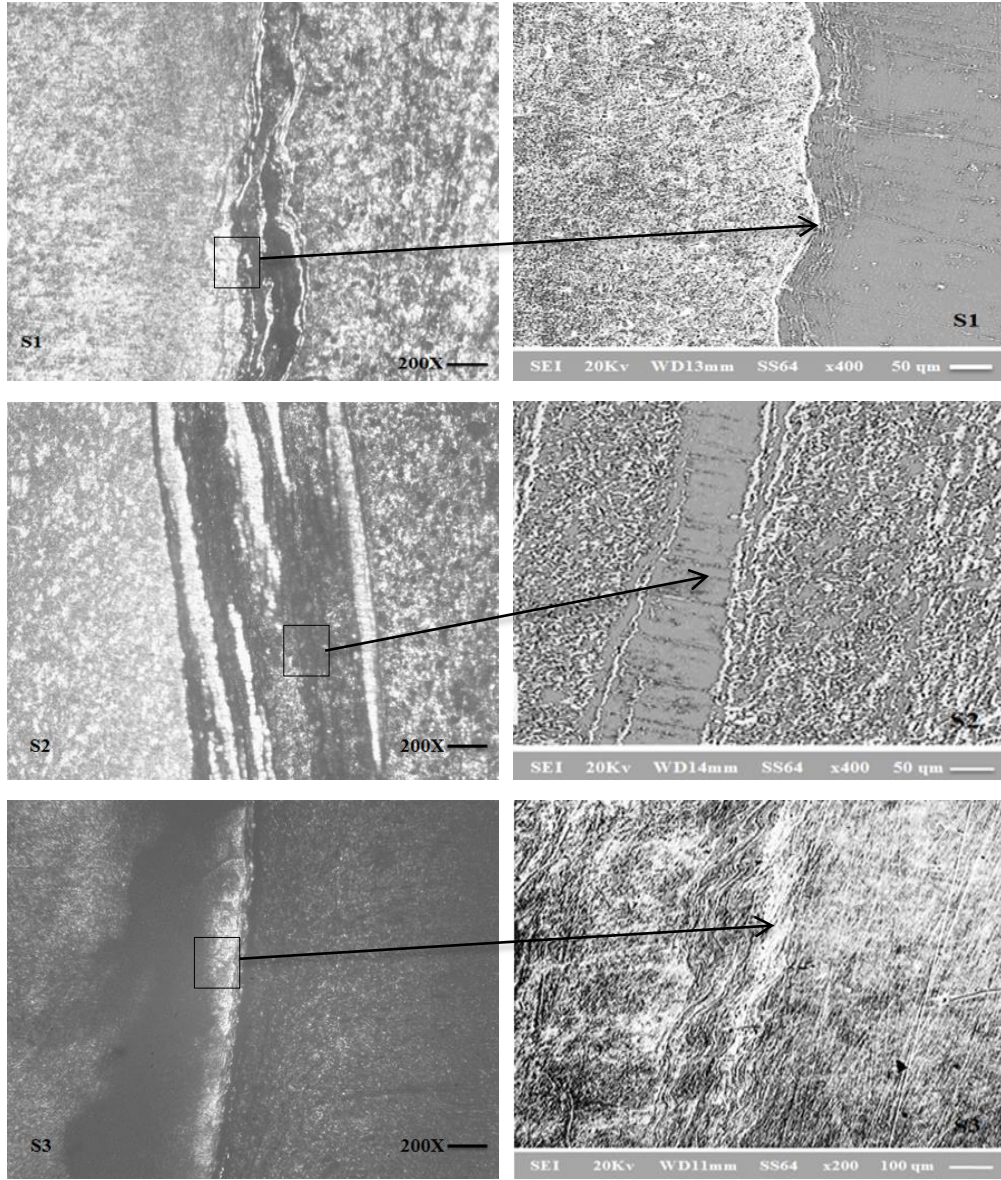
Buna göre; $Ce\check{s} = \% C + \% Mn 6 + \% Si 24 + \% Ni 40 + \% Cr 5 + \% Mo 4$

$$Ce\check{s} = 0,391 + 0,655 6 + 0,158 24$$

$$Ce\check{s} = 0,506 \text{ olarak bulundu.}$$

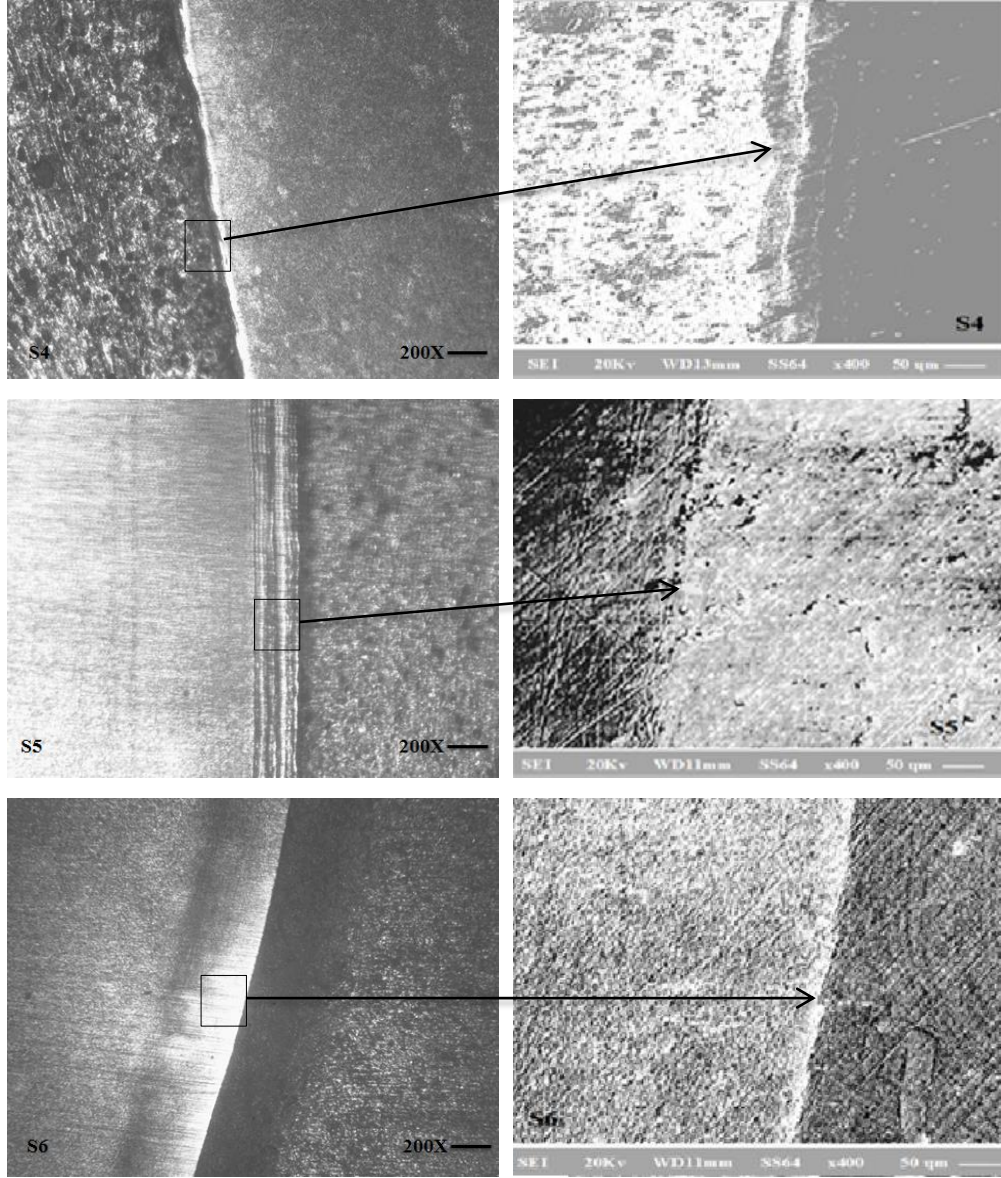
Değer ($Ce\check{s} > 45$)

AISI 1040 çelik kaynak sırasında çatlama ve sertleşme eğiliminde olduğunu veya martenzit oluşmadaki olasılıklarının yüksek olduklarını belirtmektedir. Sürtünme kaynağı işlemlerinde, bir ergimenin bulunmaması ve kısa sürede gerçekleşmesi sebebiyle çatlama ve sertleşme gözlenmemektedir. Sürtünme basıncı 30 MPa olarak birleştirilen S1-S3 nolu kaynağı olan bağlantıların birleşme alanında meydana gelen yapısal değişimi ifade eden SEM fotoğrafları Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Kaynaklı bağlantıların hepsinde birleşme alanında boşluk, çatlak ve bağlantı olmayan alanların bulunmadığı gözlemlenmektedir. Farklı sürtünme süresi kullanılıp yapılmış olan kaynaklı bağlantının birleşme alanında oluşan yapısal değişimler ve sürtünme süresinin yapısal değişimi üstündeki tesiri açıkça gözlemlenmektedir. S1 ve S2 nolu numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, birleşme arayüzeyinin her iki tarafta sıcaklık ve basınç etkisiyle aşırı deforme olmuş bölgenin genişlikleri ve şekillerinin sürtünme sürecine bağlı şekilde değiştikleri gözlemlenmektedir. Fotoğraftan görüleceği şekilde arayüzey sürtünmesiyle her iki malzeme karışımlarından oluşan ve birleşme hatlarına dik düzeyde yönlenmiş olan bu bölgede olan düzensizlik kaynağın mekanik davranışı üstünde önemli tesiri bulunduğu ifade edilmiştir (Özdemir, 2005).



