

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

**SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN
AISI1020/RAMOR500 ÇELİK ÇİFTİNİN MİKROYAPI VE
MEKANİK DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
DERYA ABAK**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. İHSAN KIRIK**

BİNGÖL-2021

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında desteğini ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların yürütülmüşü ve tamamlanabilmesi destek sağlayan değerli hocam Doç. Dr. İHSAN KIRIK'a ayrıca deney sonuçlarının irdelenmesinde gerekli desteğini esirgemeyen Dr. Anıl İMAK ve Doç. Dr. Musa KILIÇ'a teşekkür ederim.

Son olarak tüm hayatım boyunca aldığım kararları destekleyen, beni cesaretlendiren ve moral veren, bende büyük emekleri olan ve dualarını esirgemeyen, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı özellikle aileme teşekkürü bir borç bilirim.

DERYA ABAK

Bingöl 2021

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELE VE KISALTMALAR LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM	7
3.1. Kaynak İşlemi	7
3.1.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	7
3.1.1.1. Difüzyon Kaynağı	8
3.1.1.2. Nokta Direnç Kaynağı.....	9
3.1.1.3. Patlamalı Kaynak	11
3.1.1.4. Ultrasonik Kaynağı	12
3.1.1.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	14
3.1.1.6. Sürtünme Kaynağı.....	15
3.1.1.6.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması.....	17
3.1.1.6.2. Sürtünme Kaynağı Çeşitleri.....	18
3.1.1.6.2.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	18
3.1.1.6.2.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Parametrelerinin Belirlenmesi.....	20
3.1.1.6.2.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	22
3.1.1.6.2.2.1. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı Değişkenleri	22

3.1.1.6.2.3. Hibrit Sürtünme Kaynağı (Kombine Sürtünme Kaynağı)	24
3.1.1.6.3. Sürtünme Kaynak Değişkenleri	25
3.1.1.6.4. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti	26
3.1.1.6.5. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları	27
3.1.1.6.6. Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları	28
3.2. Zırh Çelikleri.....	29
3.2.1. Zırh Çeliklerinin Üretimi.....	30
3.2.2. Zırh Çeliklerinin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri	31
3.2.2.1. ARMOX Zırh Çelikleri	33
3.2.2.2. Ramor Zırh Çelikleri	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1. Amaç	36
4.2. Kaynak Öncesi İşlemler.....	36
4.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	36
4.2.2. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması	37
4.3. Deney Çalışmalarında Kullanılacak Sürtünme Kaynak Makinesi ve Donanımı....	37
4.4. Kaynak Parametreleri	39
4.5. Kaynak İşleminin Uygulanması.....	40
4.6. Kaynak Sonrası Yapılan Muayeneler	41
4.6.1. Metalografik İncelemeler	41
4.6.2. Mikrosertlik Analizi	41
4.6.3. Çekme Testi.....	42
4.6.4. Yorulma Testi	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	46
5.1. Kaynaklı Bağlantıların Makroskopik Değerlendirilmesi.....	46
5.1.1. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Makroskopik İncelemeleri	46

5.1.2. 1800 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Makroskopik İncelemeleri	48
5.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirilmesi	49
5.2.1. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S1 Numunesinin Optik İncelemeleri	50
5.2.2. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S9 Numunesinin Optik İncelemeleri	53
5.2.3. 1800 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S5 Numunesinin Optik İncelemeleri	56
5.3. Kaynaklı Bağlantıların SEM Analizleri.....	58
5.3.1. 2200 Devir sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S1 Numunesinin SEM Analizi.....	58
5.3.2. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S9 Numunesinin SEM Analizi.....	62
5.3.3. 1800 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S5 Numunesinin SEM Analizi.....	65
5.4. Kaynaklı Bağlantıların EDS Analizleri	67
5.4.1. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S1 Numunesinin EDS Analizi.....	67
5.5. Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi	68
5.5.1. 2200 dev/dak ile Birleştirilen S1 Numunenin Mikrosertlik Analizi	69
5.5.2. 2200 dev/dak ile Birleştirilen S9 Numunenin Mikrosertlik Analizi	69
5.5.3. 1800 dev/dak ile Birleştirilen S5 Numunenin Mikrosertlik Analizi	70
5.6. Kaynaklı Bağlantıların Çekme Testi Sonuçları ve İrdelenmesi.....	70
5.6.1. 2200 dev/dak 40 MPa Sürtünme Basıncı ve 100 MPa yığma basıncı ile Birleştirilen Numunelerin (S1, S2, S3) Çekme Testi Analizi.....	71
5.6.2. 2200 dev/dak 60 MPa Sürtünme Basıncı ve 120 MPa Yığma Basıncı ile Birleştirilen Numunelerin (S7, S8, S9) Çekme Testi Analizi.....	72
5.6.3. 1800 dev/dak 40 MPa Sürtünme Basıncı ve 100 MPa Yığma Basıncı ile Birleştirilen Numunelerin (S4, S5, S6) Çekme Testi Analizi.....	74

5.7. Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Deneyi Sonuçları.....	76
5.7.1. 2200 Devir Sayısı Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deneyi Sonuçları.....	76
5.7.2. 1800 Devir Sayısı Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deneyi Sonuçları.....	78
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	83

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

V_t	: Tahrik mili hızı (d/d)
X	: 1000 (çevrim katsayısı)
S	: Yüzey hızı (m/dak)
D_d	: Parçanın dış çapı (m)
E	: Enerji (j)
F	: Sürtünme kuvveti
N	: Yüzeye dik olan normal kuvvetini
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDS	: Enerji dağılımı spektrometresi
N	: Volan devri (d/d)
E	: Bir dönüşüm katsayısı olup değeri 182,4' tür.
W	: Volanın ağırlığı
k^2	: Ağırlık merkezlerinin dış eksene olan mesafesinin karesidir.
μ	: Sürtünme katsayısı
Δ	: Delta
σ	: Sigma

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Difüzyon kaynak seti (Sarsılmaz 2006).....	8
Şekil 3.2.	Nokta direnç kaynağı makinesi (url1).....	10
Şekil 3.3.	Patlamalı kaynak yönteminde işlemin yapılış sırası (Anık vd. 1991).....	12
Şekil 3.4.	Ultrasonik kaynak makinesi (url2).....	13
Şekil 3.5.	Sürtünme karıştırma kaynağının yöntemi (Karagöz ve Öksüz 2016).....	15
Şekil 3.6.	Sürtünme kaynağının sınıflandırılması (Kırık ve Özdemir 2012).....	18
Şekil 3.7.	Sürtünme kaynaklı parçalar (Çil 2009).....	28
Şekil 3.8.	Zırh çeliği imalatının genel işlemleri (Merzalı 2013).....	30
Şekil 3.9.	SSAB’de Armox çelik plakalarının imalat hattı (Bekçi 2019).....	33
Şekil 3.10.	Ramor zırh çeliklerinin araç üzerinde kullanımı (Bekçi 2019).....	35
Şekil 4.1.	Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinasının şematik resmi (Kırık ve Özdemir 2012).....	37
Şekil 4.2.	Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinası (Kırık ve Özdemir 2012).....	38
Şekil 4.3.	Dönerli ayna ve eksenel hareketli ayna donanımı (Kırık ve Özdemir 2012).....	39
Şekil 4.4.	Manuel kontrol paneli (Kırık ve Özdemir 2012).....	39
Şekil 4.5.	Parçaların bağlanma şekli.....	40
Şekil 4.6.	Kesilmiş numunenin şematik resmi.....	41
Şekil 4.7.	Mikrosertlik deney cihazı.....	42
Şekil 4.8.	Çekme deneyi cihazı.....	43
Şekil 4.9.	Çekme numunesi şematik resmi.....	44
Şekil 4.10.	Yorulma deney cihazı.....	44
Şekil 4.11.	Yorulma numunesi şematik resmi.....	45
Şekil 4.12.	Yorulma Numunesi.....	45
Şekil 5.1.	Sürtünme kaynaklı numunelerinde birleşme arakesitinin şematik resmi (Kırık ve Özdemir 2012).....	46
Şekil 5.2.	S1, S2 ve S3 no’ lu numunelerin makroskopik incelenmesi.....	47

Şekil 5.3.	S7, S8 ve S9 no' lu numunelerin makroskopik incelenmesi.....	48
Şekil 5.4.	S4, S5 ve S6 no' lu numunelerin makroskopik incelenmesi.....	49
Şekil 5.5.	Kaynaklı bağlantıların mikroyapı fotoğrafı (Özdemir ve Orhan 2004)...	50
Şekil 5.6.	2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S1 numunesinin mikroyapı fotoğrafı.....	51
Şekil 5.7.	S1 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü.....	51
Şekil 5.8.	S1 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü.....	51
Şekil 5.9.	S1 nolu numunenin C bölgesi optik Görüntüsü.....	52
Şekil 5.10.	S1 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü	52
Şekil 5.11.	S1 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü	53
Şekil 5.12.	2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S9 numunesinin mikroyapı fotoğrafı	54
Şekil 5.13.	S9 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü.....	54
Şekil 5.14.	S9 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü.....	54
Şekil 5.15.	S9 nolu numunenin C bölgesi optik görüntüsü.....	55
Şekil 5.16.	S9 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü.....	55
Şekil 5.17.	S9 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü.....	55
Şekil 5.18.	1800 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S5 numunesinin mikroyapı fotoğrafı.....	56
Şekil 5.19.	S5 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü.....	57
Şekil 5.20.	S5 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü	57
Şekil 5.21.	S9 nolu numunenin C bölgesi optik görüntüsü.....	57

Şekil 5.22.	S5 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü.....	58
Şekil 5.23.	S5 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü.....	58
Şekil 5.24.	2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S1 numunesinin SEM görüntüsü.....	59
Şekil 5.25.	S1 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü.....	60
Şekil 5.26.	S1 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi SEM görüntüsü.....	60
Şekil 5.27.	S1 nolu numunenin C bölgesi SEM görüntüsü.....	61
Şekil 5.28.	S1 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü.....	61
Şekil 5.29.	2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S9 numunesinin SEM görüntüsü.....	62
Şekil 5.30.	S9 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü.....	63
Şekil 5.31.	S9 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi SEM görüntüsü.....	63
Şekil 5.32.	S9 nolu numunenin C bölgesi SEM görüntüsü.....	64
Şekil 5.33.	S9 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü.....	64
Şekil 5.34.	1800 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S5 numunesinin SEM görüntüsü.....	65
Şekil 5.35.	S5 nolu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü.....	66
Şekil 5.36.	S5 nolu numunenin C bölgesi SEM görüntüsü.....	66
Şekil 5.37.	S5 nolu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü.....	67
Şekil 5.38.	S1 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları.....	68
Şekil 5.39.	Üç numuneye (S1, S5, S9) ait mikrosertlik grafiği.....	69
Şekil 5.40.	Çekme deneyi numune resmi.....	70
Şekil 5.41.	S1 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	71

Şekil 5.42.	S1 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	71
Şekil 5.43.	S3 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	72
Şekil 5.44.	S1, S2, S3 numaralı numunelerin gerilme grafikleri.....	72
Şekil 5.45.	S7 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	73
Şekil 5.46.	S8 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	73
Şekil 5.47.	S9 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	73
Şekil 5.48.	S7, S8, S9 numaralı numunelerin gerilme grafikleri.....	74
Şekil 5.49.	S4 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	75
Şekil 5.50.	S5 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	75
Şekil 5.51.	S6 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.....	75
Şekil 5.52.	S4, S5, S6 numaralı numunelerin gerilme grafikleri.....	76
Şekil 5.53.	S2 numaralı numunelerin yorulma deneyi fotoğrafı.....	77
Şekil 5.54.	S6 numaralı numunelerin yorulma deneyi fotoğrafı.....	77
Şekil 5.55.	S4 numaralı numunelerin yorulma deneyi fotoğrafı.....	78

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında farklı malzemeler için önerilen kaynak değişkenlerinin değerleri (Dinç 2006).....	21
Tablo 3.2.	Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri (Merzalı 2013).....	32
Tablo 3.3.	Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Karagöz vd. 2007).....	32
Tablo 3.4.	Ramor zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu (% max ağırlık) (Bekçi 2019).....	34
Tablo 3.5.	Ramor zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Bekçi 2019).....	35
Tablo 4.1.	Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri.....	36
Tablo 4.2.	Kaynaklı bağlantıların üretiminde kullanılan sürtünme kaynak parametreleri.....	40
Tablo 5.1.	S1 numunesinin 1 numaralı bölgesinin EDS analiz sonuçları.....	68

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN AISI1020/RAMOR500 ÇELİK ÇİFTİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip AISI 1020 ve Ramor 500 çelik çifti sürtünme kaynağı metodu ile birleştirme işlemi incelenmiştir. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerde; dönme hızı (devir sayısı), sürtünme süresi ve sürtünme basıncı gibi değişkenler, ilgili literatür yardımıyla belirli aralıklarda değiştirilerek, farklı mikro yapı ve mekanik özellikleri olan numuneler oluşturulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, işlem değişkenlerinin kaynak kalitesi üstünde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Farklı özelliklere sahip bu zırh çelik ve orta karbonlu çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, uygun devir sayısı, sürtünme süreleri ve sürtünme basıncı uygulanarak daha mukavemetli birleştirmelerin yapılabildiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasının ilk kısmında konuyla ilgili giriş yapılmış. İkinci bölümde ilgili literatür ışığında örnekler incelenerek yapılan çalışmaların amaçları anlatılmıştır. Üçüncü bölümünde katı hal kaynak yöntemlerinden bahsedilmiş, kullanılan malzemeler ile ilgili bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışma için yapılan hazırlıklar ve deneysel yöntem ele alınmıştır. Beşinci ve son bölümünde yapılan deneysel çalışmalar ayrıntılı incelenirken, deney sonuçları tartışılıp irdelenmiş ve çalışma sonunda elde edilen genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme kaynağı, AISI 1020, Ramor 500.

EXAMINATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF THE AISI1020/RAMOR500 STEEL PAIR WITH FRICTION WELDING

ABSTRACT

In this study, the joining process of AISI 1020 and Ramor 500 steel pairs with different properties by friction welding method was investigated. In samples joined by friction welding; Variables such as rotational speed (speed), friction time and friction pressure were changed at certain intervals with the help of the relevant literature, and samples with different microstructures and mechanical properties were created. As a result of the examinations, it was determined that the process variables play an important role on the quality of the weld. It has been seen that when joining these armor steel and medium carbon steels with different properties by friction welding method, more durable joints can be made by applying appropriate speed, friction times and friction pressure.

In the first part of this thesis, an introduction to the subject has been made. In the second part, the aims of the studies are explained by examining the examples in the light of the relevant literature. In the third part, solid state welding methods are mentioned and information about the materials used is given. In the fourth chapter, the preparations for the experimental study and the experimental method are discussed. In the fifth and last part, while the experimental studies were examined in detail, the results of the experiments were discussed and analyzed, and the general results and recommendations obtained at the end of the study were given.

Keywords: Friction welding, AISI 1020, Ramor 500.

1. GİRİŞ

Teknolojik, endüstriyel ve savunma sanayisindeki hızlı gelişim ile kullanılan metalik malzemelerin birleştirilmesi oldukça önem kazanmaktadır. Geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilen metalik malzemelerde çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Yeni ve özellikli malzemelerden olan zırh çelikleri geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirildiğinde bazı metalürjik problemler ortaya çıkmaktadır. Ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilen çeliklerde oluşan olumsuzlukları azaltmak amacıyla minimum kaynak kusurları içeren ve kaynak sonrası en az iç gerilmeler oluşturan katı hal kaynak türlerinden biri olan sürtünme kaynağı tekniği kullanılabilir. Böylece ergitme kaynak yöntemlerindeki olumsuzluklar azaltılmış olmaktadır. Sürtünme kaynağı ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalarda zırh çelikler ile karbonlu çeliklerin sürtünme kaynak metodu ile kaynak yapılması konusunda neredeyse hiç çalışılmamış. Sürtünme kaynağı; bir malzemenin sabit diğer malzemenin dönel hareket ile döndürülmesi sonucu bu iki malzeme çifti arayüzeyleri arasında gerçekleşen sürtünme yoluyla ortaya çıkan mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısı kullanılarak plastik deformasyon ve ekstrüzyonla gerçekleştirilen işleme sürtünme kaynağı denir. Isıtma fazı (sürtünme fazı), kaynak işlemi bitinceye kadar geçen süreye denir. Bu süre boyunca yüzeyler basınç altındadır. Basınç altında olan bu yüzeylerde plastik şekil verme sıcaklığı oluşur. Çeliklerde bu sıcaklığın oluşması 900-1300 °C arasındadır ve çok kısa bir sürede bu sıcaklığa ulaşılır. Böylece baskı kuvvetiyle parçalar birleştirilir. Ergitme kaynağıyla birleştirilmesi oldukça zor olan malzemeler sürtünme kaynağıyla daha kolay bir şekilde birleştirilebilir.

Bu nedenle bu çalışmada AISI 1020/Ramor 500 çeliklerini farklı işlem metotları kullanarak katı hal kaynak türü olan sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Ortaya çıkan kaynaklı bağlantılarda çekme ve yorulma testi uygulanıp hasar süreçleri incelenecektir. Bu süreçte ortaya çıkan olumsuzluklar en aza indirilmeye çalışılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Konu ile ilgili yapılan literatür taramalarında yapılan çalışmalar tespit edilerek aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Baysal (2019); değişken kaynak değerleri (hız, basınç ve zaman) uygulanılarak AA6013 ile AA7075 malzemelerinin, sürtünme kaynağı metodu ile bir araya gelmesi konusunu ele almıştır. Bir araya getirilen malzemelerin titreşim analizi, mikroyapıları ve makrosertlik ölçümlerini incelemiştir. Değiştirdiği kaynak değerlerinin, gerçekleştirilen incelemelere etkisi değerlendirilmiştir.

Korkmaz (2017); çalışmasında alüminyum alaşımı AA6063 borular, AA6082 plakalara DTYSK tekniği aracılığıyla birleştirmiştir. Öncelikle en uygun devir sayısı, baskı yükü ve sıcaklık parametrelerini belirlemiştir. Daha sonra plaka üstüne yapılan kaynak ağzı, boru ile plaka arası boşluk ve boru çıkma yüksekliği değişkenleri düzenlenerek bütün değişkenlerin kesme direnci parametrelerine, mikro sertlik pat-rametrelerine ve kaynak alanı içyapı yapılarına etkilerini incelemiştir. Gerçekleştirilen deneylerden sonra bulunan sonuçları değerlendirerek çalışmasını tamamlamıştır.

Balta (2016); çalışmasında sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı ile üretilen orta karbonlu çelik boru ve orta karbonlu dövme braket bağlantısının mikro ve mekanik özellikleri ve sürtünme kaynağının parametrik olarak en iyi düzeyde gerçekleştirmiştir. Sürtünme ile MIAB kaynağı aracılığıyla üretilmiş deneysel örnekler hazırlamıştır. Boru ve braket sürtünme kaynak bağlantısı amacıyla kaynak verileri, mekanik nitelikler tarafından değerlendirmiştir. Sürtünme kaynağı kaynak değerleri uygunluğu Yüzey Cevap Metodu (RSM) yapılarak gerçekleştirmiştir. RSM yapılarak gerçekleştirilen matematiksel model, Varyans Analizi (ANOVA) metoduyla doğrulamıştır. Yapılan sürtünme kaynağı deney örneklerine çekme testi, mikro-sertlik ile petal testleri uygulamıştır. Isıya maruz kalan bölgenin (ITAB) makro ve mikroyapısal analizini gerçekleştirmiştir.