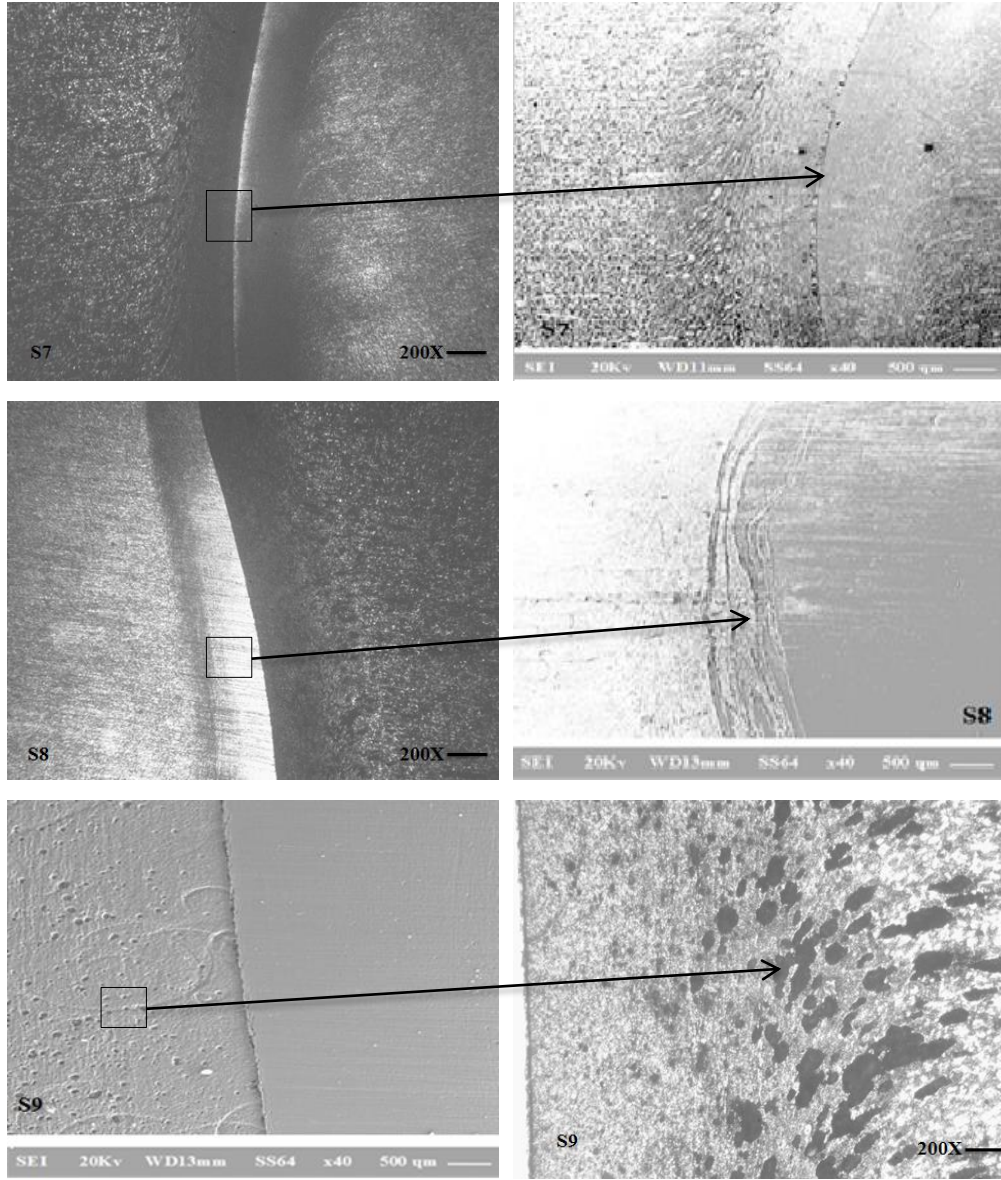
Şekil 4.4. 1.Grup numune optik mikroskop (OM) ve SEM resimleri

Şekil 4.4’de görüldüğü üzere kaynak bileşim bölgelerinde oluşan bileşiklerin olduğu bölgelerindeki tane yapısı değişimler açıkça görülmektedir. Sürtünme süresi ve sürtünme basıncının kaynak bölgesindeki bileşik oluşumu XRD’de açıkça görülmektedir.



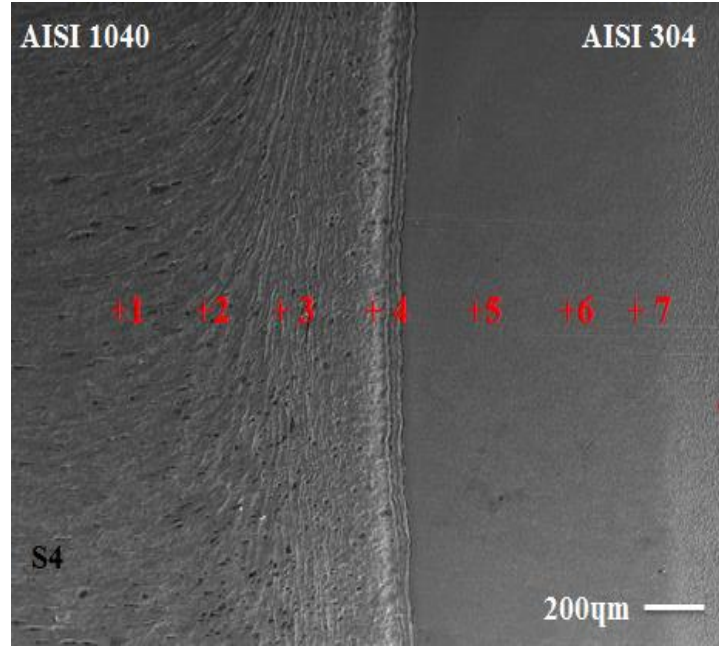
Şekil 4.5. 2. Grup numune optik mikroskop (OM) ve SEM resimleri

SEM fotoğraflarında kaynak bölgesinde AISI 304 paslanmaz çeliğindeki krom (Cr) krom miktarına bağlı olarak karbür (Cr_3C_2) bileşiğinin oluştuğu gözlemlenmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.6. 3. Grup numune optik mikroskop (OM) ve SEM resimleri

SEM fotoğraflarından aşırı deforme olan bölgelerin hemen yanında AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik tarafından tane küçülmesi ve tanenin arakesite dik şekilde yönlendiği gözlemlenmektedir. Sürtünme basıncı 50 MPa olan S7 ve S8 numunelerde sürtünme basıncının etkisiyle arayüzeyden dışarı doğru deformasyon sonucu oluşan tanelerdeki mekanik yönlenme Şekil 4.6'de görülmektedir. Devir sayısının artmasıyla (2200 dev/dak) taşan malzemenin attığı ve 1040 tarafında sıcaklık artışıyla birlikte ısıdan etkilenen bölgenin daraldığı görülmektedir. S9 nolu numunede bu bölgede yığmanın etkisiyle oluşan yumuşama sonucu viskoz davranışın etkisi belirlenmiştir. AISI 1040 tarafında yığma basıncının etkisiyle S7 ve S8 aşırı deformasyondan dolayı kayma



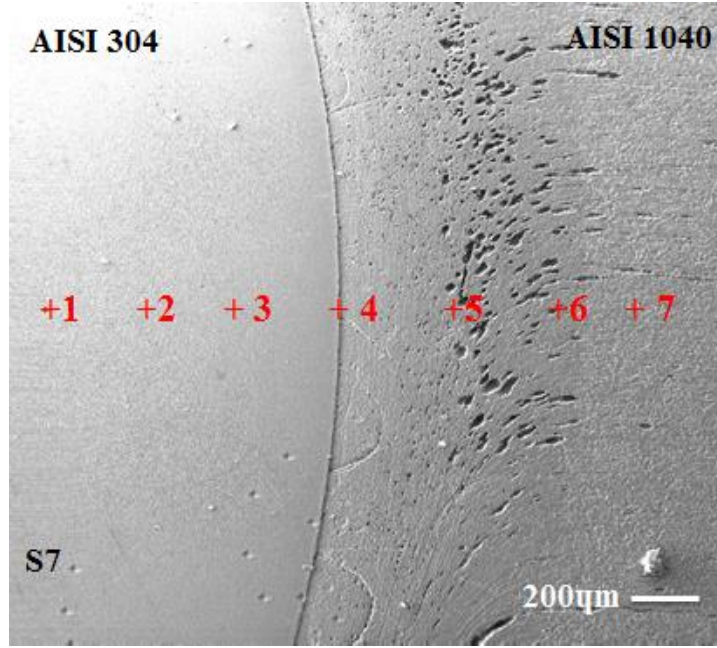
Şekil 4.8. S4 Numune mikroskobik EDS görüntüsü

Tablo 4.4. S4 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri

Elt.	Units	1.Ana Malzeme	2. Deforme Bölge	3. ITAB Bölgesi	4.Kaynak Bölgesi	5. ITAB Bölge	6. Deforme Bölgesi	7. Ana Malzeme
Si	wt.%	0,556	0,380	2,247	4,392	4,143	2,333	3,496
Ti	wt.%	0,070	0,127	0,171	0,584	0,836	0,278	0,117
Cr	wt.%	0,429	1,114	11,784	22,790	24,259	24,571	22,645
Mn	wt.%	0,728	1,002	1,062	2,472	0,000	0,590	1,640
Fe	wt.%	98,013	96,728	80,982	65,424	65,663	66,453	65,544
Ni	wt.%	0,205	0,650	3,755	4,338	5,099	5,775	6,558
	wt.%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tablo 4.4.'de görüldüğü üzere 4. kaynak bölgesindeki Cr oranı %22.790 olarak görülmektedir. Buda oluşan bileşiğin AISI 304 paslanmaz çeliği ana malzemesine yakın bölgede oluştuğunu göstermektedir.