Erdoğan (2015); çalışmasında metal malzemelerin ara tabaka kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılmasını incelemiştir. Sürtünme kaynağında Ti6Al4V ile AISI 310, AISI304, AISI316, AISI316Ti, AISI316L, AISI430, Inconel600 numunelerini kaynak etmiştir. Kaynaklı numunelerin mekanik ve metalurjik incelemelerini yapmıştır. Kaynaklı numunelere çekme testi, mikro sertlik, Optik mikroskobu, SEM, analizleri yapmıştır. Sonuç olarak yapılan sürtünme kaynağı çalışmaları başarılı sonuç vermiştir.

Asma (2014); çalışmasında AA 6061 ve AA 7075 malzemelerini farklı sürtünme kaynak parametreleri aracılığıyla birleştirmiş ve sürtünme kaynaklı bağlantılar elde etmiştir. Bu bağlantıların mikroyapı, mikrosertlik ve çekme testi incelemelerini yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda AA 6061 ile AA 7075 malzeme ikilisinin farklı sürtünme kaynak değerlerinde birleştirildiği ve farklı mikroyapı özellikleri gösterdiği anlaşılmıştır.

Mercan (2013); çalışmasında AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik ve kaynak yeteneği yüksek ayrıca düşük fiyat sağlayan düşük karbonlu AISI 1020 çelik çifti değişken işlem verileri kullanarak katı hal kaynak metodlarından biri olarak bilinen sürekli tahrikli sürtünme kaynağı aracılığıyla birleştirmiştir. Birleştirilen numunelere döner eğmeli yorulma testi ile çekme testi yapılarak hasar zamanlarını incelemiştir. Kaynaklı bağlantıların hasarı boyunca ortaya çıkan olumsuzlukları en aza indirmek için gerekli işlem parametrelerini incelemiştir. Mikroyapı ve mekanik testler sonucunda, üretim verilerinin bu iki malzeme çiftinin sürtünme kaynağı aracılığıyla bir araya gelebileceği üstüne olan etkileri incelemiştir.

Merzalı (2013); çalışmasında zırh çeliğinin kaynaktan sonra ısı etkisi altında bulunan alanında olan hemen hemen değişmemiş ve temperlenmiş alanların faz özelliklerinin homojenizasyonu ve mekanik özelliklerin uygunluğu ile ilgili çalışmıştır. Mikroyapısal araştırmalarda ışık mikroskobunu kullanmıştır. İlk olarak asıl zırh çeliği üstünde aynı yapı ile sertlik parametrelerinin oluşması amacıyla ısıtılma işlemi değişkenleri geliştirmiştir. Zırh çeliğinde yapılan ısıtılma işlemi değişkenleriyle asıl zırh çeliği ile aynı sertlik ve faz özelliklerini bulmuştur. Kaynaktan sonra yapı literatür göz önünde tutularak belirlenen bölgelere ayırıldıktan sonra mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir.

Balalan (2013); çalışmasında, Al matrisli SiCp takviyeli ve Cu eklemeli metal matrisli kompoziti toz metalurjisi aracılığıyla üretmiştir. Bu malzemeyi sürtünme kaynak metoduyla aynı olmayan değerlere sahip AISI 304 östenitik paslanmaz çelikle birleştirmiştir. Kaynak yapılan numunelerdeki değerler değiştirerek, farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip birleştirmeleri elde etmiştir.

Kırık ve Özdemir (2012); sürtünme kaynağı ile bir araya gelen AISI 1040/duplex paslanmaz çelik ikilisinde sürtünme zamanının mikroyapı ile mekanik özelliklerine tesiri başlıklı çalışmalarında; sürtünme zamanının bağlantı direncine önemli bir tesire sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. En büyük çekme direnci, 1700 dev/dak devir sayısı ile 3 sn' lik sürtünme zamanı uygulanarak meydana getirilen kaynaklı numunede elde etmişlerdir. Ayrıca artan sürtünme süresine bağlı olarak aşırı deformasyona uğramış bölgenin genişliğinde artmanın olduğunu tespit etmişlerdir.

Çelik (2008); çalışmasında, otomotiv endüstrisinde kullanılan Ck 45 ve St 52-3 malzemelerinin sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilirliğini araştırmıştır. Böylece maliyeti yüksek olan St 52-3 çeliğinin sarfiyatından tasarruf sağlanması amaçlanmıştır. Kaynak sırasında, kızılötesi sıcaklık ölçme cihazı ile yüzey sıcaklıklarını ölçmüştür. Birleştirilen numunelere çekme, izod darbe deneylerini uygulamış, mikrosertlik ölçümleri yapmış, mikroyapı ve kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri ve EDS analizi yapılarak mekanik ve metalürjik özellikleri saptamıştır. Parametrelerden sürtünme süresi ve yığma basıncı artırılarak yapılan birleştirmede diğerlerine göre daha iyi bir birleşme kalitesi elde etmiştir. Bunun sonucunda, farklı iki çeliğin sürtünme kaynağı ile yeterli bir şekilde birleştirilebileceği görülmüştür.

Ünal (2003); sürtünme kaynağı ile bir araya getirilmiş AISI 4340 çeliği ve paslanmaz çeliklerin yorulma davranışlarının araştırılmasında AISI 304 ve AISI 430 numunelerin genellikle sünek tarzda, çukurcuk oluşturarak kırıldığı, AISI 440 numunelerinde sünek tarzda kırıldığı tespitinde bulunmuştur.

Bekçi (2019); çalışmasında Ramor 500 ile Ramor 550 zırh çeliği malzemelerinin 7.62 mm mermilere karşı balistik direncini değişik şartlarda deneysel ve sayısal bir şekilde incelemiştir. Çalışmasının deneysel bölümünü monolitik malzeme, çift tabakalı kompozit

malzeme ve eğik malzeme yapılarının araştırılması meydana getirmektedir. Totalde 7 tane balistik test gerçekleştirmiştir. Monolitik malzeme yapısı oluşturmak amacıyla 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 kullanmıştır. Yapılan deneylerde plakaların delindiği ve yapraklanma şekli hasar mekanizmasına tabii tutulduğu gözlenmiştir. Çift tabakalı kompozit plaka deneylerinde 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 iki değişik düzenleme olarak katmanlandırmıştır.

Örenler (2018); yapmış olduğu çalışmada Armox 500T zırh çeliğinin ergitme kaynak metodlarında kaynakları yapılmış bağlantının mekanik nitelikleri, sertliği, makro ve mikro yapı özellikleri ile tokluk değerlerini belirlemiştir. Test malzemelerinin kaynakları gerçekleştirilirken aynı koruyucu gaz kompozisyonunu kullanmış birlikte değişken amper ölçülerine göre kaynak parametreleri değişiklik göstermiştir.

Atapek (2006); bu çalışmasında, zırh çeliklerinin fiziksel metalurjik özellikler boyunca genişletilmesi ve karakterizasyonu sağlamak olmuştur. Orta karbon ve alaşım elementi dahilinde bor katkılı farklı alaşımlandırma düzeninin gerçekleşmesi ve yapılan farklı ısıl işlemlerle zırhın gücünü gösterecek en uygun mekanik değerlerin balistik karakteristiğe uygun olacak şekilde elde edilmesini hedeflemiştir.

Bayar (2019); bu çalışmasında, Ramor 500 zırh çeliği, Hibrit Plazma Ark Kaynağı (HPAK), Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAK) ve Soğuk Metal Transfer Ark Kaynağı (CMT) metodlarıyla robotik bir biçimde kaynak etmiştir. Üç değişik ergitme kaynak yönteminin Ramor 500 zırh çeliğinin metalurjik ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması amacı ile kaynaklı numuneler optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), EDS ile incelemiş ile Vickers sertlik, çekme testi, üç nokta eğme testi ve çentik darbe testlerine tabi tutmuştur. HPAK ve GMAK kaynaklı numunelerin kaynak metali bölgelerinin çoğunlukla östenik yapıda olmakla beraber az miktarda martenzitik ve kısmen δ -ferrit fazından oluşmuş iken CMT kaynaklı numunede ise östenitik ve az miktarda δ -ferrit fazından oluştuğunu tespit etmiştir. Kaynak metali ve ITAB sertlik değerleri esas metalden yüksek olduğunu tespit etmiş olup zırh çeliklerinin çoğu ergitmeli ark kaynaklarında büyük bir problem olarak anılan kaynak bölgesi veya ITAB sertliklerinin ana malzemeden daha düşük olması problemini gidermiştir. Çekme dayanımlarında işlemsiz zırh çeliğine göre düşüş meydana gelmiş olsa da literatüre göre özellikle HPAK yöntemi ile tatmin edici

dayanımlar elde etmiştir. Elde edilen çekme dayanımları esas metale göre HPAK, GMAK, CMT kaynak yöntemlerinde sırasıyla %65, %50 ve %40 şeklinde sıralamıştır. Çekme sonrası kırık yüzeylerin fraktografik incelemesinde HPAK ve GMAK ile birleştirilen numunelerde yarılma kırığı tipinde gevrek kırılma, CMK kaynaklı numunede ise taneler arası (intergranüler) kırılma tipinde sünek kırılma meydana gelmiştir. Çekme testi ve Eğme testinde HPAK ve GMAK kaynaklı numunelerin iri taneli bölgeden koptukları, CMT kaynaklı numunenin ise kaynak metali bölgesinden koptuğunu tespit etmiştir. Darbe çentik tokluk değerleri bakımından incelendiğinde CMT kaynaklı numunelerin esas metalden daha iyi darbe direnci gösterdiği tespit etmiştir. HPAK ve GMAK kaynaklı numuneler esas metale göre daha az darbe direnci sağlamış olsa da literatürde ki çalışmalara kıyasla daha iyi darbe tokluk değerleri sağlamıştır. Sıcaklık düşüşü ile hem işlemsiz Ramor 500 hem de kaynaklı numunelerin darbe tokluk değerleri düşmüştür. HPAK yöntemi malzemenin içyapısı ve mekanik özelliklerini daha az düşürdüğü zaman, enerji ve maliyetten tasarruf sağladığından dolayı tez çalışması sonucunda karşılaştırılan 3 kaynak yönteminden en uygun olanın HPAK olduğu sonucuna varmıştır.

Taşkaya (2017); Ansys sonlu elemanlar metodu ile nümerik analiz ile matematiksel şekiller uygulanarak bilgisayarlar aracılığıyla kaynaklı yapılarda meydana gelen kompleks durumları çözmeye çalışmıştır. Tozaltı kaynağından sonra numunelerin radyografik değerlendirilmesi, mekanik özellikleri ile mikroyapıları; çekme testi, optik mikroskop ve SEM aracılığıyla incelemiş, kaynak alanında Vickers sertlik skalası ve sertlik dağılımı belirlemiştir. Numunelerin kaynak alanında özelliği olan yapılar için SEM-EDS-XRD analizlerini yapmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kaynak İşlemi

Metallerde kaynak, işlem türüne göre ikiye ayrılır. Bunlar ergitme kaynağı ve katı hal kaynağı metotlarıdır. Ergitme kaynağı; metalik özellik gösteren, ergime sıcaklıkları aynı ya da birbirine yakın malzemelerin ısı, basınç ya da her ikisinin kullanılmasıyla, ilave metal eklenerek ya da eklenmeyerek yapılan birleştirme işlemidir. Katı hal kaynağı ise aynı ya da farklı iki malzeme çiftinin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta basınç etkisi ile plastik deformasyon ve ekstrüzyonla yapılan birleştirme işlemidir.

3.1.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

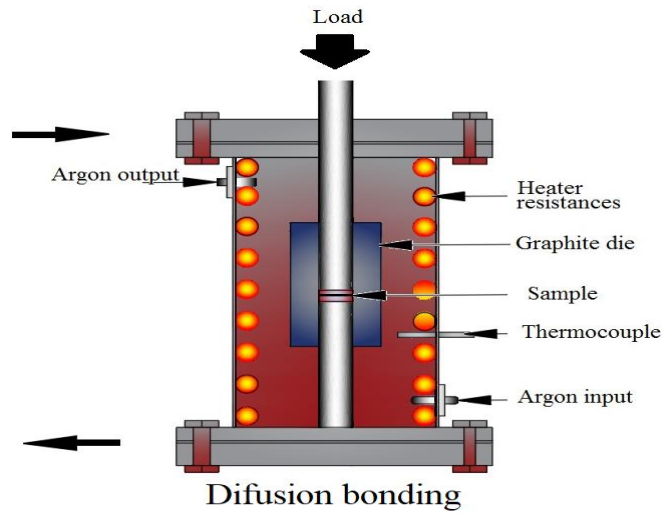
Katı hal kaynağının yapılabilmesi amacıyla iki malzemenin arayüzeyleri, aralarında bir bağlantı oluşuncaya dek birbirlerine yakınlaştırmak gereklidir. Bunu gerçekleştirmek için birden fazla teknik uygulansada, tüm yöntemlerde temel olan, üzerlerinde bir katman oluşmayacak şekilde iki yüzeyi deforme ederek bir basınç kullanmaktır.

Temel katı hal kaynak yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Yüksek sıcaklıkta basınç kaynağı
2. Soğuk basınç kaynağı
3. Difüzyon kaynağı
4. Nokta direnç kaynağı
5. Patlamalı kaynak
6. Ultrasonik kaynak
7. Sürtünme karıştırma kaynağı
8. Sürtünme kaynağı

3.1.1.1. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, katı hal kaynak yöntemleri arasında yer alır. Difüzyon kaynağı; birleştirilmek için seçilmiş iki alanın, malzemelerinin ergime sıcaklıklarından düşük bir sıcaklıkta, malzemelerde belirlenebilir plastik akmaya neden vermeyen bir basınç uygulandığında, katı hal difüzyonu yöntemiyle malzemelerde metalürjik bir bağlantı meydana gelinceye kadar malzemenin değerlerini büyük oranda değiştirmeyecek bir zaman bırakılmasıyla gerçekleştirilen kaynak çeşididir. Malzemelerin işlem yapılacak alanlarına yapılan sıcaklıkla eriyen bir ara plaka kullanıldığında bu olaya “sıvı faz difüzyonu” denmektedir (Orhan 1996). Şekil 3.1’de difüzyon kaynak setinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 3.1. Difüzyon kaynak seti (Sarsılmaz 2006)

Kohezyon kuvvetlerini, kristal formu olan katı bir malzemenin atomları arasındaki çekim kuvveti oluşturur. Normalde malzemede bulunan her bir atom, üzerine etki eden kuvvetin sıfır olduğu bir pozisyonda bulunur. Katı, diğer kuvvetlerin tesiriyle gerildiği zaman, atomları dengede bulundukları şekillerini terk eder bununla birlikte kristalin içinde dış kuvvet etkisiyle dengelenen gerilme oluşturur. Atomlar arasındaki çekim kuvveti, birbirlerinden uzaklaşma mertebeleri ile orantılı yükselir ve en yüksekte geçtikten sonra düşer. Farklı özellikteki iki katının alanları arasındaki çekim kuvvetine adhezyon denir.

Aynı veya farklı iki katı malzemenin birleştirilmesi ile arayüzeyleri arasında bağ oluşturulurken, aynı tür katı alanlar ortasında kohezyon, farklı cins yüzeyler arasında da adhezyon işlemi yapılmış olur. Adhezyon ile kohezyon işlemleri serbest yüzey enerjisinin ürünüdür. Difüzyon kaynağı seti ile ilgili ilk bilgi Kinzel (1944) tarafından verilmiştir. Daha sonra Gerken ve Owczarski (1955) üç aşamalı bir mekanizma bulmuştur. Sonraki yıllarda Shwartz, King ve Owczarski birbirlerininine aynı olan bir modelle bu modelleri bir araya getirmişlerdir. Bu modelden anlaşılan ilk aşamayı, birleştirilecek yüzeye basınç altında ilk teması ve sürünme oluşturmaktır. İkinci aşamada, birinci aşamada kapatılamayan ara kesit boşlukları difüzyon yöntemiyle yok edilmekte ve ara kesit tane sınırları daha az bir enerji seviyesine, yani ara kesit düzlemi dışına çökmektedir. Burada etkili mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Son aşama ise, tane içindeki boşlukların hacim difüzyonu yöntemiyle birleştirilmesidir. Araştırmacılar, başlangıç aşamasında plastik deformasyonunun, birleşecek alanların büyük bir kısmı temas ettiği zaman ise, yüzeyden kaynaklanan ve ara yüzey mekanizmalarının etkin olduğu konusunda ortak kanıdadır.

Difüzyon kaynak çalışma şekli şu şekildedir;

- Yük altında plastik deformasyon
- Sürünme deformasyonu
- Difüzyon
- Yeniden kristalleşme ve tane sınır göçü

3.1.1.2. Nokta Direnç Kaynağı

Direnç kaynak yöntemleri (nokta, dikiş ve flaş-alın yakma kaynağı) genellikle büyük dayanımlı, ısıl işleme uygulanabilen alaşımların bir araya getirilmesinde tavsiye edilir. Bunları ergitme kaynak aracılığıyla bir araya getirilmesi zor olduğundan direnç kaynağı aracılığıyla bir araya getirilmeleri kolayca yapıp, kaynak uygulamasında meydana gelen direnç kaybı yok olur. Direnç kaynağı, iş malzemelerinden geçirilen elektrik akımına karşı iş malzemelerinin verdiği dirençten elde edilen ısı ile basıncın kullanılmasıyla gerçekleşen kaynak türüdür. Parçada meydana gelen elektrik akımının oluşturduğu ısıdan başka, farklı bir ısı kullanılmamaktadır. Isı, kaynak yapılacak alanlarda oluşur ve basınç kaynak makinesindeki elektrotlar ile çeneler yardımıyla yapılır (Anık vd. 1991).

Direnç kaynağında kullanılacak ısı, büyük kaynak akımları ile meydana gelmektedir. Nokta direnç kaynağının bileşenleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Isı üretim hızı, malzemenin mukavemetine ve akım şiddetine göre değişir. Bu ısı miktarının formülü:

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

Burada;

(T) saniye türünden kaynak süresi,

(R) ohm türünden iş parçasındaki toplam direnci,

(I) amper türünden kaynak akımını sembol eder.



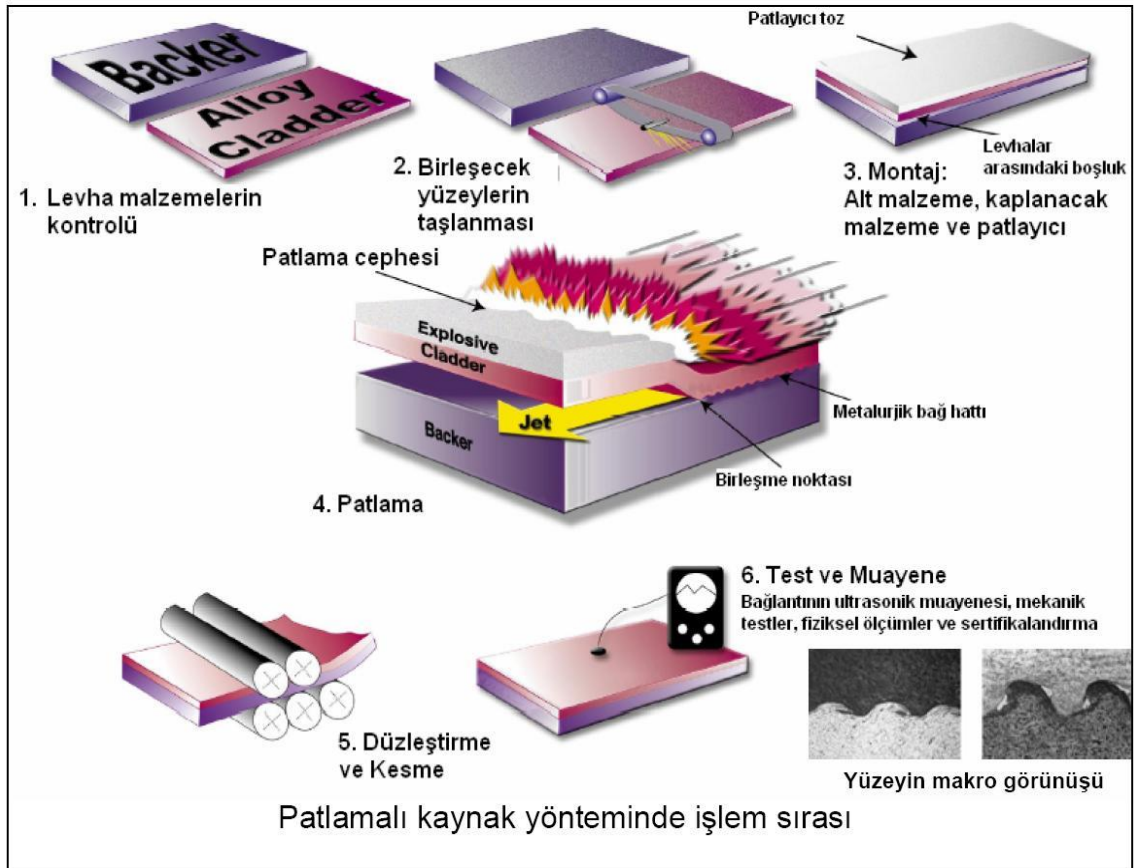
Şekil 3.2. Nokta direnç kaynağı makinesi (url1)

3.1.1.3. Patlamalı Kaynak

Kullanılacak iş parçaları kontrollü patlamanın tesiri yardımıyla iş parçalarında erime olmadan birbirine çarpması sonucunda gerçekleştirilen katı-hal kaynak yöntemidir. Patlamanın tesiriyle parçaların vardığı hızlarda çarpmanın sonucunda metalik bağ meydana gelir. Bu bağ, dalgalı bir ara yüzeyle sonuçlanan mekanik kilitlemeyle beraber metalürjiktir. Herhangi bir dolgu malzemesi kullanılmadan uygulanır. Patlamalı kaynak değişkenleri;

- Çarpma hızı
- Çarpma açısı
- Kaplama metalinin hızı

Çarpma sırasında parçada plastik akma meydana gelir ve bununla birlikte meydana gelen jet ara yüzeyi temizleyerek güçlü metalürjik bağ oluşmasına sebep olur. Karbon çeliklerinin paslanmaz çeliklere ya da eritme kaynağı veya difüzyon kaynağı yardımıyla gerçekleşmesi metalürjik açıdan düzgün olmayan alüminyumun veya titanyumun çelik ile bir araya gelmesi bu yöntemle yapılabilir. Bu yöntemle bir araya gelecek yüzey alanı $6,5 \text{ cm}^2$ ile 37 m^2 ye kadar farklılık gösterebilir. Temel ürün durağan kaldığından kalınlık sınırı mevcut değildir. Fakat kaplama metalinin kalınlık aralığı 0,25 ile 31,8 mm arasında yer alır. Patlamalı kaynak yönteminde işlemin yapılış sırası Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Patlamalı kaynak yönteminde işlemin yapılış Sırası (Anık vd. 1991)

3.1.1.4. Ultrasonik Kaynağı

Ultrasonik kaynak, aslında yarı-katı hal kaynak yöntemi olup bu kaynak işleminde parçalar oldukça yüksek tutma kuvvetleri ile tutulurken, parçaya yüksek frekanslı ses dalgaları yardımıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemde parçalarda fazla bir erime meydana gelmez. Şekil 3.4'te ultrasonik kaynak yönteminin resmi verilmiştir. Ultrasonik kaynak metodunda malzemeler, ultrason altındaki mekanik titreşimler ile az bir basınç aracılığıyla bir araya getirilir. Bu nedenle bir elektro-akustik dönüştüriciden faydalanılır. Bu dönüştüricide değiştirilebilen bir elektrik akımı, bir nikel alaşımının manyetostrüktif tesiri aracılığıyla aynı frekanstaki, boylamasına mekanik titreşimlere dönüştürür. Bir araya getirilecek malzemeler sabit bir örs üstündedir. Sonodron aracılığıyla teğetsel titreşimler parçaya eklenir. Sıkıştırma kuvveti ile kaynak yüzeyleri arasındaki bağıl hareketlerin meydana getirdiği genliğin artması ile birlikte akma gerçekleşir. Bu yöntem, birbirine bastırılmış yüzeylerin arayüzeylerinde, salınım yapan kayma kuvvetleri etkisiyle kaynak meydana

gelir. Bu arada meydana gelen iç gerilmeler arayüzeyde elastoplastik bir deformasyona sebep olur.

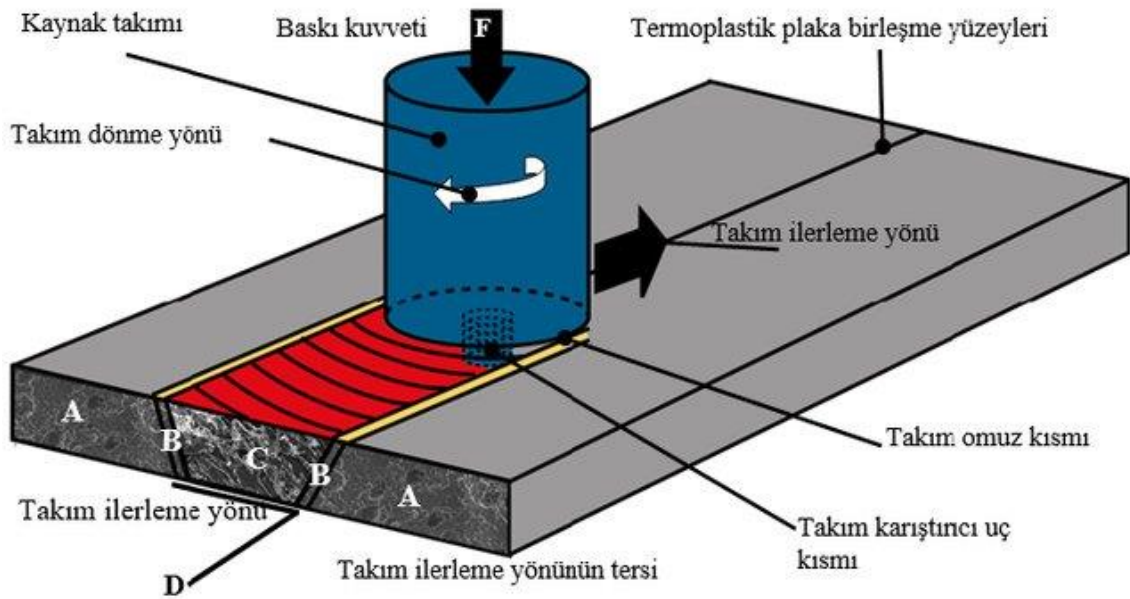
Ultrason kaynağında elastik histerezis, arakesit kayması ve plastik deformasyonun birlikte etkilemesiyle kaynak alanında bir sıcaklık artışı görülür. Birleşmenin mukavemeti ana metalinki ile benzerdir. Bu yöntemde sadece bir olumsuzluk meydana gelir, sadece ince parçalarda kullanılabilmektedir. Ultrason kaynağı büyük alanda, elektronik havacılık ve ölçü aletleri kontrol sanayilerinde uygulanır.



Şekil 3.4. Ultrasonik kaynak makinesi (url2)

3.1.1.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı, oldukça büyük kullanım alanına sahip ve değişik şekillerde kaynak yapmayı gerçekleştiren, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI), W. Thomas aracılığıyla bulunan ve günümüzde de büyütülmeye uğrayan bir katı hal kaynak yöntemine sürtünme karıştırma kaynağı denir. Son araştırmalarda TWI Enstitüsü'nde alüminyum ve alüminyum alaşımları amacıyla bu kaynak yöntemi ile meydana getirilecek uygulamalar üstünde farklı araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların sonuçlarında, bu tekniğin hem yaşlandırma sertleşmesi uygulanmış hem de yaşlandırma sertleşmesi uygulanmayan alüminyum ve alaşımlarında düzgün ve güvenli bağlantıların meydana geldiğini vurgulamıştır. Ayrıca bakır-bakır alaşımları, titanyum-titanyum alaşımları, kurşun-kurşun alaşımları, magnezyum-magnezyum alaşımları, metal matrisli alüminyum karışımlarında da bu tekniğin kullanılmasına geçilmiştir (Çam 2002). Bilindiği üzere sürtünme kaynağı özellikle silindirik kesite sahip malzemelerde kullanılan katı hal kaynak yöntemidir (Özsoy ve Kaluç 2002). Genellikle kaynak uygulaması güç olan alüminyum alaşımlarının meydana getirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı gücü değiştirilerek çalışmalar sanayinin dikkatini alüminyum alaşımları üstüne çekmiştir. Bu kaynak tekniği ile 1 mm'den az ve 35 mm'den kalın olan ve kaynaklanılamıyacağı tahmin edilen alüminyum alaşımlarına yapılmış bunun sonucunda oldukça düzgün mekanik özellikler meydana geldiği araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır (Özdemir 2003). Şekil 3.5'te sürtünme karıştırma kaynak yöntemi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.5. Sürtünme karıştırma kaynağının yöntemi (Karagöz ve Öksüz 2016)

Bu yöntemle gerçekleştirilen birleştirmelerde, oldukça iyi bir birleştirme direnci elde edilebildiği gibi, çok küçük bir malzeme değişmesi görülür. Bu kaynak türü alın altına birleştirilmiş iki alana büyük devirde dönen seviyeli bir karıştırıcı ucun batırılarak kaynak işlemi uygulanmak istenen uzunluk esnasında belirlenmiş bir hızda ilerletilmesinden oluşmaktadır (Özdemir 2003).

3.1.1.6. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme; maddelerin birbirine bağlı olarak hareketlerinden doğan kinetik enerji kayıpları olarak tanımlanabilir (Özdemir 2003). Sürtünmeye sebep olan birleşen iki cismin ara yüzeylerinde meydana gelen kuvvetlerdir. Bu kuvvetler yük ile birlikte birleşen malzemenin özellikleri ile temas alanı olarak gösterilir. Gerçek temas alanı cismin bilinen alanından çok daha azdır. Gerçek yüzey teması atomik düzeyde düzgün olmayabilir. İşlem uğramış tüm parçalar değişik bir yüzey şekline aittirler. Bu değişiklikler; işleme parçasının şekli, işlenen malzemenin mikro yapısı ile sistemdeki titreşimlerin neden olduğu dalgalı değişimlerdir. Sürtünme kuvveti; bir cisme birleştirilen cismin birbirleri üzerinde kaymasını sağlayan teğet halindeki yüzeysel kuvvet olarak tanımlanır. Sürtünme, yüzeylerinin bulunduğu düzlemde meydana gelir ve yüzeye dik meydana gelen kuvvetle orantılıdır. Sürtünme kuvvetinin formülü aşağıdaki gibi belirlenir.

$$F = \mu \cdot N \quad (3.2)$$

Burada;

F = Sürtünme kuvveti

μ = Sürtünme katsayısı

N = Yüzeye dik olan normal kuvvetini ifade etmektedir.

Geçmişte birçok çalışmacı sürtünmenin olumsuz tesirleri hakkında bilimsel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar esnasında bir sorun olarak görülen sürtünmenin, malzemelerin bir araya gelmesi için lazım olan bir enerji kaynağı olarak uygulanabileceği bulunmuştur. Sürtünme kaynağı hakkında temel araştırma 1891 senesinde Amerikalı makinist I.H. Bevington aracılığıyla yapılmıştır. Daha sonra araştırma hakkında 1924 yılında İngiltere ve Rusya, 1929 yılında Almanya araştırma yapmış ve patent kazanmıştır. Öncelikle boru ve plastiklerin kaynağında uygulanan sürtünme kaynağı 1956 yılında Rus bilimci A.J. Cbdicov iki metal silindiri birleştirmiştir. Sürtünme kaynağı hakkında bilimsel çalışmalar ise 1956 yılından sonra yapılmıştır. Yöntemin uygulama bölgelerinin artırılması konusunda çalışmalar sürmektedir. Bilhassa yeni ve ileri malzemelerin imal edilmesi ile bu malzemelerin olağan kaynak yöntemleri aracılığıyla birleştirilmesinden meydana gelen olumsuzluklar bu metot ile geniş bir araştırma alanı bulmuştur.

Sürtünme kaynağı (SK); biri durağan diğeri döner hareketli parçaların ara yüzeylerinde meydana getirilen sürtünme kuvveti ile mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesinin ardından ısıdan faydalanarak eksenel basınç ile ara yüzeyde plastik deformasyona sebep olarak gerçekleştirilen bir katı hal kaynak tekniğidir. Sürtünme kaynağında sürtünme zamanı süresince temas eden alanlar eksenel basınç kuvveti tesirindedir. Isıtma (sürtünme) fazı denilen süre bir araya gelme alanında plastik deformasyon sıcaklığına gelinceye dek sürer. Bu ısıda dönme hareketi ani frenleme aracılığıyla kesilir ve eksenel basınç hemen hemen iki misli yükseltilerek yığılma meydana getirilir. Genellikle bu şartlarda ara bölge erimez. Çünkü meydana gelen sıcaklık parçaların ergime sıcaklığından daha azdır. Bu kaynak yönteminde ek metal ile koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaz. Bu bir araya getirme metodu silindir kesitli malzemelerin birleştirilmesinde çok fazla kullanılır ve kaynak işlemi otomatik olarak da gerçekleştirilmektedir. Yöntem, silindirik olmayan malzemeler için de uygulanabilir. Alın kaynağı işlemlerinde malzemelerden birinin dönme simetrisine sahip

olması bu yöntem için gereklidir. Sürtünme kaynağı, malzemeler ve malzemelerin birleştirilmesiyle plastiklerin birleştirilmesi işlemleri için kullanılabilir. Sürtünme kuvveti, temas yüzeylerinin büyüklüğüne ve işleniş biçimine bağlı olmayıp yüzeye dik oklan yüküyle doğru orantılıdır (Ateş vd. 2007).

3.1.1.6.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması

Sürtünme kaynağı mekanizmaları birçok araştırmacı tarafından açıklanmaya çalışılmıştır. Sürtünme kaynağı genellikle aşağıdaki aşamalarda gerçekleştirilir.

İlk aşamada, aynı ekseninde malzemelerden biri sabit tutulup diğeri dairesel harekete sahip olacak şekilde bağlanır.

İkinci aşamada, iki malzemenin aksenal basınç kuvveti altında yüzey teması gerçekleştirilir.

Üçüncü aşamada, sürtünme işlemi ile ara yüzeyde plastik deformasyon ve şişme oluşturulur. Son aşamada ise dönme hareketi durdurularak, yığılma kuvveti uygulanır.

Midling, sürtünme kaynağında buna benzer bir şekilde üç basamakta tanımlanmıştır. Bu basamaklar;

Düşük aksenal basınç kuvveti ile yüzey değmesi ve sürtünme kuvvetiyle plastik deformasyonu gerçekleştirme. Aksenal basınç kuvvetini yükselterek kaynama bölgesinde lazım olan ısıyı bulma. Sürtünme hareketini durdurarak kaynayan bölgede yığılma oluşturmak, şeklinde özetlenmiştir.

Sürtünme kaynağında Darby, düzgün bir bağlantının gerçekleşmesi amacıyla bir mekanizma tanımlamaktadır;

- Sürtünme işlemi ile tüm oksit ve diğer katmanlar dağılarak yüzeyden atılır. Sürtünen yüzeyler arasındaki devamlı etki kaynak esnasında oksit filmlerinin oluşmasına izin vermez.
- Sürtünme kaynağı esnasında kaynak inklüzyonlarının çoğunluğu azaltılır.

- Bağlantı alanı, hızlı yerel ısıtma ve soğutmanın ardından yapılan yüksek basınç sebebi ile ince yapılı bir oluşuma sahip olur.
- Hızlı yerel ısıtma ile aynı zamanda bağlantıya birleşik relatif olarak fazla ısıtılmamış bölgelerin ısıyı yerel ısınmış bölgelerden hızla çekmesinin ardından çok az bir ITAB meydana gelir.

3.1.1.6.2. Sürtünme Kaynağı Çeşitleri

Sürtünme kaynağı, enerji kaynağına göre üç farklı yöntemle, hareket şekline göre ise beş farklı yöntem ile incelenir. Sürtünme kaynağının sınıflandırılması Şekil 3.6'da gösterilmiştir (Özdemir 2002).



Şekil 3.6. Sürtünme kaynağının sınıflandırılması (Kırık ve Özdemir 2012)

3.1.1.6.2.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu kaynak metodunda malzemelerden biri dairesel hareketi olan bir motor birimine bağlanılır, diğer malzeme aynı ekseninde tutulur. Motor önceden ayarlanan devirde döndürülür ve sabit malzemeye eksenel basınç kuvveti yapılarak bu parçaların yüzeyinde sürtünme gerçekleştirilir. Ara yüzeyde plastik deformasyona gerekli olan sıcaklığa gelinceye kadar işlem yapılır. Sonra, dönen malzeme ani frenleme ile durdurulduktan sonra

ara yüzeyde gerekli plastik deformasyon gerçekleştirmek amacıyla yığma basıncı yapılarak işlem bitirilir.

Sürtünme kaynağında bir erime alanının olmayışından dolayı, ısının etkisi altındaki alanın azlığı ile kaynağın etrafında plastik olarak deformasyona uğramış malzemenin varlığı en bilinen özelliklerini meydana getirir. Kaynak kalitesini oluşturan etmenler;

- Uygun malzeme seçimi
- Kaynak dizaynı
- Sürtünme süresi
- Sürtünme basınç kuvveti
- Devir sayısı
- Yığma basınç kuvveti
- Yığma süresi, gibi faktörlerle ilgilidir.

Hız, zaman ve basınç kuvveti tarzındaki kaynak değişkenlerinin büyük alanda uygulanması ile iyi bir kaynak gerçekleştirilebilir. Bu kaynak işlemi üç kademeyle gerçekleştirilmektedir.

- İlk sürtünme
- Isınma
- Yığma

1. Kademe; burada döndürme momenti hızlı bir şekilde artırılarak en üst düzeye ulaşılır ve kademe bitiminde düşer. Momentin hızlı yükselişi sonrasında yavaş yavaş azalışı, malzemelerin yüzeyindeki deformasyonların birleşmesine ile parçadan ayrılmasına sebep olur. Sürtünmeden dolayı oluşan ısı ara yüzeydeki malzemenin yumuşamasına neden olur.

2. Kademe; burada, moment sabit bırakılır. Parçalarda deformasyon yaşanması aracılığıyla ısı yumuşaması bir denge oluşturur. Malzemeler yığılınca dek ısınır.

3. Kademe; burada farklı olarak yığılma bulunur. Yığılma tahrik sisteminden uzaklaşıp frenlemelerinin başladığı zaman meydana gelir. Tahrik mili düzenlenen frenleme zamanı ile yavaşlar. Frenleme zamanı malzemenin cinsine bağlıdır. Fren birden yapılırsa, moment

birden azalır buna bağılı olarak yığılma oluşur. Eksenel kuvvet sabit kaldığında, frenleme zamanının uzatılması, yavaşlama hızını azaltarak yükleme değeri yükseltir. Eğer bu evrede eksenel kuvvet yükseltirirse, frenleme zamanı azalır. Fakat uygulanan kuvvet daha fazla olduğundan en yüksek olan değeri büyümeye devam eder. Sürtünmenin yükselmesi burulmalı yığılmayı yükseltir. Bu aşama, tahrik mili durdurduktan süre sonra işlem biter. Basma ve yığılma zamanı da diğeri bir değişken olarak bilinebilir (Ananthapadmanaban et al. 2009).