AISI 304 paslanmaz çeliği kaynak bölgesi bileşim arayüzeyinde ve ana metal kısmındaki tane yapısında değişim olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.8).

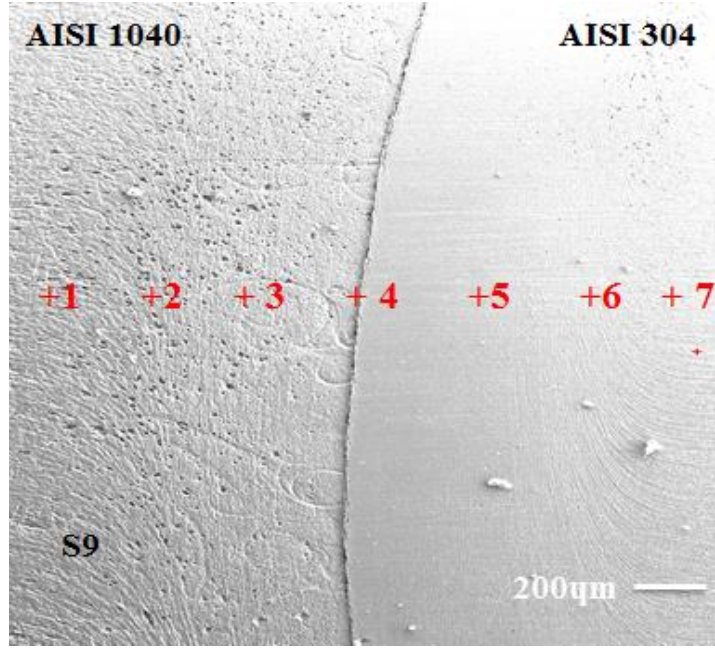


Şekil 4.9. S7 Numune mikroskobik EDS görüntüsü

Tablo 4.5. S7 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri

Elt.	Units	1. Ana Malzeme	2. Deforme Bölge	3. ITAB Bölgesi	4. Kaynak Bölgesi	5. ITAB Bölge	6. Deforme Bölgesi	7. Ana Malzeme
Si	wt.%	0,608	0,414	0,413	0,412	1,413	1,922	0,255
Cr	wt.%	15,859	17,060	16,993	15,793	14,993	6,003	0,192
Mn	wt.%	2,066	1,687	1,466	1,440	1,466	0,687	0,548
Fe	wt.%	72,619	72,135	72,439	72,437	75,137	89,749	98,900
Ni	wt.%	8,849	8,703	8,689	8,589	6,989	1,486	0,105
	wt.%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tablo 4.5’de elementlerdeki yüz oranlarını değişimi demir (Fe) oranı AISI 304 çeliğinden AISI 1040 çeliğine doğru gidildikçe artmaktadır. Fakat ölçüm noktası 4. kaynak bölgesinde ve 5. ITAB bölgesinde çok fazla artmadığı gözlemlenmektedir. Kaynak bileşim bölgelerinde istenilen bileşik AISI304 paslanmaz çeliği arayüzeyinde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu durum kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 4.7).

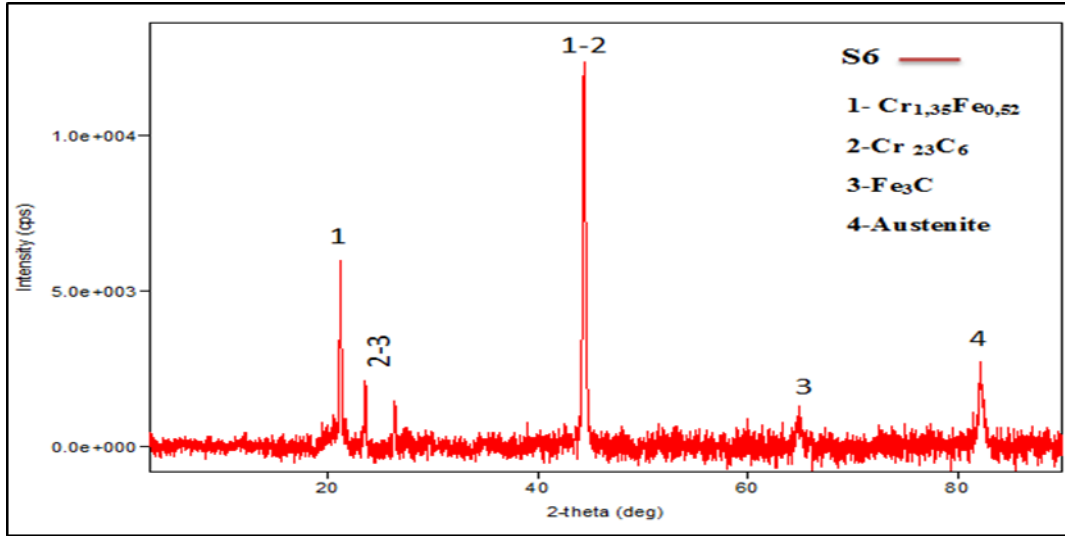


Şekil 4.10. S9 Numune mikroskobik EDS görüntüsü

Tablo 4.6. S9 numunesine ait 7 bölgeden alınmış EDS değerleri

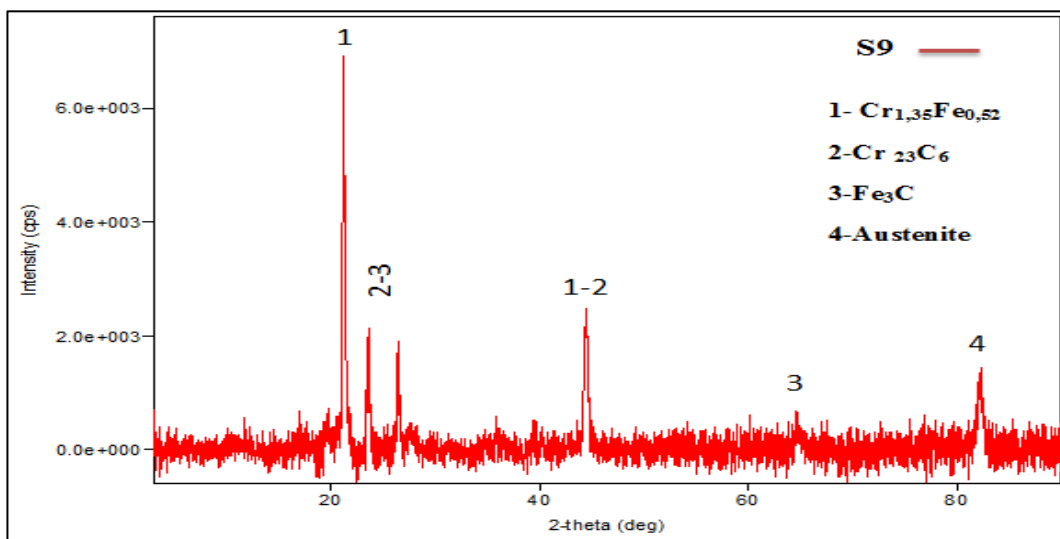
Elt.	Units	1. Ana Malzeme	2. Deforme Bölge	3. ITAB Bölgesi	4. Kaynak Bölgesi	5. ITAB Bölge	6. Deforme Bölgesi	7. Ana Malzeme
Si	wt.%	2,200	2,415	2,768	1,940	2,131	2,762	2,169
Ti	wt.%	0,377	0,041	0,255	0,405	0,701	0,253	0,334
Cr	wt.%	20,092	21,430	21,204	18,546	21,116	20,148	20,091
Mn	wt.%	1,257	0,185	1,169	3,344	0,601	1,418	2,744
Fe	wt.%	68,584	69,673	67,482	71,284	66,981	67,875	68,988
Ni	wt.%	7,490	6,256	7,122	4,480	8,471	7,545	5,675
	wt.%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tablo 4.6’da elementlerdeki oranlarının değişimi ana malzemedan kaynak bileşim noktasına doğru değişim göstermektedir. Bunun nedeni Cr ve Ni miktarının AISI 304 ana malzemsinden AISI 1040 çeliğine doğru gidildikçe azalmasıdır. Kaynak arayüzeyinde bileşik oluşumunun olduğunu görülmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.11. S6 nolu numunenin XRD grafiği

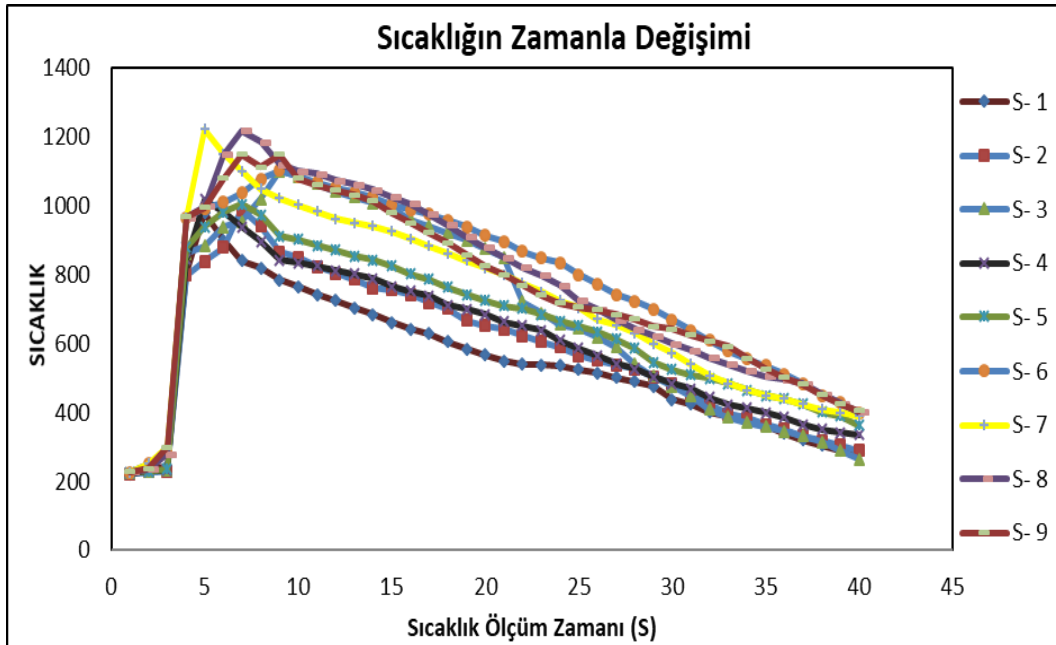
EDS analizlerine bakıldığında artan devir sayısı ve sürtünme basıncıyla birlikte S9, bu bölgede Cr oranının azalmasına bağlı olarak karbürlerin oluştuğu tespit edilmiştir. 2200 devir, 50 MPa sürtünme basıncı olan numunelerde karbon oranının artışıyla birlikte krom karbürlerin oluştuğu ve sertlik artışına da yansıdığı açıkça görülmektedir. S9 nolu numunenin birleşim ara bölgelerinde meydana gelen fazı ve bileşiği saptamak için yapılmış olan x ışını analiz grafikleri gösterilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.12. S9 nolu numunenin XRD grafiği

$Cr_{1.35}Fe_{0.52}$, $Cr_{23}C_6$, Fe_3C ve Austenite bileşiklerinin XRD analizleri sonucunda elde edilen bileşiklerdir. S6 da $Cr_{1.35}Fe_{0.52}$ bileşiğın pik değeri S9 numunesine göre daha düşük olduğu grafikte görölmektedir. Tane sınırında oluşın karbon, kroma karşı olan yüksek ilgisindedenden ötürü bu kromla birleşip krom karbür (Cr_3C_2) meydana getirir Grafikte göröldüğü üzere sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin bileşik oluşumu üzerinde etkisinin olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.12).

Numene arayüzeylerinden alınan maksimum sıcaklık grafiği Şekil 4.13'de verilmiştir.

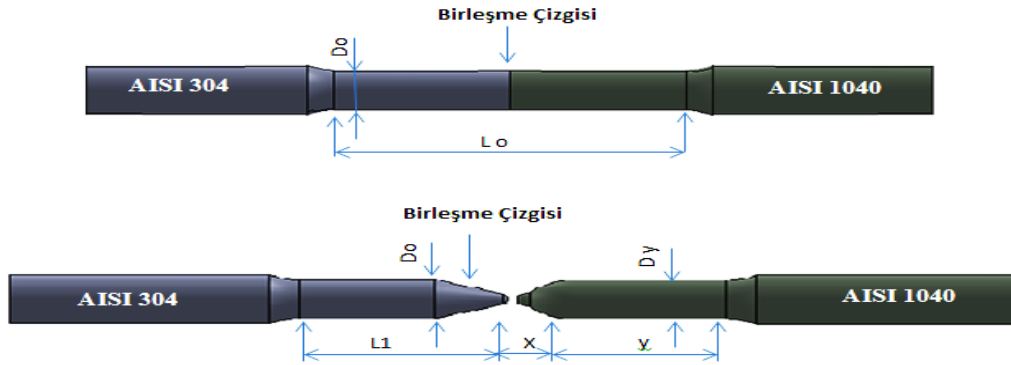


Şekil 4.13. Deneylerdeki sıcaklığın zamanla değişimi

Şekil 4.13'de kaynak bölgesindeki sıcaklığın zamanla değişimi göstermektedir. Kaynak bölgesindeki sıcaklığın ölçüm zamanına göre farklı değerde olduğu ve sürtünme başladığı andan itibaren artış gösterdiği ve yığılma basıncı uygulanmaya başlandığı andan itibaren sıcaklık değeri azalma olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık değeri S7 ve S9 numunesinde gözlemlenmiştir. Çünkü bu kaynaklarda daha yüksek basıncı uygulanmıştır.

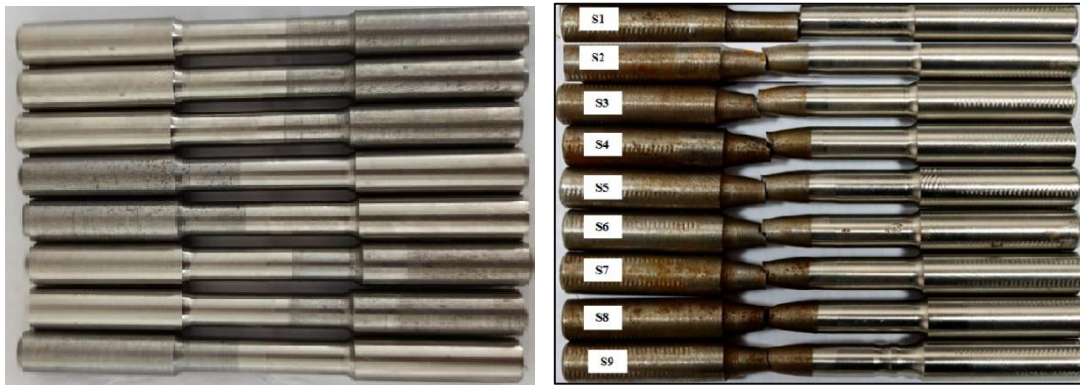
4.2. Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Test Sonuçları

4.2.1. Çekme Deneyi Sonuçları



Şekil 4.14. Çekme numunesinin şematik resmi

Hazırlanmış kaynak numuneleri TSE 138 uygunluk kontrolleri yapıp çekme testi sonrası makro yüzey fotoğrafları Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Uygulanmış olan çekme testi sonucunda gözlemlenen verilere bakıldığında, bazı numuneler belirli bir akma noktası olmaksızın kırıldığı, bu kırılmaların genel olarak ITAB’da gerçekleştikleri ve bir takım numunelerin kaynak bölgelerinin dışında belirli bir uzama ile kırılma davranışı sergiledikten sonra akma gözlemlenmiştir. Çekme testi, kesit değişimleri, boy olarak uzama ve kopmaların oluşturduğu yer Şekil 4.14’de verilmiş olan şematik olarak esas alınıp değerlendirme yapılmıştır.



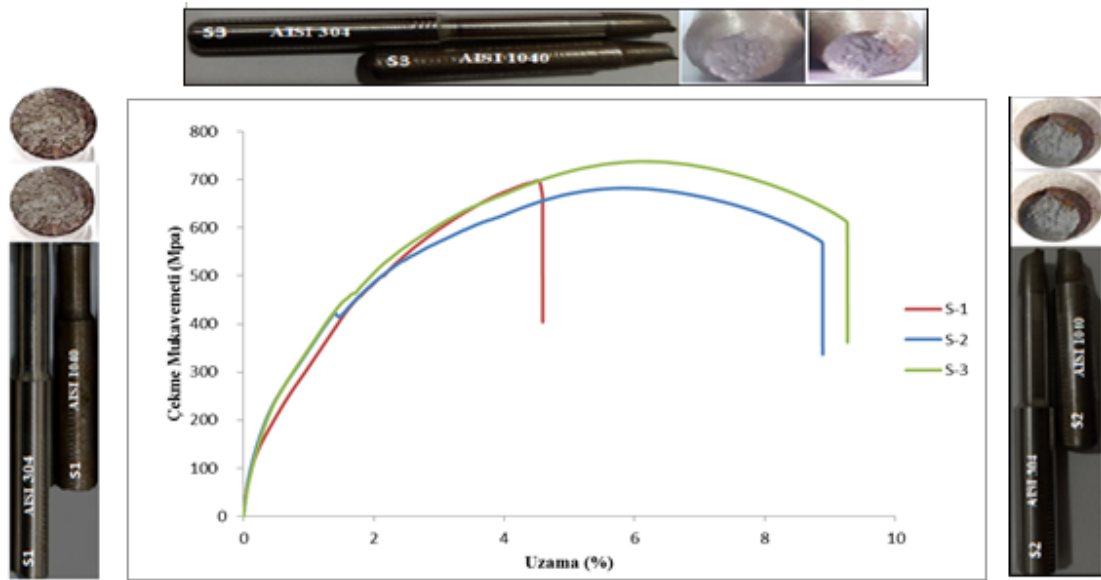
(a)

(b)