Yığılma kademesi, kaynak çevriminde daha yüksek olan basınç uygulandığında meydana gelir. Bu nedenle yığılma kademesi aslında durma aşamasının başlangıcından itibaren meydana gelir. Kuvvet, özellikle ya ayna frenlendiği anda ya da ayna durduğunda, yani durma aşamasının sonunda yükseltilir. Bu iki uygulama arasındaki farklılık ilkinde, sürtünmede bir artışın gözlemlenmesidir. İlk uygulamada ayna yavaşlatıldığında kuvvet yükseltilir, döndürme momenti sıfıra inmeden önce ikinci bir maksimum değere yetişir. Bu durum, bir burulma kuvveti meydana getirir. Diğeri uygulamada, yani kuvvetin durdurma sonunda artırıldığı safhada, hızlı frenleme nedeniyle durdurma safhasının çok hızlı olması durumunda sürtünme kuvveti yükselmez. Ancak, yığılma aşamasının ilerlemesiyle azalmaya geçer. Bu halde burulma kuvveti meydana gelmez ve yığılma sadece baskı kuvvetinden etkisi altında kalır (Welding Handbook 1980).

3.1.1.6.2.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Parametrelerinin Belirlemesi

Bu metotta işlem değişkenleri aslen karbonlu çelikler üstünde denenmiştir. Tablo 3.1’de sürtünme kaynağında, kontrolü yapılan önemli değerler yer almaktadır. Yöntem üstünde en etkin ve optimizasyonu gerekli değişkenler;

- Çevresel hız
- Sürtünme basınç kuvveti
- Sürtünme süresi
- Yığılma basınç kuvveti
- Yığılma süresidir.

Bunlardan farklı olarak parça şekli, parçanın ısı kapasitesi, parçanın plastik şekil değiştirme özelliği ile parça boyundaki azalma oranı değişkenler değerlidir.

Tablo 3.1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında farklı malzemeler için önerilen kaynak değişkenlerinin değerleri (Dinç 2006)

Malzeme	Çap (mm)	Yüzeye Bağlı		Sürtünme süresi (sn)	Yığılma süresi (sn)	Çevresel hız (sn)
		Sürtünme basınç kuvveti (N/mm ²)	Yığılma basınç kuvveti (N/mm ²)			
Alaşımsız ve Düşük Alaşımlı Çelikler	20	20-80	80-200	3-6	2-10	0,5-5
Yüksek Alaşımlı Çelikler	20	40-100	120-400	6-10	2-10	0,5-5
Yüksek sıcaklığa Dayanıklı Alaşımlar	20	60-180	180-600	5-10	2-15	0,5-5
Hafif ve Ağır Metaller	20	10-80	20-150	1-8	2-5	0,5-4

Bu metotta kaynak basınçları ve tahrik milinin hızı bulunur.

$$V_t = [(X.S)/(\pi.D_d)] \quad (3.3)$$

Burada:

V_t: Tahrik mili hızı (d/d)

X:1000 (çevrim katsayısı)

S: Yüzey hızı (m/dak)

D_d : Parçanın dış çapı (m)

Bu formülde yüzey hızı 76-182 (m/dak) ortalarında değişkenlik gösterir. Boruların kaynağında bu değerin biraz daha fazla olması gerekir.

3.1.1.6.2.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu kaynak yöntemi, atalet kaynağı olarakta bilinmektedir. Volan tahrikli sürtünme kaynağının çalışma prensibi sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile aynı sisteme sahiptir. Sadece burada dönen parçaya bağlanan mil bir volana bağlanmıştır. Volan istenilen bir hıza ivmelendirilir. Sonuçta dönme enerjisinden elde edilen kinetik enerji volan üzerinde birikmiş olur. Tahrik motoru ile dönen malzeme arasındaki bağlantı koparıldığında volan üzerinde oluşan enerji bitene kadar sürtünme kaynağı gerçekleştirilir.

Kaynak kuvveti eksenel olarak yapıldığında dönmesi serbest bırakılan parça diğer parça ile beraber döner. Bu arada volan enerjisi parça ara yüzeyinde sürtünmey için kullanılır. Volan hızı düşerken kaynak bölgesi ısınır ve bu ısı geniş alana yayılır. Volan büsbütün durduktan sonra basınç etkisi oluşturulur. Bu kaynak yöntemiyle bazı kaynak yöntemlerinden ısı daha az yayılabilir.

3.1.1.6.2.2.1. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı Değişkenleri

Volan tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi üç adımda oluşur.

- Birinci adım: İlk sürtünme
- İkinci adım: Isınma
- Üçüncü adım: Yığılma

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının tersine kaynak değişkenleri ilkin tespit edilmez. Fakat volana verilen çevresel hız etkisiyle farklı kaynak değişkenleri bulunur. Eğer ikinci ile üçüncü adımdaki eksenel kuvvetler farklılaşırsa, işleme iki kademeli kaynak, kuvvetlere de ısıtma ile basma kuvveti olarak adlandırılır. Diğer taraftan kuvvet tüm işlem esnasında sabit kalıyorsa, böyle sürtünme kaynağına da “tek kademeli kaynak” denir. Volan tahrikli sürtünme kaynağında volan, kaynağa ısı gelmesini bulur. Volanın atalet momenti, büyük bir değişken olup başka volanlar eklenip çıkarılarak çevresel hızı belirlenebilir. Volanda biriken enerji oranı volanın hızıyla ilgilidir.

Volan mili belirlenen hıza geldiğinde tahrik sistemi çıkar ve volan ataletiyle dönmeyi sürdürür. Daha sonra eksenel bir kuvvet tesir ettirilir böylece bu kuvvet kaynak boyunca sabit tutulmaya çalışılır. Yapılan eksenel basınç, dönme hızının düşmesine sebep olur. Bazı vaziyetlerde malzeme durduğunda ya da durmaya başladığında eksenel basınç kuvveti hemen hemen iki kat yükselttilerek yığma basınç kuvveti olarak yapılabilir.

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile volan tahrikli sürtünme kaynağı arasındaki en büyük fark, sürtünme hızlarıdır. Volan tahrikli sürtünme kaynağında sürtünme hızı sürtünme safhasında devamlı düşerken, sürekli tahrikli metotta sürtünme hızı sabit durur. Sürtünen yüzeylerde parçaların plastik deformasyonu sonucunda oluşan ısı, yığma safhasında ara yüzeydeki sıcaklığın hızlı olarak azalmasını önler.

Volan tahrikli sürtünme kaynağının özelliklerini düzenleyen işlem parametreleri; volan çapı, volan hızı ve eksenel basınç üçlüsüdür. Volan tahrikli sürtünme kaynağında, çalışan volan, kaynak enerjisini tedarik eder. Kaynak basıncının yapılması evresinde tahrik mili yavaşlar. Ataletin artması, kaynak çevirim zamanını arttırır. Ayrıca, verilen enerji sabit bırakıldığında, yüzey hızı küçültülüp, daha geniş volanlar kullanılarak yığma yükseltilebilir. Kasnağa olanak sağlayacak enerjinin hesabı;

- Yüzey hızı
- Malzeme cinsi
- Bağlantı geometrisine göre değişir.

Karbonlu çeliklerin volan tahrikli sürtünme kaynağında, tur başına düşen volan enerjisi:

$$E = 2\pi nI/e \text{ denklemi ile bulunur.} \quad (3.4)$$

Burada:

E = Enerji (j),

$I = \pi r^2$

Atalet momenti (kg.m^2),

n : Volan devri (d/d),

e : Bir dönüşüm katsayısı olup değeri 182,4'tür.

wk^2 ifadesinde,

w: Volanın ağırlığı,

k^2 : Ağırlık merkezlerinin dış eksene olan mesafesinin karesidir.

Yığma basıncı, kaynak basıncının 1.5-4 katıdır. Asıl değeri sadece deneyerek belirlenebilir. ITAB' nın şekli üstünde kaynak basıncının tesiri ve yüzey hızının tesiri bir birinin tersidir. Kısacası az kaynak basınçları ile bulunan ITAB yüksek yüzey hızları ile bulunanlara benzer. Volan tahrikli sürtünme kaynağında değişkenler aşağıdaki gibi bulunabilir;

1. Volan hızı seçilir (d/d).
2. Gerekli enerji seviyesi (E-r) için ihtiyaç duyulan toplam momenti (Wk^2) bulunur.
3. Kaynak makinesi üzerindeki en yakın mümkün toplam atalet momenti (Wk^2).
4. Toplam atalet momenti (Wk^2) ile gerekli devir (d/d) yeniden hesaplanır.

3.1.1.6.2.3. Hibrit Sürtünme Kaynağı (Kombine Sürtünme Kaynağı)

İki kaynak yönteminin birlikte uygulandığı kaynak çeşididir. Kaynak yöntemi sürtünme ile yığma aşamalarından oluşturmaktadır. Gerek atalet gerekse sürtünme kaynağı amacıyla moment çizgilerinin değişimi işlemin tanımlanması için büyük önem arz etmektedir. İşlemin girişinde kuru sürtünme yapılır ve yapılan sürtünmenin tesiriyle moment eğrisi maksimuma ulaştıktan sonra dengede durur. Bu uygulama boyunca oksit tabakalarının bölünmesinin ardından yalın yüzeyde temaslar esnasında güçlü atomsal bağlar meydana gelir. Sürtünme işlemi aracılığıyla meydana gelen bağlar ayrılmaya çalışılır. Sonuçta bu temas yerlerinde yüksek adhezyon kuvvetleri meydana gelir, moment yükselir ve sıcaklık beklenen seviyeye gelir. Frenlemeden sonra hız düşerken moment de sıfıra iner (Lee et al. 2004; Li et al. 2008). Tasarlanan sürtünme kaynağı cihazları torna, matkap benzeri metal işleme makinelerine benzemektedir bununla birlikte başlangıçtaki sürtünme kaynağı makineleri bu tezgâhların değiştirilmiş halidir. Sürtünme kaynağı, ana gövde bağlama elemanları, dönme ve yığma parçaları, fren sistemi, güç ünitesi, kontrol üniteleri ve kumanda tablosu bölümlerinden meydana gelmektedir. Sürtünme kaynağı makineleri tam mekanik makineleridir. Parçaların bağlanması, çözülmesi ile meydana gelen çapakların temizlenmesi otomotik yapılabilir. Öğrenildiği üzere sürtünme kaynağının temel etmenleri parçaların bağlanması ile sıkıştırılmasında, basınç tesirinde dönme ve sürtünme, frenleme,

yığıma için gerekli sürelerin hassas olarak düzenlenmesidir. Numune bağlama elemanları gerekli sertliğe uygun olmalı, üstüne gelecek momentleri kaldırabilmeli, radyal kaçıklıklar ve titreşimler, gerekli incelemeler ve araştırmalar yapılarak sönmölenecek durumda makine yapılmalıdır (Yılbaş vd. 1995). Titreşimler dışında meydana gelecek radyal ve eksenel kuvvetler nedeniyle parçaların sabitlemesi ve eksenel kaçıklıkların önlenmesi zordur. Bu sebeple bağlama malzemelerinin parçaları gerekli oranda sıkıştırarak düzeni sağlamalıdır. Bu işlem için genellikle V şekilli iki çene veya özel çeneler uygulanır. Kaynak malzemelerini tutmak için uygulanan tüm sabitleme elemanları güvenilir olmalıdır. Bağlantı olacak malzemelerde meydana gelebilecek küçük bir kayma hem kaynak bağlantısına ve hem de frenleme sisteminin tahrip edilmesine sebep olur. Uygulamaların genelinde otomatik olarak merkezleyen frenleme araçları kullanılır (Bahrani and Grossland 1976).

3.1.1.6.3. Sürtünme Kaynak Değişkenleri

Sürtünme kaynağında farklı kaynak değişkenleri bulunur. Bunların kontrolünün olağan şekilde gerçekleşmesi kaynağın değerini yükseltir. Sürtünme kaynağıyla ilgili değişkenler;

1. Dönme hızı (çevresel hız)
2. Eksenel sürtünme basınç kuvveti
3. Sürtünme süresi
4. Yığıma süresi
5. Yığıma basınç kuvveti
6. Frenleme' dir.

Kaynak değişkenleri malzemenin türüne, kaynak alanının ebatına ve bağlantının değerine göre değişkenlik gösterir. Bunlardan farklı olarak malzeme şekli, malzemenin ısı kapasitesi, malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyeti ile numunenin uzunluğundaki kısalma oranı gibi değişkenler de gereklidir.

3.1.1.6.4. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti

Demir ile diğer metal malzemeler sürtünme kaynağı vasıtasıyla kaynak yapılabilir. Bunun dışında sürtünme kaynağı, öteki kaynak işlemleri aracılığıyla kaynak yapılamayan diğer ısı ve mekanik özellikleri olan malzemelerin birleştirilmesinde uygulanabilir. Ergime sıcaklığı etkisindeki sıcaklıklar ile düşük kaynak zamanı sürtünme kaynağına bu yetkiyi sunmaktadır. Değişik ısı ve mekanik özellikleri olan metallerin sürtünme kaynağı düzgün olmayan deformasyon oranına sebep olur. Büyük bir kaynak direnci ise relatif olarak düzgün plastik deformasyon sağlayan değişik parçaların kaynaklanmasında bulunabilir. Sürtünme kaynağında işlenebilen düzgün kuru sürtünme değerleri olmayan tüm malzemeler rahatlıkla kaynak yapılabilir. Kuru yağlama yapan alaşım elementleri bağlantı alanlarının kaynak ısısına yetişmesini önler. Demir temelli parçalar, yumuşak çelikten, yüksek alaşımlı çeliklere kadar kaynak yapılabilir. Yumuşak çelikler relatif olarak hızlı birleşmekle birlikte büyük bir değişen aralığı mevcuttur. HSS cinsi yüksek alaşımlı çelikler de küçük değişen aralığında ve daha büyük eksenel kuvvetlerde birleştirilebilir. Bunların, tokluğu ile çatlak hassasiyeti bilinen husustur, malzemelerde meydana gelen çapaklar kesinlikle temizlenmelidir. Çünkü bu çapaklar çatlak başlangıcı için müsaittir (Yılmaz 1993).

Kaynaklanacak parçaların yüzeyleri hazırlanırken aşağıdaki unsurlara dikkat edilmelidir (Şahin 2001).

- Sürtünmenin önüne geçecek veya küçültecek, kav, hadde ve döküm katmanları, kalın oksit katmanları, çekme veya dövme prosesi tozları, yağlama elemanları, kaplama katmanları gibi unsurlar kaynak alanlarından temizlenmelidir. Kaynaklı malzemede seyrek bir küçülme varsa yağ, gres, boya, ince pas katmanı da temizlenmelidir.
- Ağız kısmındaki su verilmiş sert katmanlar da yumuşatma tavlama ile düzeltilmelidir ya da bu katman kaynak prosesi esnasında düzeltilebilecek şekilde ince olmasına dikkat edilmelidir.
- Malzeme birleşmelerinde kaynağın türü malzemenin kendi şartlarına göre düzgün yapılmalıdır.

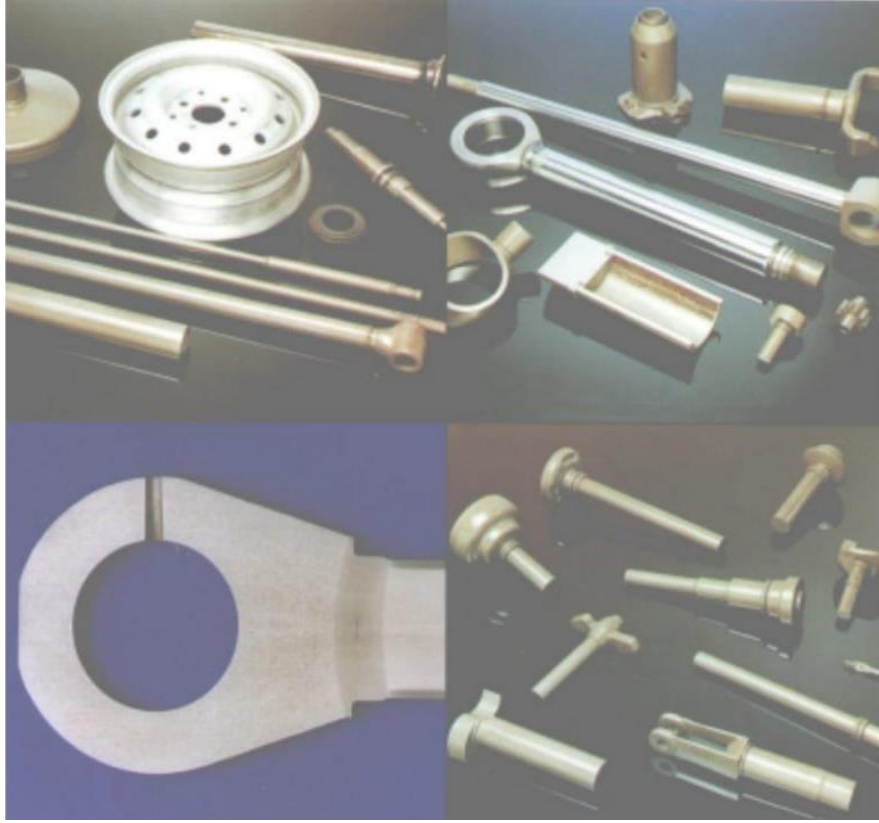
- Malzeme birleşimlerinde diğer deformasyon yeteneklerinin dengelenmesi amacıyla, sıcakta yüksek dirençli parçalara bir ön tavlamaya yapılmalıdır.

3.1.1.6.5. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları

Bulduğumuz dönemde sürtünme kaynağı birden fazla farklı endüstride büyük bir kullanım alanına sahiptir. Aşağıda, sürtünme kaynağının kullanım yerlerine ait örnekler gösterilmiştir (Kuruzar 1979).

- Makine İmalatı: Dişli çarklar, hidrolik silindirler, krank milleri, radyal pompa pistonları ve piston kolları, iğler, sonsuz vidalı miller, matkap uçları, piston kolları.
- Otomotiv Endüstrisi: Aks köprüleri, egzoz supapları, kardan milleri, vites kolları, sürekli fren milleri, türbo doldurucular, şanzıman parçaları, ön yanma odaları, boru miller, taşıyıcı aks boruları ve supaplar.
- İş Takım Endüstrisi: Spiral matkaplar, freze bıçakları, delik zımbaları, çelik kalemler (murçlar), raybalar.
- Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi: Gaz analizleri için alıcı kameraları, kromatograflar için ayırma sütunları, röntgen cihazı tüpleri için döner anot milleri, sürekli lehim uçları, devre kontakları, geçiş parçaları, cihazlar ve borular, flanşlar, fittingler, supap yuvaları, boru tesisatı bağlantıları.

Aşağıda sürtünme kaynağı aracılığıyla imal edilmiş farklı parçaların örnekleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Sürtünme kaynaklı parçalar (Çil 2009)

3.1.1.6.6. Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

- Sürtünme kaynağı işlemi boyunca ısıtılan metal oranı daha düşüktür.
- Sürtünme kaynağında ısıtma ile dövme dönemleri arasında metal kaybı düşüktür.
- Sürtünme kaynağında işlem temizdir.
- Sürtünme kaynağı çok az sürede gerçekleştirilir.
- Sürtünme kaynağı otomatik proseslere uyarlanabilir (malzemelerin otomatik yüklenmesi, boşaltılması, farklı operasyonlara transfer gibi).
- Ayrıca sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan kaynak alanında cüruf vb. bulunmaz.
- Sürtünme hareketi sayesinde tüm oksit ile diğer katmanlar parçalanarak yüzeyden atılır ve sürtünen alanlar arasındaki sürekli temas kaynak esnasında oksit filmlerinin meydana gelmesine izin vermez.
- Sürtünme kaynağı esnasında kaynak curuflarının fazla bir bölümü ortadan kaldırılır.

- Bağlantı kısmı, hızlı yerel ısıtma ile soğutma sonrası yapılan yüksek basınç sebebi ile ince taneli bir yapıya aittir.
- Hızlı yerel ısıtma ve ayrıca bağlantıya birleşik olan relatif olarak geniş ısıtılmamış kısımla, yerel ısınmış kısımlardan hızla ısının çekilmesi neticesinde çok az bir ITAB meydana gelir.