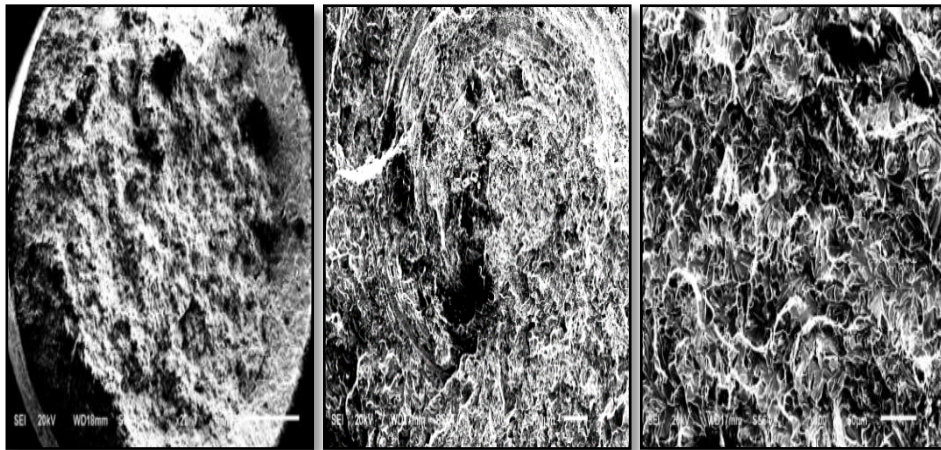
Şekil 4.15. Çekme numunelerinin yüzey fotoğrafları (a) Çekme numuneleri (b) Çekme deneyi sonrası numuneleri

Tablo 4.7. 1.Grup çekme deney sonuçları

KULLANILAN PARAMETRELER						MEKANİK ÖZELLİKLER		
Numune No	Devir (dev/dk)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Sürtünme Basıncı	Yığılma Basıncı	Yığılma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Boyca Kısılma
S1	2200	5	30	60	6	682,875977	3,67316	13,10
S2		7			6	698,375635	7,10852	16,10
S3		9			6	738,295117	7,41224	17,10



Şekil 4.16. 1.Grup kaynaklı numunelere ait gerilme-uzama eğrileri

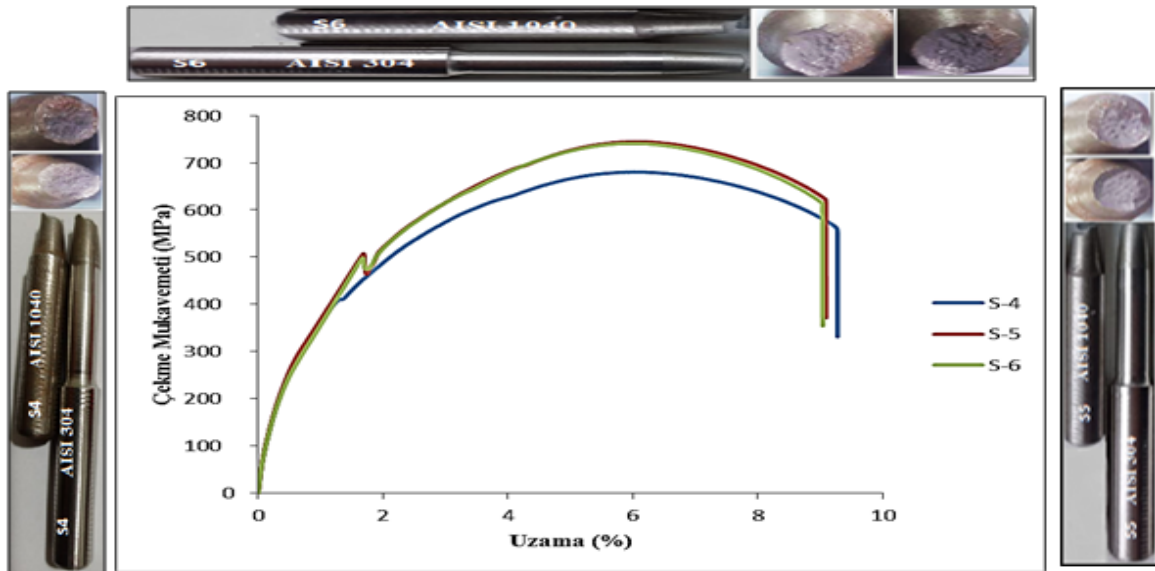


Şekil 4.17. S1 nolu numunesinin çekme kırık yüzey SEM fotoğrafı

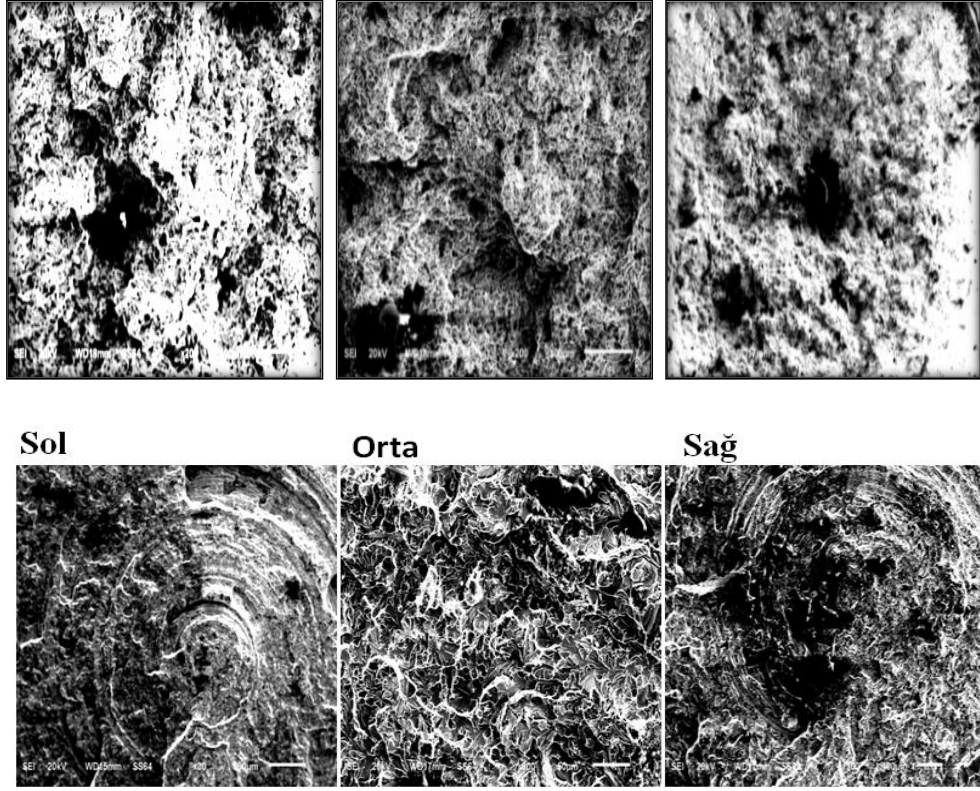
Kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde S1 numunesi kaynak bölgesinden plastik deformasyon meydana gelmeden gevrek kırılmıştır. Kırılma yüzeyleri düz, keskin ve parlak olarak ve lifli yapı oluşmadığı görülmüştür. (Şekil 4.17). Bu durumun sürtünme basıncının ve süresinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Maksimum olan çekme değerlerindeki farklılıklar, ITAB'ın genişliğiyle doğrudan ilişkili olmaktadır.

Tablo 4.8. 2. Grup çekme deney sonuçları

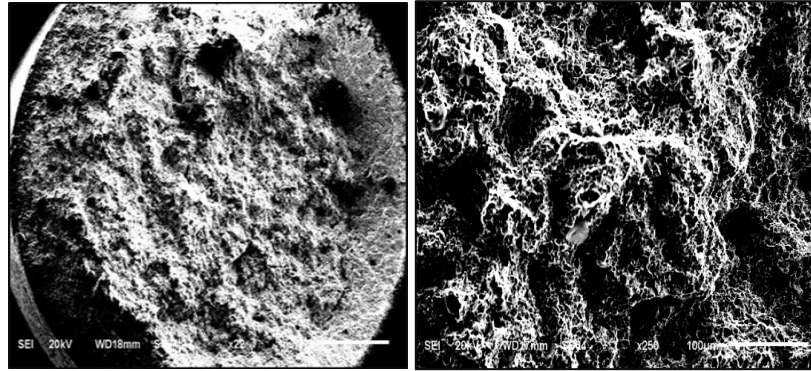
KULLANILAN PARAMETRELER						MEKANİK ÖZELLİKLER		
Numune No	Devir (dev/dk)	Sürtünme Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığılma Basıncı (MPa)	Yığılma Süresi (sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Boyca Kısalma (mm)
S4	2200	5	40	80	6	680,421191	7,42069	13,50
S5		7			6	744,991064	7,27465	16,40
S6		9			6	741,122754	7,23168	17,40



Şekil 4.18. 2.Grup kaynaklı numunelere ait gerilme-uzama eğrileri



Şekil 4.19. S4 nolu numunesinin çekme kırık yüzey SEM incelenmesi



Şekil 4.20. S6 nolu numunenin numunenin çekme kırık yüzey mikroskobik SEM resmi

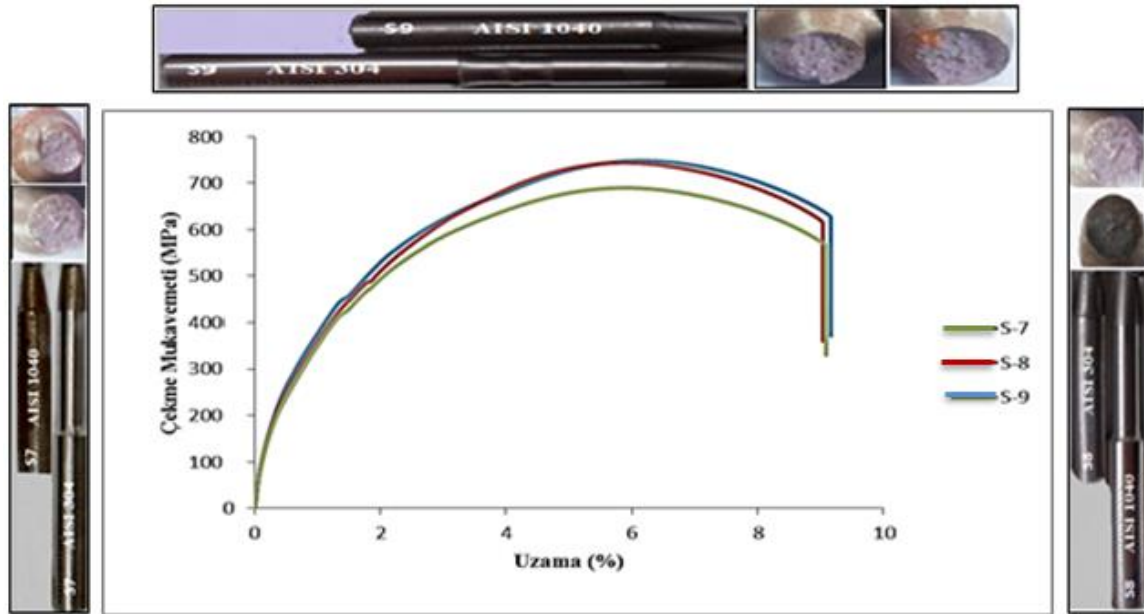
S4-S6 numuneleri kırık yüzeyler incelendiğinde kırılmanın 1040 tarafında boyun vererek sünek olarak kırıldığı Şekil 4.19'da görülmektedir. Şekil 4.18'de çekme grafiği incelendiğinde artan sürtünme basıncı ve yığma basıncı ile birlikte sürtünme süresi 5 s olan numunenin daha sünek davranış sergilediği görülmektedir. Ancak sürtünme süresinin artışıyla çekme mukavemetinde S6 ve S9 numunesinde yüksek olduğu grafikte gözlemlenmektedir (Şekil 4.20).

Daha önce olan grupla kıyaslandığı zaman kırılma rejiminde değişiklik olmuştur. Bu değişimlerin asıl nedeninin, çoğalan devir sayısı ile beraber arayüzey sıcaklıklarının deformasyon tesiri üstünde önemli rol oynamıştır.

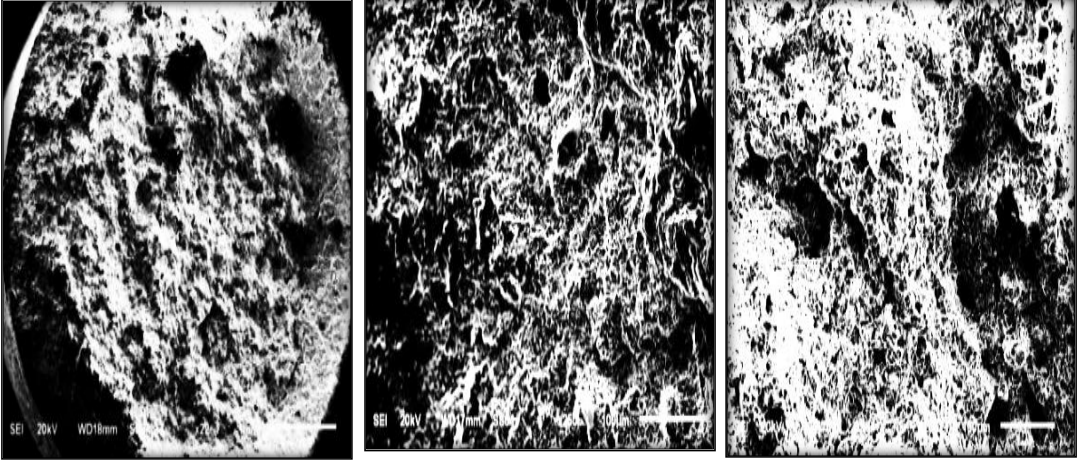
(Şahin vd., 2003). Yaptıkları çalışmada orta karbonlu ve östenitik paslanmaz çelik bileşenlerin sürtünme kaynağı üzerine yaptıkları çalışmada sürtünme süresi ve basıncı arttıkça çekme mukavemetinin arttığı ve kritik noktayı aşınca düşmeye başladığını tespit etmişlerdir.

Tablo 4.9. 3.Grup çekme deney sonuçları

KULLANILAN PARAMETRELER						MEKANİK ÖZELLİKLER		
Numune No	Devir (dev/dk)	Sürtünme Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığılma Basıncı (MPa)	Yığılma Süresi (sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Boyca Kısalma (mm)
S7	2200	5	50	100	6	689,972803	7,23168	14,70
S8		7			6	744,028662	7,27465	16,90
S9		9			6	748,367529	7,42069	17,80



Şekil 4.21. 3.Grup kaynaklı numunelere ait gerilme-uzama eğrileri



Şekil 4.22. S9 nolu numunesinin çekme kırık yüzey SEM fotoğrafı

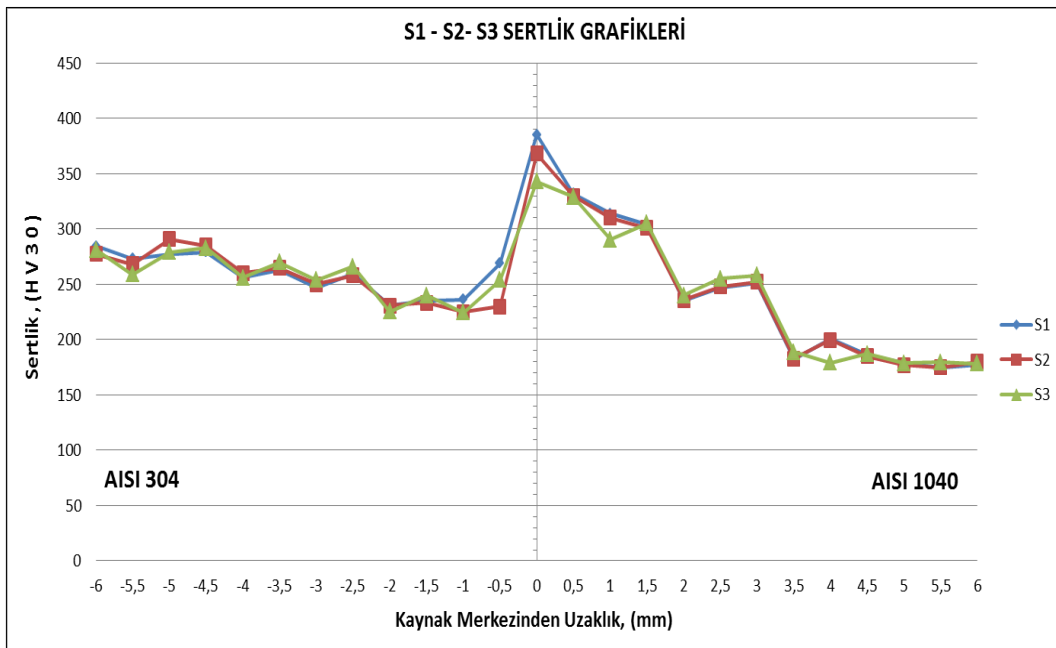
Şekil 4.21’de S7-S9 nolu numunelerde ise devir sayısının bir önceki gruplar ile aynı olduğu, fakat sürünme basıncının artışıyla birlikte sürtünme süresi 9 s olan S9 numunesinin çekme gerilmesi 5 ve 7 s sürtünme sürtünme sürelerine göre kıyaslandığında yüksek çıktığı görülmüştür.

Şekil 4.22’de kırık yüzey mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde sürtünmenin süreci ve eksenel basıncının bu bağlantının kırılma davranışları ve kırık yüzeyin morfolojisi üstünde etkili oldukları görülmüştür. Sürtünme basıncının artmasıyla aşırı deformasyon bölgesinde daralma ve buna bağlı olarak bölgede tanelerin küçüldüğü belirlenmiştir. Sürtünme basınç tesiriyle viskoz halde olan malzemelerin dışarı atılmış ve tanelerde olan küçülmeyse sürtünmeyle meydana gelen sıcaklık plastik deforme tesirini arttırdığı düşünülmektedir. Sürtünme süresinin artmasıyla (9s) ile birlikte yumuşamayla birlikte mukavemetin düştüğü gözlenmiştir (Çay vd., 2005).

Çekme testi sonuçlarına göre, maksimum çekme gerilmesi S9 nolu numunede 748,675 MPa, en az gerilme ise S4 nolu numune 680,4211 MPa yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. En yüksek akma gerilmesi değerleri ise S7 ve S9 nolu numunelerde görülmüş olup S1 numunesinin dışındaki numunelerde uzamanın birbirlerine yakın dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir.