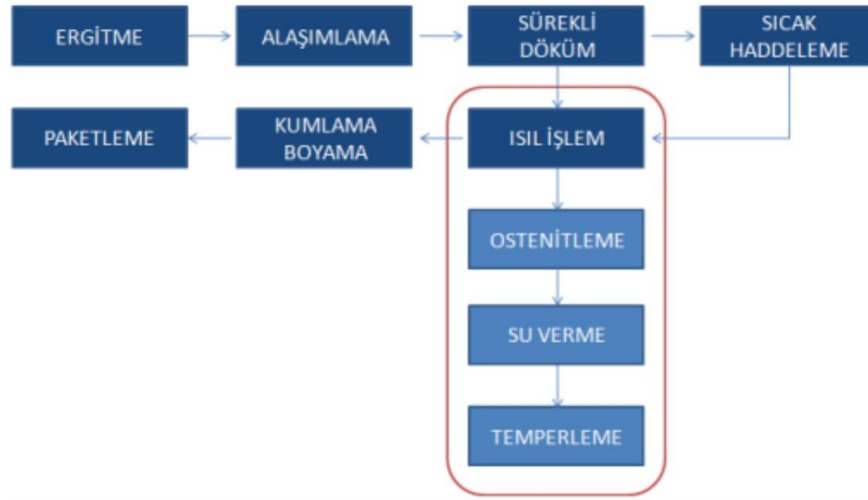
Tüm bu avantajlarının dışında sürtünme kaynağının birkaç dezavantajlı yönleri de bulunmaktadır. Sürtünme kaynağını azaltan en büyük parametre parçanın geometrik şekildir. Aslında bugünlerde hususi işlemler bulunmuşsa da bağlantısı gerçekleştirilecek parçalardan birinin bir eksene göre simetrik olması ve çoğu kez bir eksen çevresinde dönebilir olması gerekir. Sürtünme kaynağını azaltan farklı büyük bir tesir ise “kesit alanıdır”. Kesit alanının çok geniş olması, motor gücünün ile yığılma basıncının verilerinin çok büyük olmasına sebep olur (Şahin 2001).

3.2. Zırh Çelikleri

Zırh çelikleri, farklı özellikli kurşunların birden fazla darbesine karşı çatlamaya, parçacıkların kopmasına ve kırılmaya mukavemet uygulaması sebebiyle imal edilmektedir. Hem sivil hem de askeri amaçlı imal edilen zırh çelikleri kara, hava ile deniz arabalarında bulunmaktadır. Darbe yükünü meydana getiren kurşunların geometrik ile mekanik özelliklerine göre farklılaşan zırh çelikleri, farklı birleşim ve mekanik özellikler gösterir. Genellikle tank gibi savunma arabalarında değerlendirilen zırh çelikleri, güçlü direnç, uygun kaynak edilebilirlik ve az imal fiyatları nedeniyle, alüminyum alaşımları, seramik, cam ile elyaf takviyeli kompozit malzemelere kıyasla oldukça fazla kullanılırlar (Karagöz vd. 2007).

Etkili miktarda patlayıcı ve parçalayıcı özellikleri olan kurşunlara karşı zırh çeliklerinin iyi özellikte düzgün bir mikroyapı karakterine ait olmaları gerekmektedir. Kompozisyon bakımından alaşımlı çelik grubuna dahildirler. Sertlik ve tokluk değerlerinin oluşması nedeniyle östenitleme-su verme ile temperleme ısı prosedürlerini uygulayarak martenzitik bir mikroyapı oluşturulur (Karagöz vd. 2007).

3.2.1. Zırh Çeliklerinin Üretimi



Şekil 3.8. Zırh çeliği imalatının genel işlemleri (Merzalı 2013)

Şekil 3.8’ de de görüldüğü üzere, zırh çeliği imalinde ergitmeden sonra alaşımla yapılarak devamlı döküm işleminde, döküm prosesi gerçekleştirilir. Devamlı döküm prosesinden sonra çelik sıcak haddeme uygulanırsa, haddelenmiş düzgün yapıdaki zırh çeliği diye isimlendirilir. Sıcak haddeme aşaması bulunmayan zırh çelikleri ise büyük sertlikte olup zırh çelikleri olarak isimlendirilir. Bahsedilen iki zırh çeliği de östenitleme-su verme ile temperleme ısıl prosesleri uygulanarak martenzitik mikroyapı elde edilir (Merzalı 2013).

Bazik oksijen fırınlarında ergitilmiş olan esas alaşım elementleri Cr, Ni ile Mo eklenerek alaşımlandırılma uygulanır. Devamlı dökümde slab şeklinde sertleşen yapı ısıl proses sonrası yapılması arzulanan şekillerde sıcak haddeme yapılır. Östenitleme sıcaklığı zırh çelikleri için genellikle 900-950 C° arasında gerçekleştirilir (Karagöz vd. 2007). Bunun sonucunda çelik matrisi gerek karbonca gerekse yapıda var olan karbür meydana getirici elementler ile doyurulur. Sonunda parçalar kumlanıp boyandıktan sonra hazır hale gelirler.

3.2.2. Zırh Çeliklerinin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri

Zırh çeliklerinin penetrasyona karşı mukavemet göstermesi amacıyla büyük sertlik ve dirençlerinin olması istenilir. Ama 600 vickers sertliğin üstünde, sac malzemeye gelen darbe esnasında gevrek kırılmayla karşılaşacaktır. Balistik darbelere karşı mukavemet büyük toklukla temin edilir. Bunun dışında kesme, kaynaklanabilirlik ve şekillendirilebilme gibi üretim zorluklarının en azda kalabilmesi de oldukça gereklidir. Zırh çeliklerinin söz konusu kabiliyetlerinin alınabilmesi için kimyasal kompozisyon ile ısıtılma proses koşulları oldukça değerlidir.

Zırh çelikleri amerikan değerlerine göre gruplandırıldığında MIL kodu verilmektedir. Mars ise fransız askeri standardındaki bilinmektedir. Zırh çelikleri özellikle az karbon oranları vardır. Kaynaklanabilenler tarafından %3 karbon özelliği büyük bir limittir. Zira %3'den fazla ise malzemenin kaynak sonrası tokluksertlik optimizasyonunu kötü tesir ettiği gibi kaynaklanabilirlik özelliği azalmaktadır. Molibden oranı %0,3-0,7 ortasında olmaktadır. Malzemede tane büyümesini engellediği gibi, tane sınırlarında karbür çökelmelerini durdurarak kırılmanın önüne geçer. Molibden, vanadium, titanium, niobium alaşım elementlerinde tane küçültme tesiri vardır.

Tablo 3.2. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri (Merzalı 2013)

Kimyasal Bileşim (%)	MIL A 12560 (Mars 190)	MIL A 46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH 129	Armox 440 T
Karbon	<0.30	<0.30	0.37 maks.	0.45-0.55	0.26-0.32	0.21
Mangan	1.20	0.95	0.90	0.3-0.7	0.1-0.4	1.2
Kükürt	0.005	0.005	0.005	0.005	<0.01	0.01
Fosfor	0.012	0.012	0.012	0.012	<0.015	0.01
Silisyum	0.2-0.4	0.2-0.4	0.2-0.4	0.6-1.0	0.1-0.4	0.1-0.5
Nikel	1.80 maks.	1.85 maks.	3.00 min.	4.5maks.	-	2.5
Krom	1.0	1.6	1.90 maks.	0.4 maks.	1.0-1.5	1.0
Molibden	0.3-0.5	0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.1-0.5	0.7

Tablo 3.2’de zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri gösterilmiştir. Halen işlenen MIL A 12560 zırh çeliği birden fazla işlemde uygulama alanı bulmaktadır. Büyük sertliği olan MIL A 46100 çeliğide balistik korumanın MIL A 12560’a göre %20 daha tesirli geldiği bir zırh çeliğidir. Tabloda gösterilen esas alaşım elementlerinin dışında böyle çelikler, vanadium, titanium, niobium ile bor gibi mikro alaşım elementlerine de içerir (Merzalı 2013).

Tablo 3.3. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Karagöz vd. 2007)

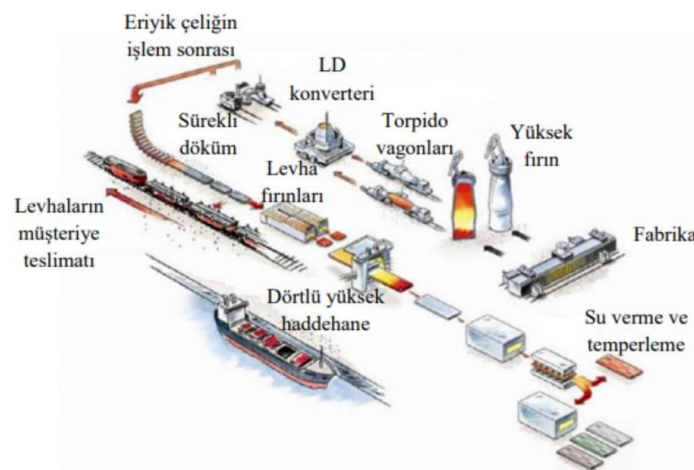
Özellik	MIL A 12560 (Mars 190)	MIL A 46100 (Mars 240)	MIL 46173 (Mars 270)	Mars 300	XH 129	Armox 440 T
Sertlik(HV)	290-407	503-560	503-631	607-720	420-559	443-506
$\sigma_{çekme}$ (MPa)	1150	>1100	>1100	>1300	1200-1300	>1100
$\sigma_{çekme}$ (MPa)	1250	>1600	>1700	>2000	1375-1600	>1300-1500
Uzama (%)	>10	>9	>8	>6	9-10	>10
Tokluk -40C°J/mm ²	20-30	30-40	30	15	14-16	30

Tablo 3.3’te gösterilen zırh çeliklerinin baştan üç tanesi düşük karbonlu çeliklerdir. Bu çeliklerin kimyasal birleşmesinde görülen en yüksek karbon miktarı %0.3 dolayındadır. Daha az aşamalarındaki karbon oranı, tokluk ile kaynak edilebilirlik bakımından daha

yararlıdır. Düşük karbon miktarı darbe dayanımı bakımından da çok fazla değerlidir. Bunların dışında çelik yapısında var olan alaşım elementleri kaynak yapılabirliği büyük derecede tesir etmektedir. Karbon oranı büyüdükçe kaynak alanında çatlak meydana gelme oranı yükselir. Bu çeşit çatlaklar kaynak sonrası yapıyı kötü etkilediğinden dolayı diğer proseslerle malzeme değerleri düzeltilir. Ama uygulanacak diğer işlemler, ek ücretlere de sebep olacağından kendisinde getireceğinden düşük karbon miktarı kaynaklanabilirlik ile tokluk durumundan lüzumludur. Bu iki özellik zırh çeliklerinin tesirli olarak uygulanmasında etkileyici bir önemi vardır. Büyük sertlik ile akma dayanımı olan MIL-46173 (Mars 170) ve Mars 300 zırh çelikleri genellikle zırhlı araçlarında tercih edilmektedir (Karagöz vd. 2007).

3.2.2.1. ARMOX Zırh Çelikleri

Askeri ile sivil alanda genellikle uygulanan bu zırh çelikleri, 300 HBW- 600 HBW'ye (ultra sert) kadar sertlik değerleri bulunmaktadır. Armox zırh çelikleri, yüksek fırın, LD (LinzDonawitz) konverterde çelik deoksidasyonu ile vakum işlemi aracılığıyla demir madeni bazlı metalürji metotları aracılığıyla imal edilmektedir. Modern dörtlü güçlü haddehane ile plaka kalınlığında yüksek miktarda düşme yapılarak ince taneli içyapı üretilir. Çeliğe son değerlerini vermek amacıyla sertlik/tokluk ihtiyaçlarına göre farklı ısıt işlemler yapılır.



Şekil 3.9. SSAB’de Armox çelik plakalarının imalat hattı (Bekçi 2019)

3.2.2.2. Ramor Zırh Çelikleri

Bu tez çalışması boyunca kullanılan Ramor zırh çelikleri Armox ürün grubu içerisinde bulunmaktadır. Bu sınıf, Ramor 300, Ramor 400, Ramor 450, Ramor 500, Ramor 550 ve Ramor 600 çeşitlerinden meydana gelmektedir. Zırh çeliklerinin adlarında bulunan sayılar HBW türünden sertlik ölçütlerini gösterir. Ramor zırh çelikleri genellikle;

- Kapılar, pencere çerçeveleri, duvarlar
- Banka sayaçları ve kasalar fabrika yüksek fırın torpido vagonları LD konverteri eriyik çeliğin işlem sonrası sürekli döküm levha fırınları dörtlü yüksek haddehane su verme ve temperleme levhaların müşteriye teslimatı
- Döviz büroları
- Otomobiller, güvenlik kamyonetleri
- Güvenlik konteynerleri
- Atış poligonu cihazları
- Askeri araç ve ekipmanlar
- Gemiler gibi yapılarda bulunmaktadır (Bekçi 2019).

Tablo 3.4’da Ramor zırh çeliklerinin ağırlıkça en yüksek kimyasal oran bileşimleri verilmiştir. Tablo 3.5’de ise Ramor zırh çeliklerinin mekanik özellikleri bulunmaktadır.

Tablo 1.4. Ramor zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu (% max ağırlık) (Bekçi 2019)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Ramor 300	0,20	0,50	2,00	0,030	0,010	0,80	-	0,30	0,005
Ramor 400	0,20	0,70	1,50	0,020	0,010	1,00	0,50	0,50	0,005
Ramor 450	0,25	0,70	1,50	0,015	0,010	1,00	2,00	0,70	0,005
Ramor 500	0,35	0,70	1,50	0,015	0,010	1,00	2,00	0,70	0,005
Ramor 550	0,36	0,70	1,50	0,015	0,010	1,50	2,50	0,80	0,005
Ramor 600	0,40	0,70	1,50	0,015	0,010	1,00	2,50	0,80	0,005

Tablo 3.5. Ramor zırh çeliklerinin mekanik özellikleri (Bekçi 2019)

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HBW)	Charpy-V Çentik Darbe Enerjisi (ISO EN 148)
Ramor 300	820	940	8	290	60 J/-40°C
Ramor 400	1100	1300	8	410	20 J/-40°C
Ramor 450	1200	1400	10	440	35 J/-40°C
Ramor 500	1450	1700	7	520	20 J/-40°C
Ramor 550	1550	1850	7	570	16 J/-40°C
Ramor 600	1650	2000	7	600	12 J/-40°C

Şekil 3.10'da araç zırhlama çalışmasında, araç tabanında Ramor 300, Ramor 400 ve Ramor 450 zırh çelikleri ile yapılmıştır. Bu zırh çelikleri, yüksek toklukları sebebiyle patlama sonrası meydana gelen büyük basınca dayanım gösterebilmektedir. Yolcu alanında ise, Ramor 500, Ramor 550 ve Ramor 600 zırh çelikleri kullanılmıştır. Bunun nedeni ise, bu zırh çeliği türlerinin büyük dayanım ile sertliklerinden dolayı kinetik enerji mermilerine karşı daha büyük mukavemet uygulayabilmeleridir.



Şekil 3.10. Ramor zırh çeliklerinin araç üzerinde kullanımı (Bekçi 2019)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Amaç

Farklı özelliklere sahip metalik malzemeleri ergitme kaynak metotları ile birleştirmek bazı olumsuz sonuçlar meydana getirmektedir. Özellikle zırh görevi gören Ramor çeliklerinin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri durumunda kaynak bölgesi ve ITAB’da zırh özelliklerini kaybedebilmektedirler. Bu amaçla savunma sanayisinde farklı türleri bulunan ve birçok zırhlı araçta kullanılan Ramor 500 ile kaynak kabiliyeti iyi olan AISI 1020 çeliği üstün avantajlar sağlayan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelere çekme ve yorulma testleri uygulanarak hasar ve kırılma mekanizmaları incelenmiştir. Ayrıca işlem parametreleri optimize edilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda elde edilen bilgiler literatürle kıyaslanarak üretim parametrelerinin birleşme kalitesine olan etkilerinin ve zırh çeliğinde kaynak sonrasında meydana gelen olumsuzlukların belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.2. Kaynak Öncesi İşlemler

4.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Kaynak işleminde kullanılan AISI 1020 çeliği ve Ramor 500 çeliklerini çubuklar halinde ticari olarak temin etmektir.

Tablo:4.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

MALZEME	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	B
AISI 1020	0,207	0,441	0,102	0,007	0,006	0,095	0,019	0,078	0,017	0,1	-
Ramor 500	0,35	1,50	0,70	0,015	0,010	1,00	0,70	2,00	-	-	0,005

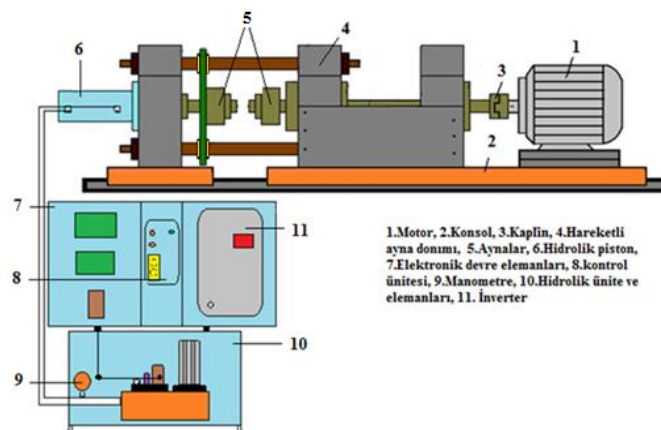
4.2.2. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması

Kaynak işleminden önce, ticari olarak elde edilen malzemeler çubuk haline getirildikten sonra standart AISI 1020 ve Ramor 500 çelikleri torna ve şerit testere ile soğutma sıvısı kullanarak $\varnothing 12 \times 72$ mm ebatlarında kesilecektir. Kesilen numuneler, birleştirilmek için eşleştirilen alın yüzeyleri; kir, pas ve oksit tabakasından arındırmak için torna tezgâhında ve asetonla yıkanacaktır.

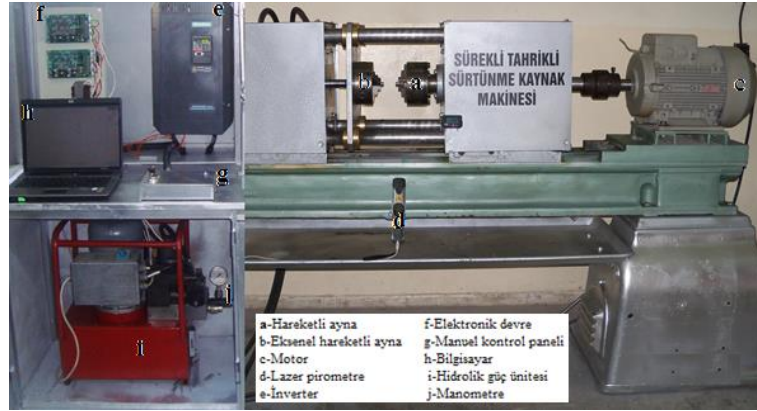
4.3. Deney Çalışmalarında Kullanılacak Sürtünme Kaynak Makinesi ve Donanımı

Sürtünme kaynaklarını yapabilmek amacıyla Elâzığ Fırat Üniversitesinde bulunan PLC kontrollü bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi kullanılmıştır.

Sürtünme kaynaklarını yapabilmek için Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de şematik resmi ve fotoğrafı gösterilen sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi, kullanılmış bir torna tezgâhı üzerine KIRIK ve ÖZDEMİR tarafından tasarım ile imalatı yapılan sürtünme kaynak makinesi parçaları takılarak, PLC kontrollü bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi üretimi yapılmıştır. Bu kaynak makinesi sistemi beş ana parçadan meydana gelmektedir. Bunlar; dönerli ayna, eksenel hareketli ayna, hidrolik güç ünitesi, ısı detektörü ve elektronik kumanda ünitesidir (Kırık ve Özdemir 2012).