4.3. Sertlik Deneyleri Sonuçları

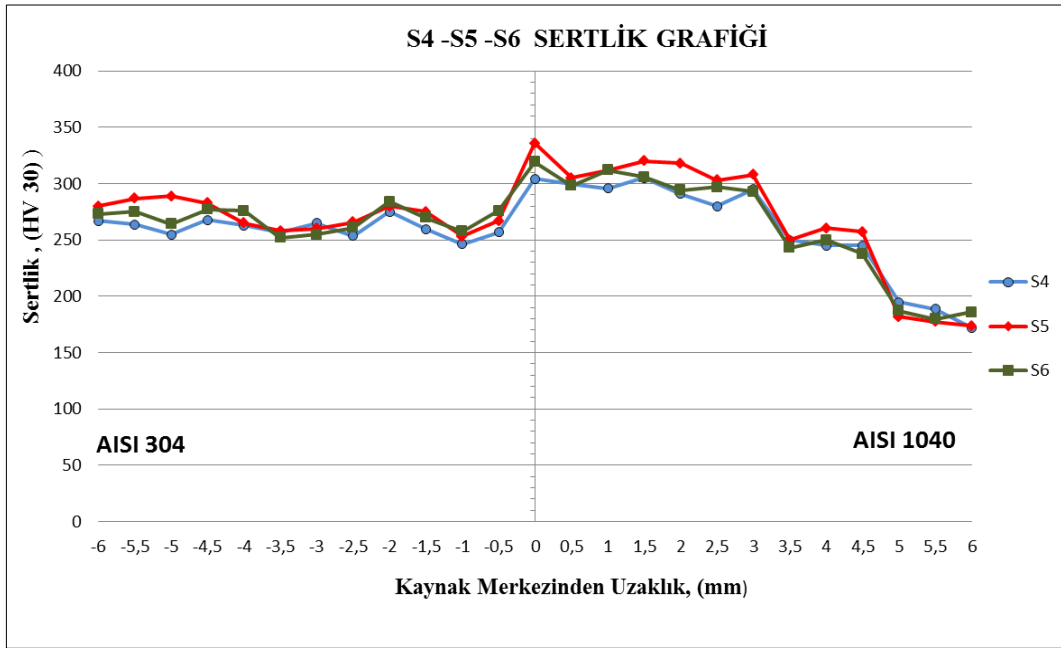
Mikrosertlik ölçümleri, farklı parametrelere bağlı olarak ortaya çıkan yapısal değişimi ve bu değişimin, malzemenin sertliği üzerine olan etkisini belirlemek amacıyla kaynaklı bağlantıların birleşme hattından çizgisel doğrultuda alınmıştır. Devir sayısı sabit tutulup, farklı sürtünme basıncı ve süresi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların, birleşme merkezinden ana metale doğru çizgisel bir hat boyunca 0,5 mm aralıklar ile 300 gr yük altında 10 saniye bekletilerek oda sıcaklığında ölçülmüştür.



Şekil 4.23. 1.Grup deney numunelerinin yatay eksendeki sertlik dağılımı

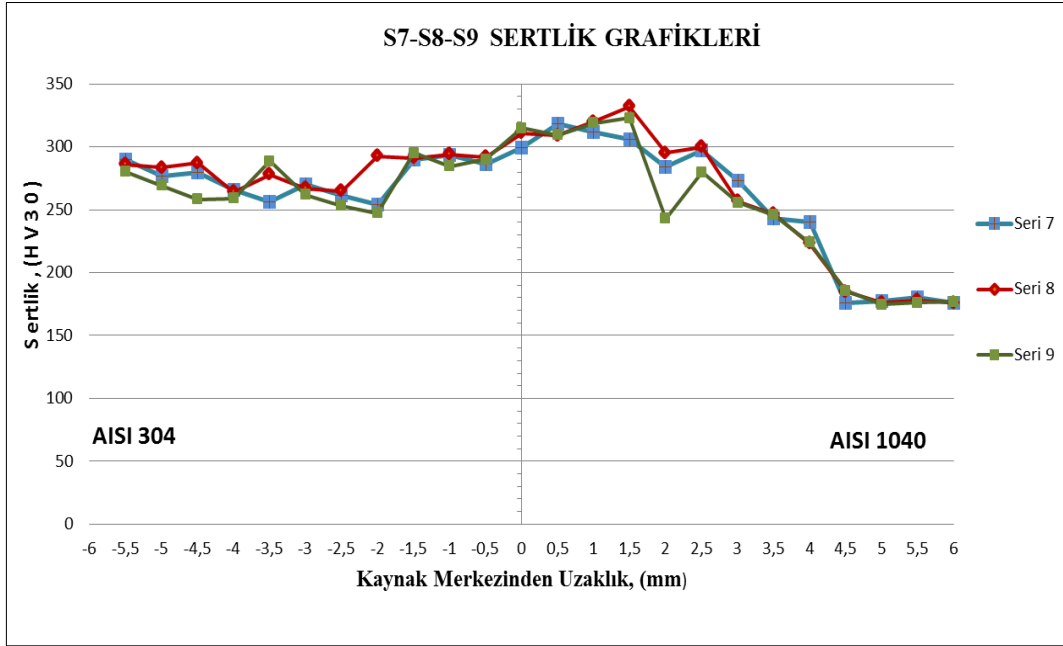
AISI 304 ITAB bölgesindeki sertlik (HV30 262) değerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. AISI 1040 kısmının sertlik değeri (HV30 218) olduğu ve ana malzeme ile kıyaslandığında sertlik değerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik değerine bağlı olarak en yüksek sertlik değeri, (HV30 378) değerinde, S1 numunesinde kaynaklı bölgeden koptuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.23). Kaynak ana metali arayüzeyde sıcaklığın yüksek olması ve ani soğumayla birlikte martenzit oluşumuyla birlikte deformasyon sertleşmesinden dolayı yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Kısmen deforme olmuş bölgedeki mikrosertlik değerlerine bakıldığında ana malzemeye göre bir düşüş olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değerlerine 50

MPa sürtünme basıncı olan S7, S8 ve S9 nolu numunelerde ulaşılmıştır. S7-S9 nolu numuneler karşılaştırıldıklarında artan sürtünme süreci sonucunda viskoz durum alan malzemeler dışarıya daha çok taşmıştır. Bundan dolayı ölçümü olan sertlik değerinin önceki gruba göre azaldıkları gözlemlenmiştir. Isı tesiri altında kalan bölgelerde, minimum sertlik değerinin kaynak dikişlerine yakın ısıdan etkilenmiş bölgede olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür (Aydın vd., 2010).



Şekil 4.24. 2.Grup deney numunelerinin yatay eksendeki sertlik dağılımı

Sertliğin grafiğine bakıldığında, S6 numunenin sertliğin değerinin ana malzemenin sertlik değeri S4 ve S5 fazla olduğu tespit edilmiştir. Buna neden olan parametre sürtünme süresidir (Şekil 4.24).



Şekil 4.25. 3.Grup Numaralı deney numunelerinin yatay eksenindeki sertlik dağılımı

Sertlik grafiğine bakıldığında, numunenin kaynak merkezlerinden ana malzemeye doğru gidildikçe değişim göstermiştir. Sertlik değerinin ana malzemenin sertlik değerine fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.25).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, AISI 1040/AISI 304 çelik çiftleri farklı işlem parametreleri (devir sayıları, sürtünme basıncı ayrıca sürtünmenin süresi kaynak bölgesinin sıcaklığı) kullanılıp sürekli tahrikli sürtünme kaynağı metoduyla birleştirilmiştir. Uygulanmış olan parametrenin kaynaklı bağlantıların birleşme alanlarında oluşan mikroyapısal değişimi ve mekanik davranışı üstüne olan etkisine bakılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmışlardır;

1-AISI 1040 ve AISI 304 ostenitik paslanmaz çeliği, sürtünme kaynağıyla başarılı bir şekilde halde kaynak edilmiştir.

2-Makroyapı analizi incelemesinde, yapılmış olan sürtünme kaynağı sonucunda numune temas yüzeylerinde oluşan flanşlarda farklılıklar gözlemlenmiştir. Yığma basıncı ve sürtünme basıncının çoğalması ile meydana gelen flanşların yükseldiği görülmüştür. Fakat bu artışta, sürtünme basınçlarının yığma basıncından daha etkili bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu deneyde farklı bileşimlere sahip olan iki çeliğin kullanılmasından ötürü kaynak yerlerinin her iki taraftanda farklı boyutlarda flanşlar meydana gelmiştir. AISI 304 tarafından meydana gelen flanş AISI 1040 tarafından oluşan flanşından daha küçüktür.

3-Kaynaklı bağlantının yüzeyinden alınmış yüzey sıcaklığı ölçümünün sonucunda, devir sayıları, sürtünmenin süreci ve sürtünmenin basıncı, kaynak işlemi sıcaklığı üstünde önemli tesirinin bulunduğu ve ölçülmüş olan sıcaklık değerinin 980-1185 °C aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra en yüksek arayüzey sıcaklıkları, S9 nolu numunede 1185 °C ölçülmüştür.

4-Sürtünme basıncı ve devir sayısı ile birleştirilmiş parçaların mukavemeti arttığı gözlenmiştir.

5-Genellikle tüm kaynak işlemlerinde olduğu gibi, kaynak yerlerinin her iki tarafında

ısıdan etkilenen bölgeler (ITAB) meydana gelmiştir ve bu alan AISI 1040 karbon çelikleri bakımından ısı iletimlerinin yüksek bulunmasından dolayı büyük bir alana yayılmıştır.

6-Kaynak bileşim bölgesinde mikrosertlik değerinin esas metalden fazla olduğu görülmüştür. Malzemelerin arasında element geçişi bu sertlik yükselişine sebep olmaktadır.

7-Mekanik özelliklerinin incelemesi sonucunda S9 nolu numunenin (2200 dev/dak, $P_1=50$ daN/cm², $P_2=100$ daN/cm², $t_{1,2}= 9$ s) çekme mukameveti en yüksek çıkmıştır.

8-Aynı geometrideki numunelerde yüksek sürünme süresi, birleşme bölgelerinde ısıyı yükseldiğinden daha iyi birleştirme gözlemlenmiştir. Bu nedenle malzemenin birleştirilmelerinde sürünme süresi önemli parametre olduğunu göstermektedirler.

9-Kaynak bölgesindeki sertlik değerleri, kaynak bileşim bölgesinde oluşan intermetalik bileşiklerden dolayı oldukça yüksek çıkmıştır.

11-Çekme testi sonucunda, en sünek kopma davranışı S9 nolu numunede görülmüştür.

KAYNAKLAR

Anık, P. S., Tülbentçi, MK., Kaluç. (1991). Örtülü elektrod ile elektrik ark kaynağı, İstanbulyayınevi, İstanbul, s.1-65.

Aydın, Ş., Ertürk, İ., Önder, M. (2010). AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, s.16(2), 139-147.

Baylan, O. (2004). Elektrik ark kaynak yöntemiyle birleştirilen östenitik martenzitik farklı paslanmaz çeliklerin kaynaklı bağlantılarında, mikroyapı ile özellikler arasında ilişkinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Zonguldak, s.3-33.

Balalan, Z. (2013). TM yöntemiyle üretilmiş alüminyum esaslı SiCp takviyeli kompozit ile 304 paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağıyla birleştirilebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Elazığ, s.1-25.

Cakmak, E., Gussev, M. N., Sridharan, N., Seren, M. H., An, K., Wang, H., Terrani, K. A. (2020). Micromechanical and microstructure analysis of strain-induced phenomena in ultrasonic additively-manufactured Al-6061 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 770, 138533.

Chatha, JS., Handa, A., Bedi, TS. (2021). Strength analysis of rotary friction welded joints of dissimilar steel grades. *Materials Today: Poceedings*, 38, 242-247.

Chen X, Tanaka S, Hokamoto K, Inao D, Lı X, Bataev I (2021). Comparison of explosive welding of pure titanium/SUS 304 austenitic stainless steel and pure titanium/SUS 821L1 duplex stainless steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(9), 2687-2702.

Çay, V. V., Ozan, S. (2005). Süperalaşım ve uygulama alanları. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 3(2), 178-188.

Çiğdem, M. (2006). İmal Usulleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, s.161-207.

Çelik, İ. (1997). Alüminyum ve bakır çubukların sürtünme kaynağı üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, s.1-27.

Çil, E. (2009). Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş paslanmaz çelik ve bakır parçaların kaynak bölgesi özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fenbilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalı, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, s.1-2.

Çelik, S., Ersözlu, I. (2009). Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels. *Materials Design*, 30(4), 970-976.

Darby, M. R. (1982). The price of oil and world inflation and recession. *The American Economic Review*, s. 738-751.

Dinç, D. (2006). AISI 1040 ve AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, s.1-2.

Ellis, C. R. G., Welding, J. (1976). Sürtünme kaynağında son endüstriyel gelişmeler. s.582-62-158.

Fukumoto, S., Tsubakino, H., Okita, K., Aritoshi, M., Tomita, T. (2000). Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel. *Scripta materialia*, 42(8), 807-812.

Gül, A. (2006). Farklı metalsel malzemelerin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.2-19.

Gürler, M. (2000). Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri. Doktora tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.6-42.

İnce, İ. (2011). Demir esaslı malzemelerin sürtünme-karıştırma kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.161-207.

James, J. A., Sudhish, R. (2016). Study on effect of interlayer in friction welding for dissimilar steels: SS 304 and AISI 1040. *Procedia Technology*, 25, 1191-1198.

Karabulut, A., Taşgetiren, S. (2004). Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi tasarım ve imalatı. Mak. Teknol. Elektron. Derg, 3, 38-46.

Kaya, Y. (2010). Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi, Karabük, s.1-2.

Kahraman, N., Yılbaş, B., Odabaş, D. (1995). H2210 Çeliği ile alüminyumun sürtünme kaynağıyla kaynak işlemi ve kaynak parametrelerinin kaynak üzerine etkilerinin deneysel olarak araştırılması, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, s.217-220.

Kaluç, E., Taban., E. (2004). Plazma Arkı ile Kaynak ve Endüstriyel Uygulamaları Makine Teknolojileri. Sayı. 84. s.22-65

Kahraman, N., Durgutlu, A. (2005). 316L paslanmaz çelik ile bakır levhaların örtülü elektrod ve TIG kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük, 8(1-2), 43-50.

Kurban A, Kahraman, N. (1995). Farklı metallerin sürtünme kaynağı ve kaynak parametrelerinin kaynak üzerine etkisi, 6. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 226, 42-88.

Kimura, M., Suzuki, K., Kusaka, M., Kaizu, K. (2017). Effect of friction welding condition on joining phenomena and mechanical properties of friction welded joint between 6063 aluminium alloy and AISI 304 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 178-187.

Korkut, M. H. (1997). Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s.1-2.

Korkmaz, E. (2017). Alüminyum alaşımlı boru-plakaların dıştan takım yardımıyla sürtünme kaynağı yapılabilirliğinin incelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi Denizli, s.1-2.

Kölük, F., Gülenç, B. (2004). Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak yönteminin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, *Teknoloji*, cilt:7, 693.

Khidhir, G. I., Baban, S. A. (2019). Efficiency of dissimilar friction welded 1045 medium carbon steel and 316L austenitic stainless steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1926-1932.

Kumar, A. S., Khadeer, S. A., Rajinikanth, V., Pahari, S., Kumar, B. R. (2021). Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints. *Materials Science and Engineering: A*, 824, 141844.

Lippold, J. C., Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, s.376.

Lucas, W., (1971). Process Parameters and Friction Welds, *Met. Const. and British, Welding J.*, s.293-297.

Makine Mühendisi Yayınları, (1994). İstanbul, Cilt.1 s.80-109: 200.

Ma, H., Qin, G., Dang, Z., Geng, P. (2021). Interfacial microstructure and property of 6061 aluminium alloy/stainless steel hybrid inertia friction welded joint with different steel surface roughness. *Materials Characterization*, s.179, 111347.

Matsuda, T., Adachi, H., Yoshida, R., Sano, T., Hori, H., Hirose, A. (2021). Formation of interfacial reaction layer for stainless steel/aluminum alloy dissimilar joint in linear friction welding. *Materials Today Communications*, s.26, 101700.

Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Henry, S. D., Moosbrugger, C., Anton, G. J., Sanders, B. R., Scott, Jr., W. W. (2001). ASM handbook (Vol.21, pp.107-119). *Materials Park, OH: ASM international*, s.1-2.

Midling, O. T., Grong, O. (1994). A process model for friction welding of AlMgSi alloys and Al SiC metal matrix composites I. Haz temperature and strain rate distribution. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(5), 1595-1609.

Murat, M. G. (2018). Savunma sanayinde kullanılan 420 ve 304L paslanmaz çeliklerinin TIG kaynağı sonrası korozyon ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, s.1-2.

Özdemir, N. (2002). Tane Küçültülmüş Düşük Alaşımli Yüksek Karbonlu Çeliklerin Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s.1-2.

Özdemir, N., Aksoy, M., Orhan, N. (2003). Effect of graphite shape in vacuum-free diffusion bonding of nodular cast iron with gray cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(2), 228-233.

Özdemir, N., Orhan, N. (2004). Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş süper plastik haldeki ötektoid üstü çeliğin ara yüzey mikro yapı değerlendirmesi, 11'ci Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Antalya, s.1-2.

Özdemir, N., Büyükarlan, S., Sarsılmaz, F. (2007). Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA1030 Alüminyum Alaşımında Karıştırıcı Uç Profili ve İlerleme Hızının Arayüzey Mikroyapı Değişimi Üzerine Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 19(3), 407-415.

Sarıtaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2004). Sarıtaş Teknik Yayın No:1, 2.Baskı, İstanbul. s.5-51.

Sathiya, P., Aravindan, S., Noorul, Haq., A. (2005). Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI 304 austenitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5), 505-511.

Şahin, M. (2001). Sürtünme kaynağı ile birleştirmede parça boyutları ve plastik şekil değiştirmenin etkilerinin araştırılması. Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, s.1-2.

Şahin, M., Akata, H. E., (2003). Joining with friction welding of plastically deformed steel. *Journal of Materials Processing Technology*, s.142(1), 239-246.

Şahin, M. (2007). Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Materials design*, 28(7), 2244-2250.

Taşkın, M., Çay, V., Özdemir, N. (2005). Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI430/Ç1010 çelik çiftinin ara yüzey mikro yapı değerlendirmesi, Teknoloji, cilt:8, 8(1-2), 65-70.

Taşdemir, V. (2006). AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğine ısı işlemin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat üniversitesi, Elazığ, s.1-7.

Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., Withers, P. J. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 54(2), 49-93.

Totten, G. E. (1992). ASM el kitabı, Cilt 18: Sürtünme, yağlama ve aşınma teknolojisi. ASM uluslararası, Cleveland, s.11-27.

Vill, V. I. (1962). Friction welding of metals (Vol. 1). American Welding Society; trade distributor: Reinhold Publishing Company, s.1-2.

Zhang, D., Ma, H., Qin, G., Geng, P., Wang, S. (2021). Microstructural characterisation and corrosion behaviour of aluminium alloy/steel hybrid structure produced by friction welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 349-356.

www.mtiwelding.com

<https://www.saritas.com.tr>

<https://bircelik.com/tr/kategori/304-1-4301>