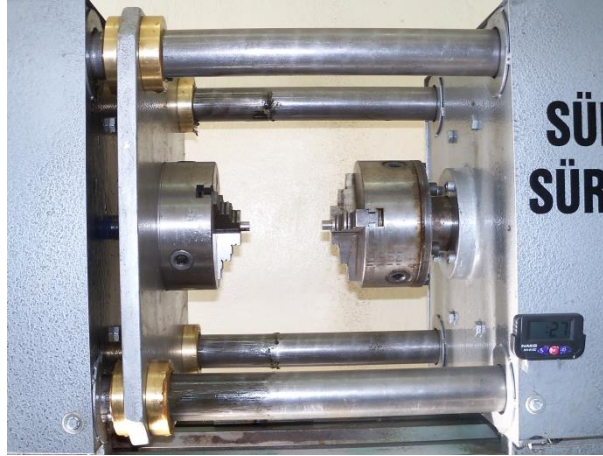
Şekil 4.1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinasının şematik resmi (Kırık ve Özdemir 2012)



Şekil 4.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinası (Kırık ve Özdemir 2012)

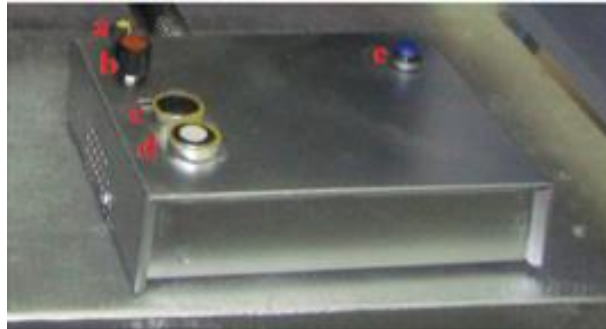
Dönerli ayna: Tezgâh kızıağı üstüne tahrik motoru ve aynı düzlemde bağlanan dönerli ayna; 11,1 kW' lık SİMENS marka DC motor ile bu tahrik motoru kontrol eden 11,1 kW' lık SİEMENS marka midi vektör invertör ile kontrol edilebilecek biçimde birleştirilmiştir. Dönerli torna aynasını kumanda eden tahrik motoru devir sayısı, 0-5 V arası DC gerilime sahip hız kontrol ünitesi aracılığıyla 0-3500 dev/dak aralığındaki her devir sayısında çalışabilecek türde düzenlenebilmektedir. Ayrıca, sürtünme kaynağında değerli bir ölçüt olan frenleme ile frenleme zamanı, inverter üzerinden tahrik motoruna DC gerilim yaparak düzenlenebilmektedir.

Eksenel hareketli ayna: Tezgâh üstüne dönerli ayna ile maksimum 0,002 eksen kaçıklığında Ø60 mm çapındaki dört adet eksenleme mili üstüne birleştirilmiş ve 120 mm'lik hidrolik piston mili vasıtası ile ileri geri hareketini gerçekleştirmektedir. Dönerli ayna ve eksenel hareketli ayna donanımını birbirine bağlayan bu dört adet mil, eksenel hareketli aynanın ileri geri hareketi sırasında titreşimleri ile eksen kaymalarını engellemektedir.



Şekil 4.3. Dönerli ayna ve eksenel hareketli ayna donanımı (Kırık ve Özdemir 2012)

Manuel kontrol paneli: Şekil 4.4'te fotoğrafı gösterilen kontrol paneli, kaynak işlemlerinin otomasyondan ayrı kumanda etmek gerekçesiyle yapılmıştır. Kontrol paneli üstünde, ilerigeri tuşu, basınç ayarı kontrol düğmesi, pistonun ilerleme hızını veren ayar portları takılmıştır. Kontrol paneli aracılığıyla beklenen basınç ile hızda pistonun hareketi gerçekleştirilebilmektedir. Aynı zamanda motorun start, stop ile istenilen devirde hareketini gösteren portlarda tasarlanmıştır.



Şekil 4.4. Manuel kontrol paneli (Kırık ve Özdemir 2012)

4.4. Kaynak Parametreleri

Literatür incelemeleri sonucunda; sürtünme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde mikroyapı ve mekanik davranışlar üstünde büyük etkiye sahip olan devir sayısı, sürtünme basıncı ile sürtünme süresi olan işlem parametreleri değişken olarak seçilmiş olup, bu değişkenler 3x3

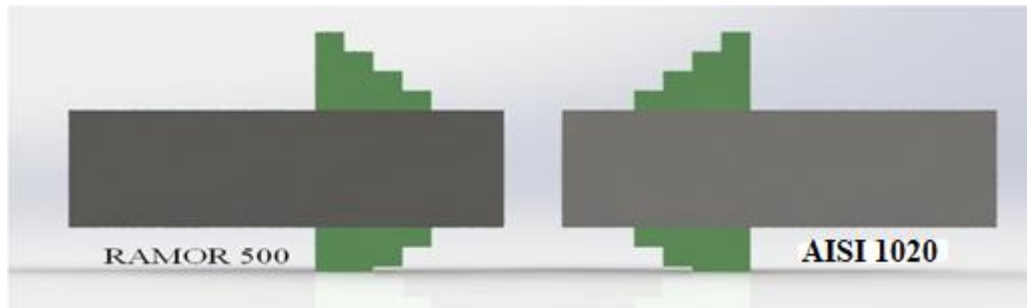
faktöriyel şeklinde belirlenerek Tablo 4.2’te verilen düzende deneysel programda incelenmiş ve veriler bulunmuştur.

Tablo 4.2. Kaynaklı bağlantıların üretiminde kullanılan sürtünme kaynak parametreleri

Numune No	Devir Sayısı (rpm)	Sür. Süresi (sn)	Sür. Basıncı (MPa)	Yığma Basıncı (MPa)	Yığma Süresi (sn)	Boyca Kısalma 1020 (mm)	Flanş boyu 1020 (mm)	Boyca Kısalma Ramor 500 (mm)	Flanş boyu Ramor 500 (mm)
S1	2200	6	40	100	12	7,80	16,90	2,00	16,00
S2	2200	8	40	100	16	6,10	18,35	5,15	17,20
S3	2200	10	40	100	20	11,85	20,00	6,45	18,80
S4	1800	6	40	100	12	6,60	16,00	0,80	15,00
S5	1800	8	40	100	16	6,90	17,10	3,25	15,75
S6	1800	10	40	100	20	8,00	17,45	3,20	16,10
S7	2200	6	60	120	12	5,85	18,00	4,90	16,00
S8	2200	8	60	120	16	5,60	18,60	5,85	16,85
S9	2200	10	60	120	20	13,90	18,45	5,85	21,00

4.5. Kaynak İşleminin Uygulanması

Birleştirilmek üzere eşleştirilen AISI 1020/Ramor 500 çelik çifti, Şekil 4.5’deki düzende, tezgaha bağlanmıştır.

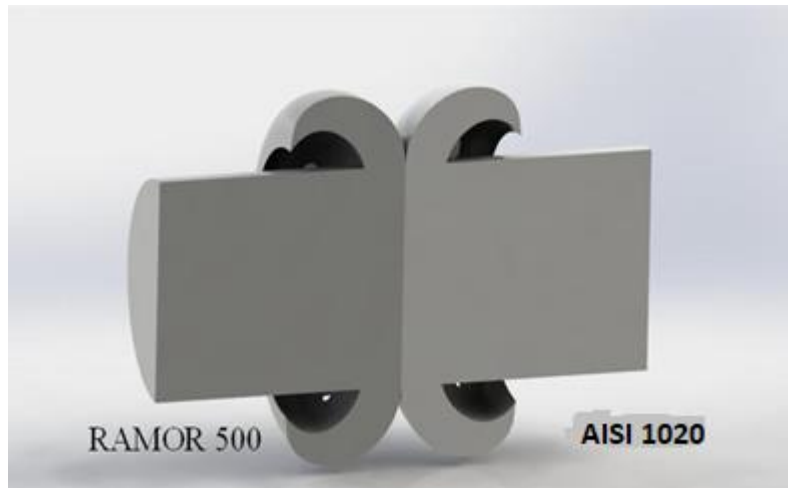


Şekil 4.5. Parçaların bağlanma şekli

4.6. Kaynak Sonrası Yapılan Muayeneler

4.6.2. Metalografik İncelemeler

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin yüzey özelliklerini ortaya koyabilmek için, Xiaomi Redmi Note 9 marka telefon yardımıyla makro yüzey fotoğrafları çekilmiştir. Kaynak işlemi ardından, numunelerin birleşme alanında oluşan yapısal değişimi gözlemlemek için; numuneler birleşme yüzeyine dik olacak şekilde kesilip yüzeyleri 80-1200 mesh'lik zımpara aracılığıyla zımparalanmasının ardından 3 μm ' lik Elmas pasta aracılığıyla parlatılmıştır. Şekil 4.6'de kesilmiş numunenin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 4.6. Kesilmiş numunenin şematik resmi

4.6.2. Mikrosertlik Analizi

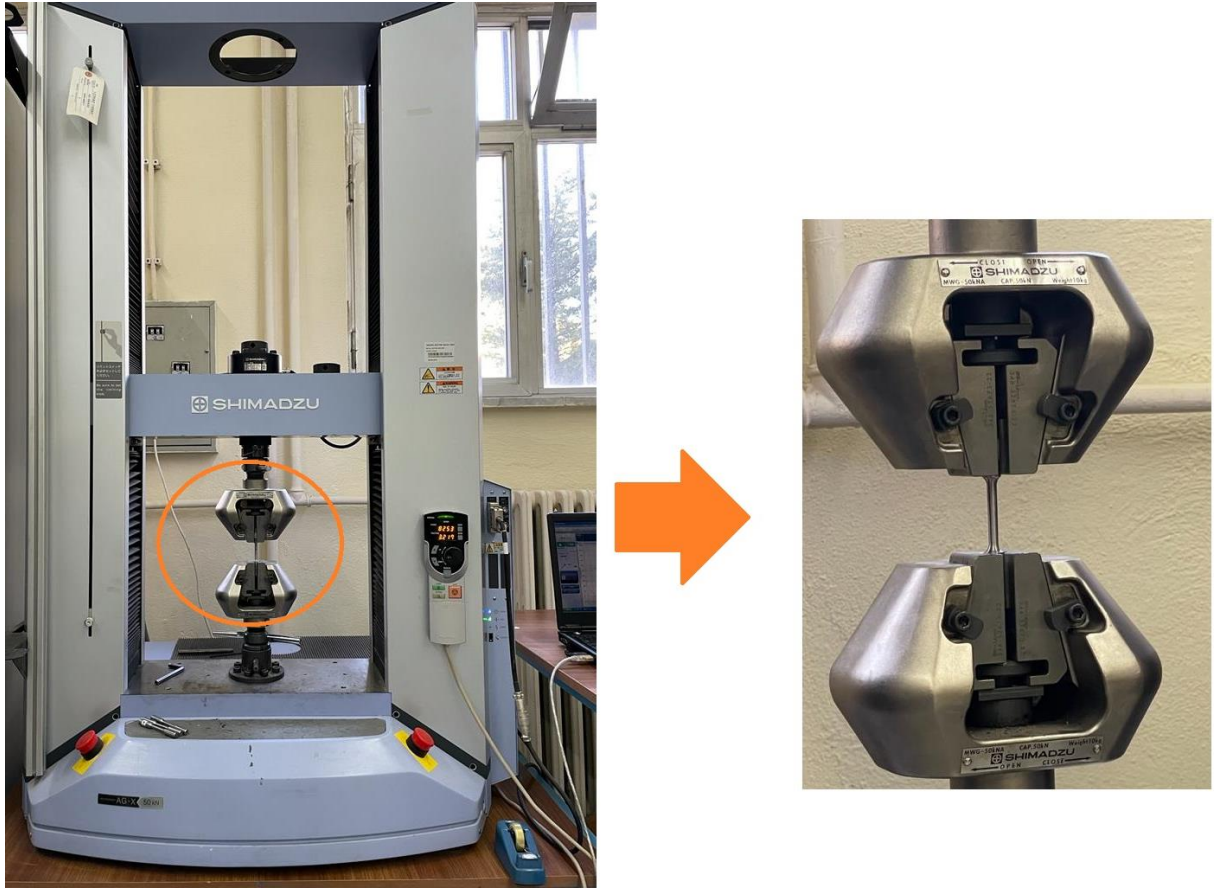
Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde oluşan sertlik değişimini ölçmek için mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, Bingöl Üniversitesi, Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan AOB marka mikrosertlik cihazında 20 gr yük altında Şekil 4.7'deki düzenekte 0,5 mm aralıklarla Vickers (HV) biriminde ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler, bilgisayar ortamına yüklenerek mikrosertlik grafikleri oluşturulmuştur.



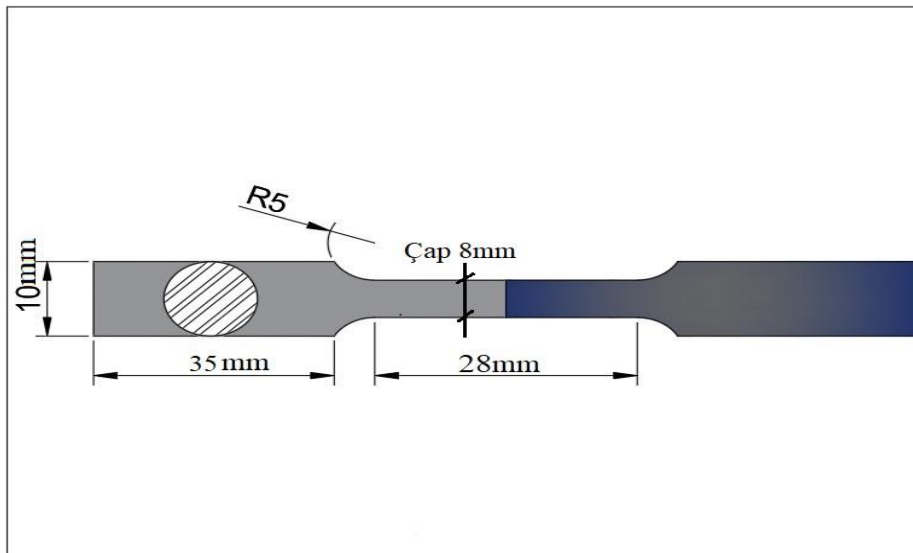
Şekil 4.7. Mikrosertlik deney cihazı

4.6.3. Çekme Testi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin en yüksek gerilme değerlerini ölçmek amacıyla bağlantılara soğuk çekme testi yapılmıştır. Çekme numuneleri TSE 138 standartlarına göre Şekil 4.8’da gösterilen ebatlarda CNC torna tezgahında işlenerek meydana getirilmiştir. Çekme deneyleri, 50000 N yük kapasitesi olan SHİMADSU marka çekme cihazında, 1 mm/dak çekme hızı uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 4.8. Çekme deneyi cihazı



Şekil 4.9. Çekme numunesi şematik resmi

4.6.4. Yorulma Testi

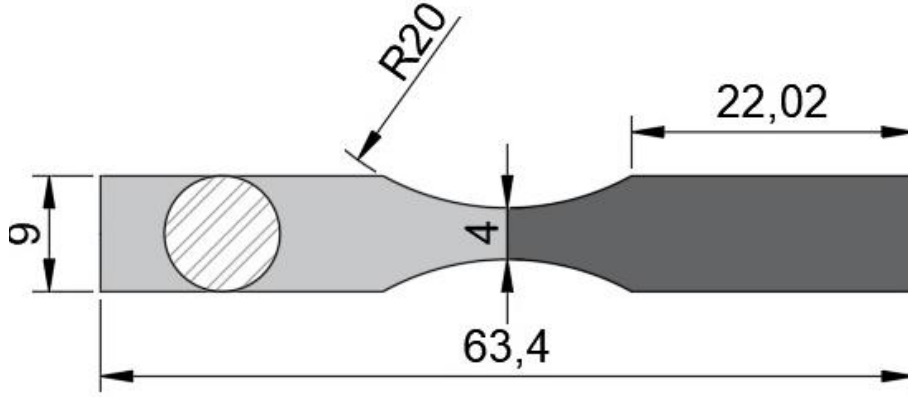
Endüstriyel alanda kullanılan birçok malzeme, çekme dayanımının büyük miktarda altındaki devamlı gerilme ya da şekil değişimlerine maruz bırakılmaktadır. Bu nedenden dolayı malzemelerin uygulanabilirliğine yorulma özellikleri ile daha iyi karar verilebilir (Mercan 2013).

Yorulma özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan deneyler, anma çapı 4 – 12,5 mm ortasında olan deney parçaları üzerinde bilerek gerilme konsantrasyonu yapılmaksızın dönen çubuk eğme yorulma deneylerine sahip şartları oluşturan ve Mart 2002’ de yürürlüğe gelmiş olan TS ISO 1143 no’ lu standarta göre yapılmıştır. Yorulma deneylerinin sonuçları atmosferik koşullardan etkilenir bu nedenle kontrollü şartlar lazım olduğundan, ISO/R 554 Madde 2.1’deki şartlara bağlı olarak deneyler yapılmıştır.

Yorulma numuneleri kaynaklı bağlantılarda kaynak sonuçlarının tesirinin incelenebilmesi nedeniyle TS ISO 1143 standardına uygun olarak toroit şekilli gerçekleştirilmiştir. En küçük çapı 4 mm olan toroit şeklindeki numune boyutları Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Kullanılan yorulma cihazı ise Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. Yorulma deney cihazı



Şekil 4.11. Yorulma numunesi şematik resmi

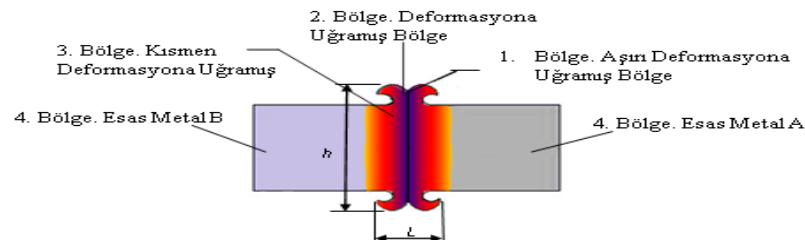


Şekil 4.12. Yorulma numunesi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Kaynaklı Bağlantıların Makroskopik Değerlendirilmesi

Farklı işlem değerleri uygulanarak sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların, arayüzeyinden dışarı çıkan malzeme yüzeyindeki değişim şematik olarak Şekil 5.1’ de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantıların birleşme alanlarından alınan makroskopik inceleme fotoğrafları değerlendirildiğinde; artan devir sayısı, sürtünme basıncı, yığma basıncı ve sürtünme süresine göre arayüzeyden dışarı çıkan malzeme ölçüsünde artış gözlemlenmektedir. Kaynak sonrası numunelerden alınan boyca kısalma miktarı, dışarı çıkan malzeme miktarına bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.



Şekil 5.1. Sürtünme kaynaklı numunelerinde birleşme arakesitinin şematik resmi (Kırık ve Özdemir 2012)

5.1.1. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Makroskopik İncelemeleri

2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı, üç farklı sürtünme süresi (6, 8, 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 no’lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası yüzey ve ara yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; artan sürtünme zamanına göre dışarı taşan malzeme miktarında artış görülmektedir. Kaynak sonrası yapılan boyca kısalma ölçümleri

sonucunda, en çok kısalma S3 nolu numunede 11,85 mm olarak bulunmuştur. Boyca kısalma en çok AISI 1020 çelik tarafında olmuştur. AISI 1020 tarafında daha fazla flanş olan malzemenin sebebi, çeliğin bu tarafta HMK yapısından ve bu kafes yapısının enerji depo edemeyişinden kaynaklanmaktadır. Bu sebepten dolayı, sürtünme kaynağı sırasında birim zamanda arayüzeyde meydana gelen sıcaklık derecesi Ramor 500 çelik tarafında artış kaydedilmesine rağmen AISI 1020 tarafında daha fazla malzemenin dışarı taşıdığı görülmektedir.



Şekil 5.2. S1, S2 ve S3 no' lu numunelerin makroskopik incelenmesi

Sürtünme basıncı ve yığma basıncı 20 MPa arttırılarak birleştirilen S7, S8 ve S9 no' lu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve ara yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; artan sürtünme basıncı ve buna paralel yığma basıncına bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarı artmakta ve dışarı taşan malzeme geometrisinin değiştiği, azalan sürtünme süresi ile ITAB' de daralma olduğu görülmektedir. Bu kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden dışarı taşan malzemenin geometrisi S1, S2 ve S3 numuneleri ile benzerlik göstermiştir. Boyca kısalmadaki bu artış artan sürtünme ve yığma basıncından kaynaklanmaktadır. Ayrıca dışarı flanş olan malzeme çapının da genişlediği görülmektedir.



Şekil 5. 3. S7, S8 ve S9 no' lu numunelerin makroskopik incelenmesi

5.1.2. 1800 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Makroskopik İncelemeleri

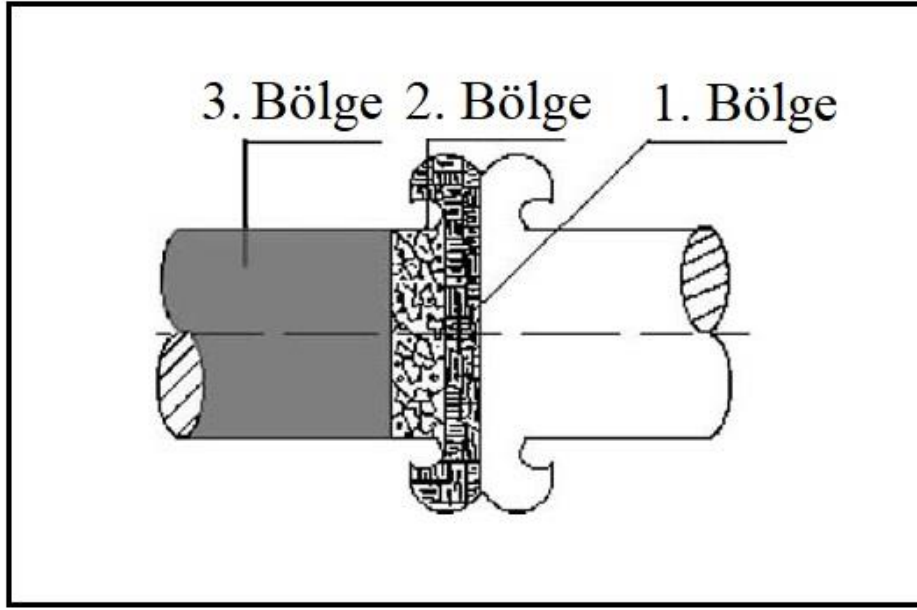
Devir sayısı 400 (dev/dak) azaltılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilen S4, S5 ve S6 no' lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası yüzey ve ara yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.4'te sırasıyla gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait yüzey fotoğrafları gözlemlendiğinde, bir önceki seride yapılan kaynaklı bağlantılara göre daha düzgün olmayan bir dışarı taşma ve flanş geometrisinin oluştuğu ve arayüzeyden dışarı taşan malzeme miktarında azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca, her üç numuneye ait arayüzey makroyapı fotoğrafları incelendiğinde, azalan devir sayısına bağlı olarak literatür verilerine göre arzu edilen çanak şeklinde dışarı taşmanın meydana gelmediği görülmektedir. Devir sayısının kademeli artışı, bağlantının geometrisi ve merkezden dışarı taşan malzeme miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu numunelere (S4, S5, S6) ait boyca kısaltmalar bir önceki grup ile kıyaslandığında; azalan devir sayısına bağlı olarak boylarındaki kısalma miktarının 1 mm kadar daha az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.4. S4, S5 ve S6 no' lu numunelerin makroskopik incelenmesi

5.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirilmesi

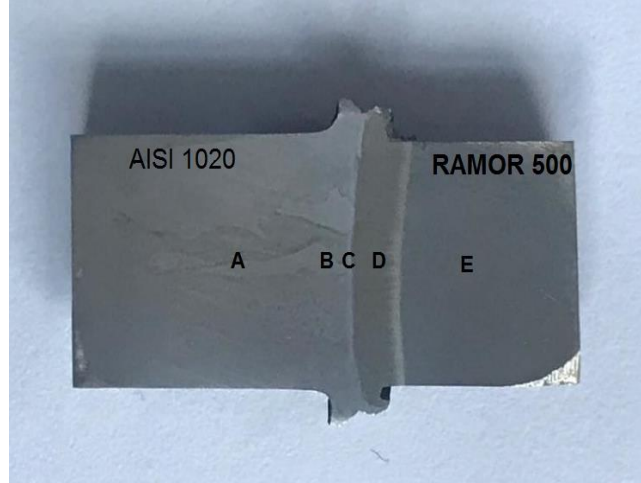
Farklı işlem değişkenleri kullanılarak, sürtünme kaynak yöntemi ile bir araya getirilen AISI 1020 ve Ramor 500 kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzeylerinden alınan optik fotoğrafları aşağıda sırasıyla verilmiştir. Bu çalışmada, farklı bileşime sahip iki metal çifti birleştirilmiş olduğundan birleşme arayüzeyinin hem sağında ve hem de solunda farklı yapıların ortaya çıktığı açıktır. Bu nedenle, mikroyapı değerlendirilmesi yapılırken Şekil 5.5'te verilen tanımlama esas alınarak 1. Bölge, 2. Bölge ve 3. Bölge şeklinde adlandırılarak oluşan yapılar, bölgesel olarak üç farklı bölgeye; birleşme bölgesi (BG), deformasyon bölgesi (DB) ve esas malzeme (EM) olarak belirlenmiştir. Tanımlanan bu bölgelerin boyutlarının, işlem değişkenlerine bağlı olarak değişim gösterdiği kaynakta gösterilmektedir. (Ozdemir 2005) Elde edilen mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, elde edilen yapıların temelde geleneksel sürtünme kaynak yöntemlerinde ortaya çıkan mikroyapı ile benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 5.5. Kaynaklı bağlantıların mikroyapı fotoğrafı (Özdemir ve Orhan 2004)

5.2.1. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S1 Numunesinin Optik İncelemeleri

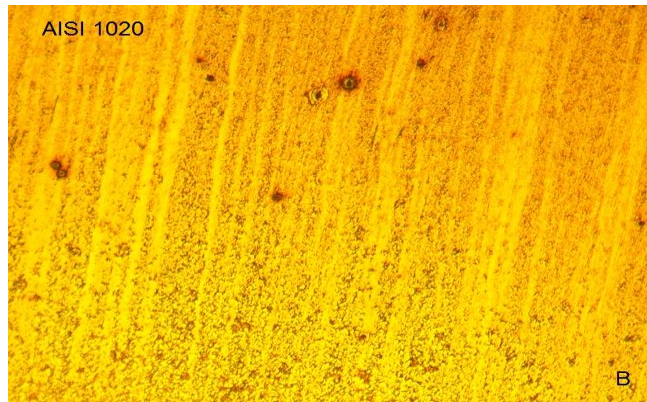
2200 devir sayısı, 6 saniye sürtünme süresi, 40 Mpa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı ve 12 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin mikroyapı fotoğrafları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Burada harflerle gösterilen bölgeler; A ve E bölgeleri esas malzeme, B ve C bölgeleri deformasyon bölgeleri ve C bölgesi birleşme bölgesini göstermektedir. Bu gösterilen bölgelerin optik incelemesi yapılmış elde edilen verilerin fotoğrafları alınarak aşağıda gösterilmiştir. A bölgesi dediğimiz esas malzeme kısmında bir deformasyon gözlemlenmemiş olup B ve D bölgelerinde deformasyona rastlanırken malzeme yapısında değişim gözlemlenmiş ve C kısmında malzemelerin diğer kaynak yöntemlerine göre daha düzgün bir biçimde birleştiği görülmektedir. Fotoğrafta da görüldüğü üzere S1 numaralı numunenin boyca kısılma ve flanş boyunun diğer numunelere göre daha az olduğu görülmektedir.



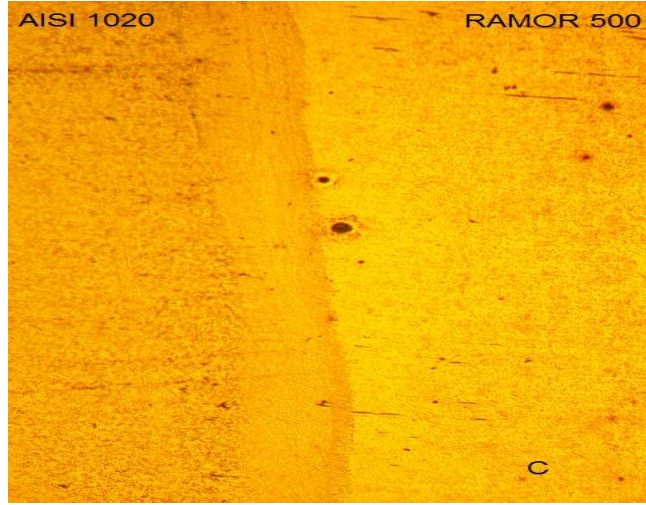
Şekil 5.6. 2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S1 numunesinin mikroyapı fotoğrafı



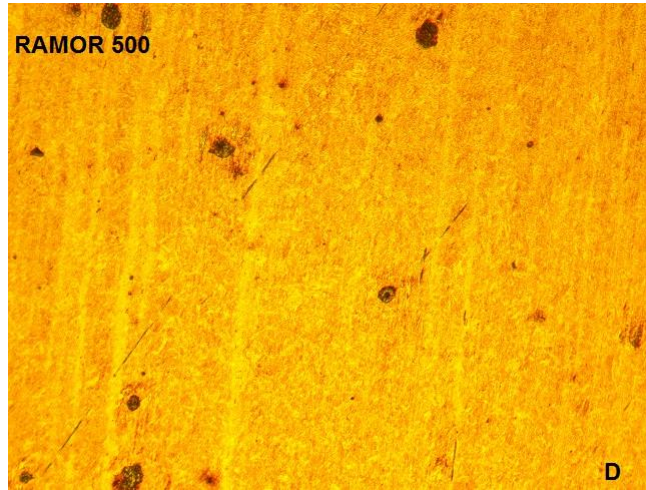
Şekil 5.7. S1 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü



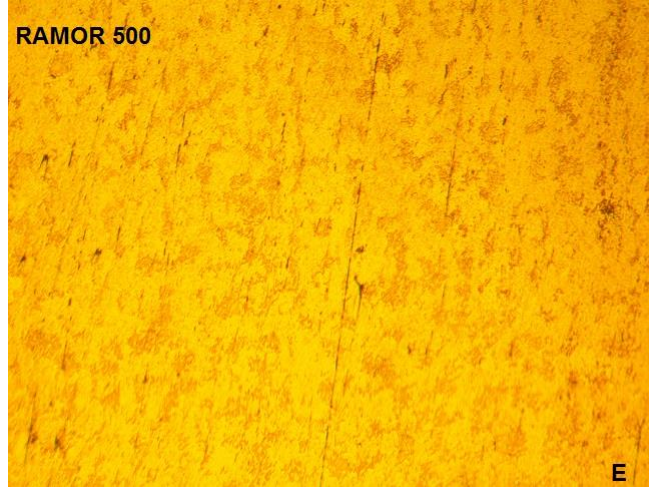
Şekil 5.8. S1 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.9. S1 no'lu numunenin C bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.10. S1 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü



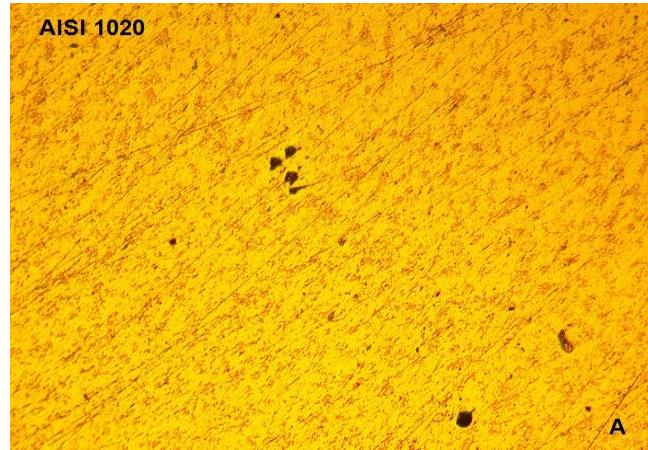
Şekil 5.11. S1 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü

5.2.2. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S9 Numunesinin Optik İncelemeleri

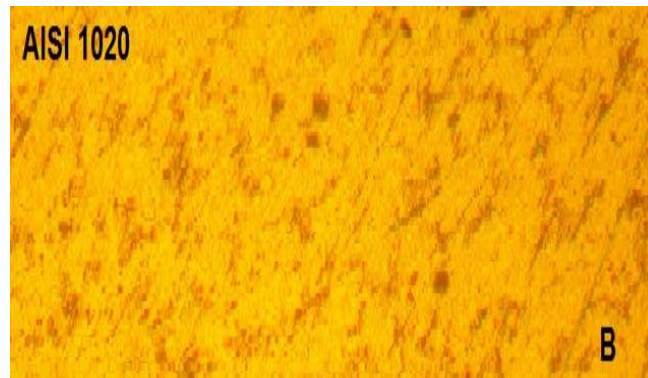
2200 devir sayısı, 10 saniye sürtünme süresi, 60 Mpa sürtünme basıncı, 120 MPa yığma basıncı ve 20 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin mikroyapı fotoğrafları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Burada harflerle gösterilen bölgeler; A ve E bölgeleri esas malzeme, B ve C bölgeleri deformasyon bölgeleri ve C bölgesi birleşme bölgesini göstermektedir. Yapılan optik incelemelerde AISI 1020 çeliğinin dışarıya olan flanş miktarının ramor 500'den fazla olduğu birleşme bölgesi ara çizgisinin artan sürtünme basıncına bağlı olarak RAMOR 500 tarafına doğru oval bir çizgi olarak büküldüğü ve RAMOR 500 tarafında dövme ile sertleşen bölgenin genişlediği görülmektedir. Bunun temel sebebi zırh çeliği ile orta karbonlu çelik arasındaki sertlik değerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Fotoğrafta da görüldüğü üzere S9 numaralı numunenin boyca kısalma ve flanş boyunun diğer numunelere göre en fazla olduğu görülmektedir.



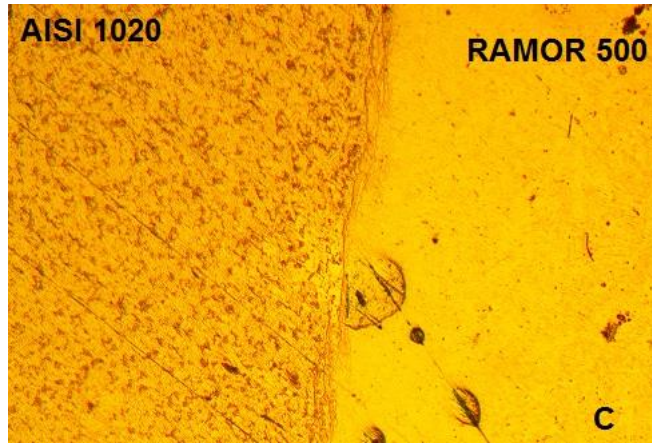
Şekil 5.12. 2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S9 numunesinin mikroyapı fotoğrafı



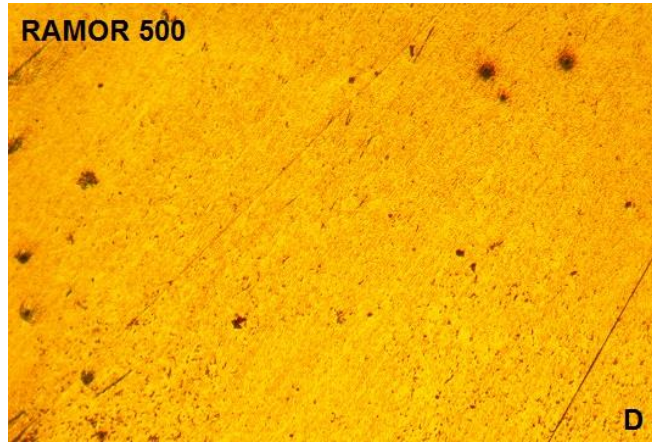
Şekil 5.13. S9 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü



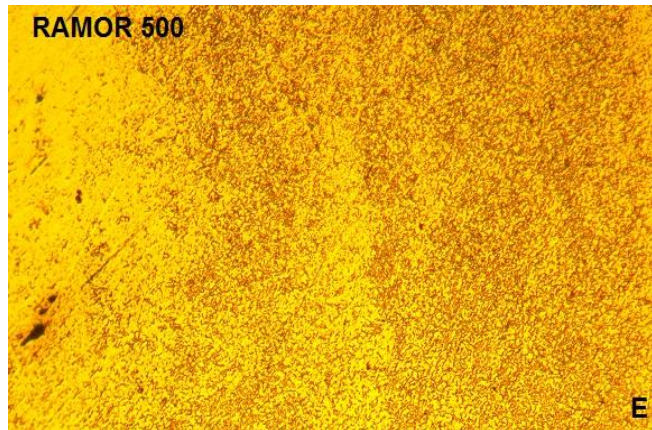
Şekil 5.14. S9 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.15. S9 no'lu numunenin C bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.16. S9 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.17. S9 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü

5.2.3. 1800 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S5 Numunesinin Optik İncelemeleri

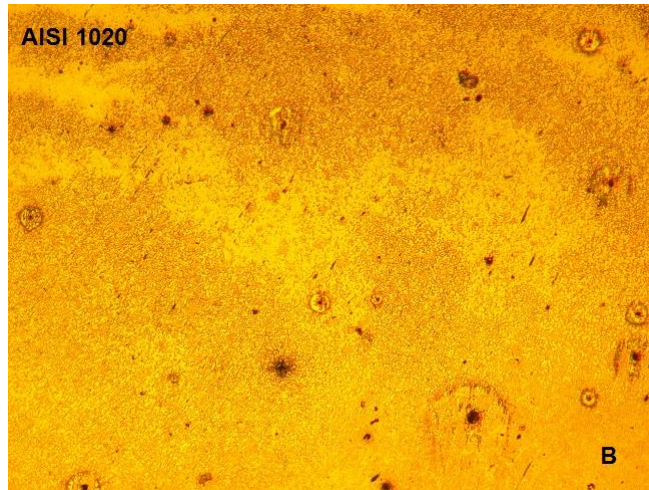
1800 devir sayısı, 8 saniye sürtünme süresi, 40 Mpa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı ve 16 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin mikroyapı fotoğrafları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Burada harflerle gösterilen bölgeler; A ve E bölgeleri esas malzeme, B ve C bölgeleri deformasyon bölgeleri ve C bölgesi birleşme bölgesini göstermektedir. Bu numuneye ait mikroyapı resimleri incelendiğinde deformasyon bölgesinin tamamen S1 ve S9 numunelerinden farklı olarak düz bir çizgi değilde keskin bir kırılma ile birbirinden ayrıldığı ve ADB'nin merkeze doğru daraldığı görülmektedir. Fotoğrafta da görüldüğü üzere S5 numaralı numunenin boyca kısalma ve flanş boyunun S1 ve S9 diğer numunelerinin ortalaması olduğu görülmektedir.



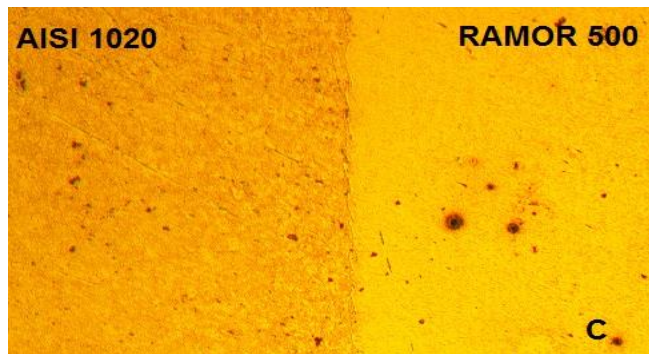
Şekil 5.18. 1800 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S5 numunesinin mikroyapı fotoğrafı



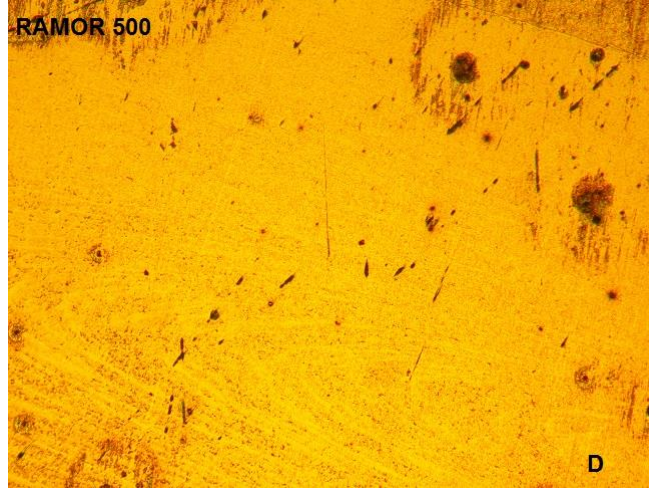
Şekil 5.19. S5 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi optik görüntüsü



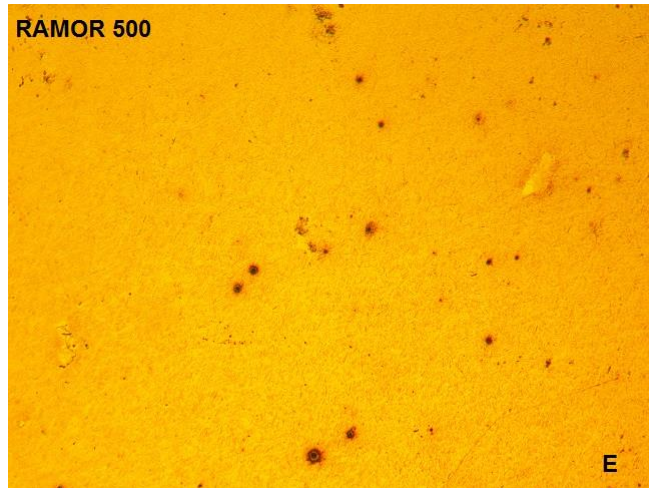
Şekil 5.20. S5 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.21. S9 no'lu numunenin C bölgesi optik görüntüsü



Şekil 5.22. S5 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi optik görüntüsü



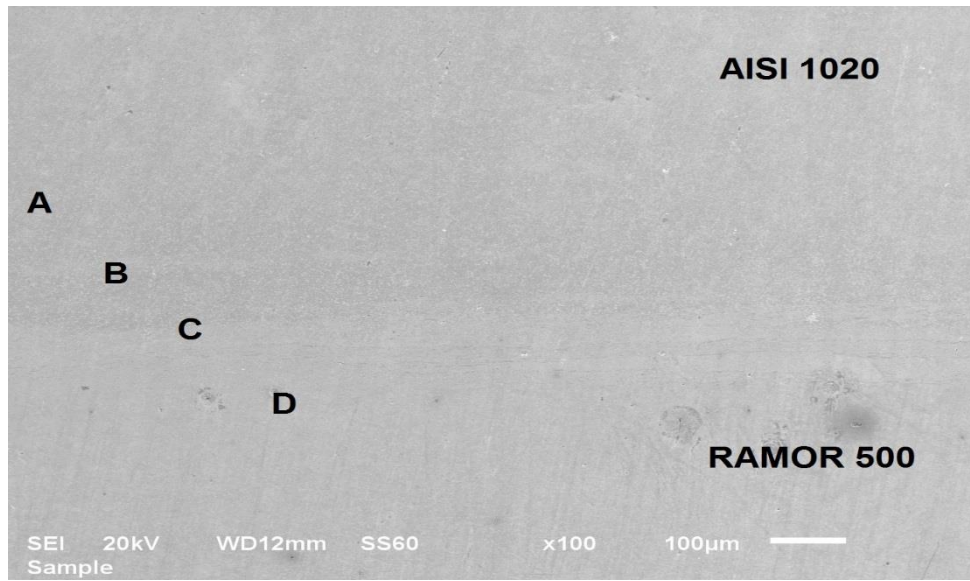
Şekil 5.23. S5 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki E bölgesi optik görüntüsü

5.3. Kaynaklı Bağlantıların SEM Analizleri

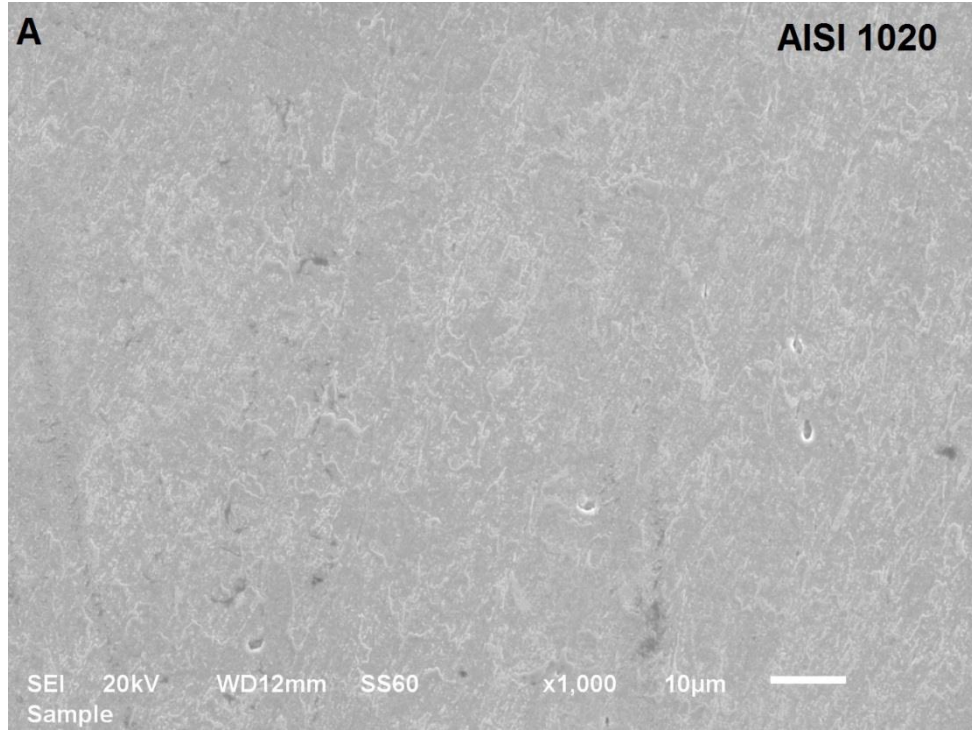
5.3.1. 2200 Devir sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S1 Numunesinin SEM Analizi

2200 devir sayısı, 6 saniye sürtünme süresi, 40 Mpa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı ve 12 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin SEM fotoğrafları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesi üstünde gerçekleştirilen analiz sonuçlarından, kaynağa uygun üç farklı alanın olduğu gözlemlenmektedir. Bu kaynaklı bağlantılara sahip fotoğraflar incelendiğinde; kaynaklı

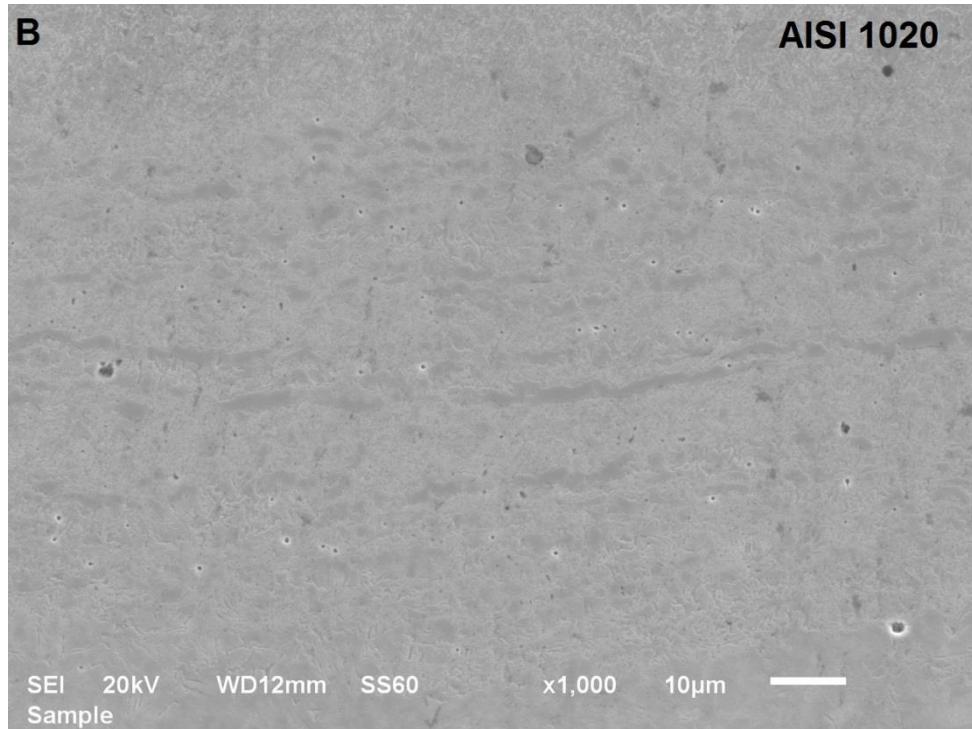
bağlantının birleşme arayüzeyinde boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı gözlemlenmektedir. S1 kaynaklı bağlantının arayüzey çizgisinin AISI 1020 tarafına doğru gömüldüğü gözlemlenmektedir. Bu numuneye ait boyca kısalma miktarı toplam 9.80 mm olarak ölçüldü. Sürtünme süresinin diğer numunelere (S5, S9) göre az olduğundan boyca kısalmanın daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, birleşme bölgesine bitişik deformasyon bölgelerinde (B, D) oluşan sıcaklık ve eksenel basıncın etkisi ile malzemenin dışarı taşma rejimi ve kayma bantları açıkça görülmektedir. Deformasyonun etkili olduğu bölgeden uzaklaştıkça kayma bantlarının yoğunluğu azalmaktadır.



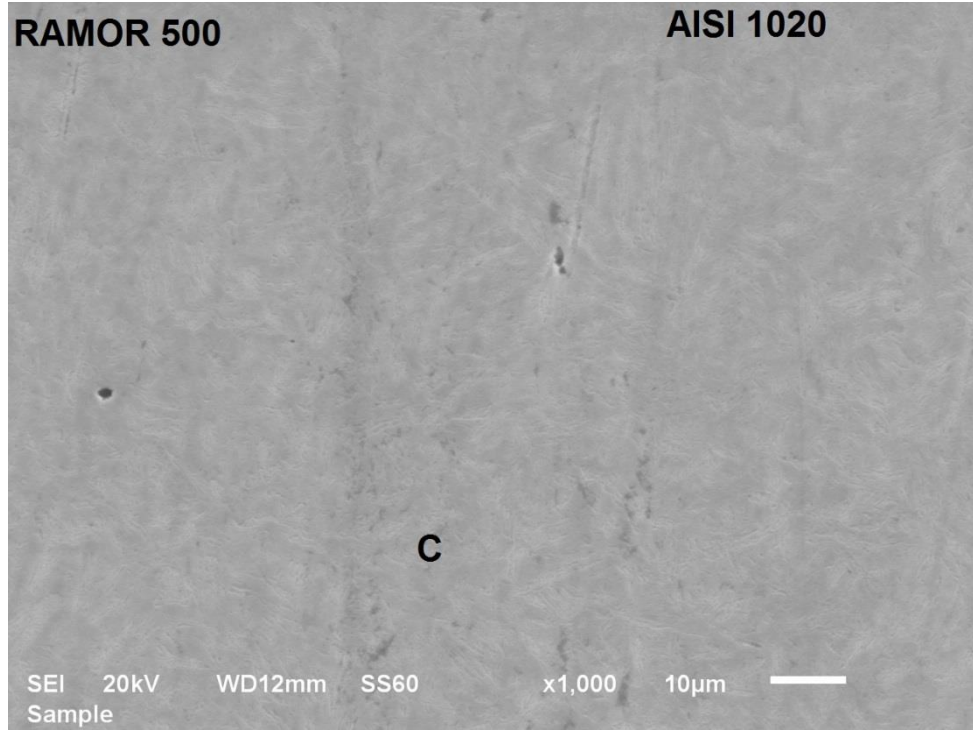
Şekil 5.24. 2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S1 numunesinin SEM görüntüsü



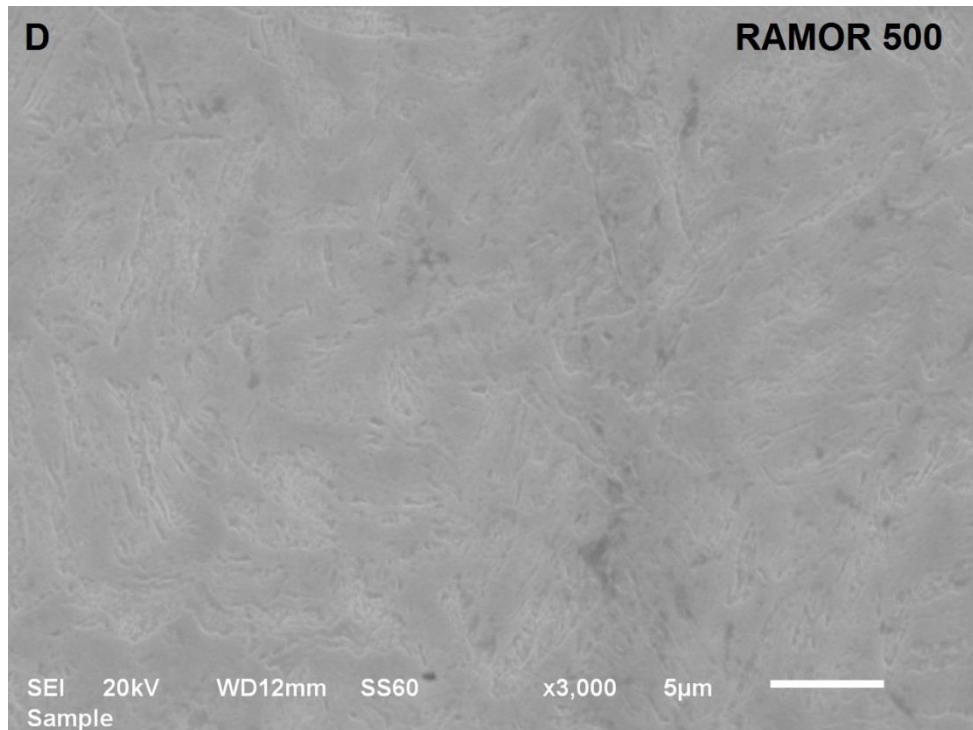
Şekil 5.25. S1 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü



Şekil 5.26. S1 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi SEM görüntüsü



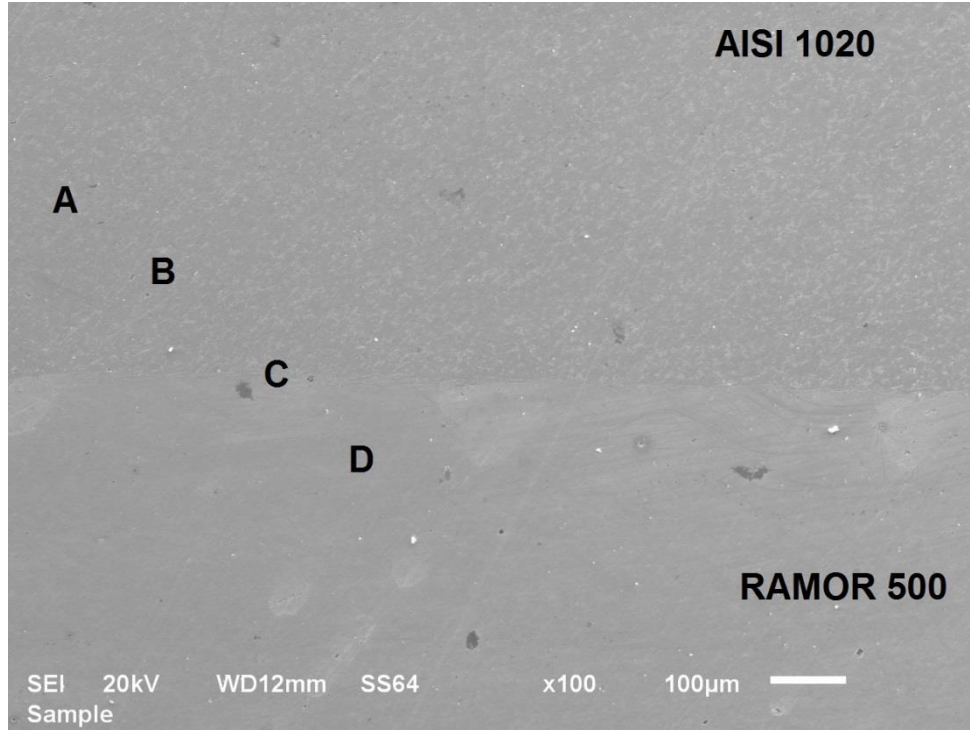
Şekil 5.27. S1 no'lu numunenin C bölgesi SEM görüntüsü



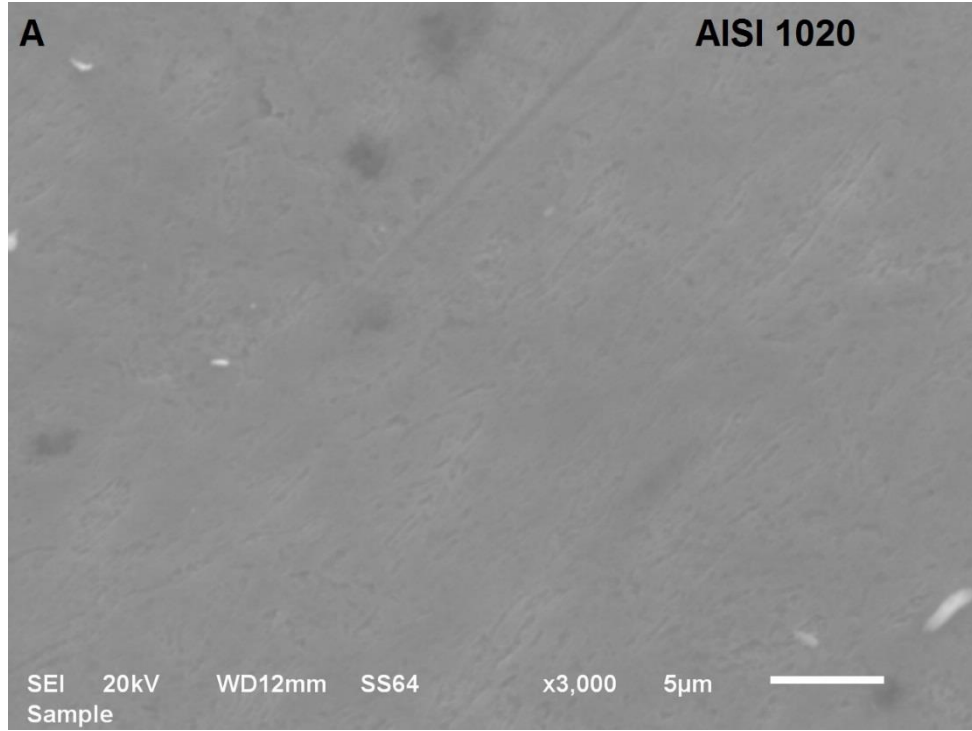
Şekil 5.28. S1 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü

5.3.2. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S9 Numunesinin SEM Analizi

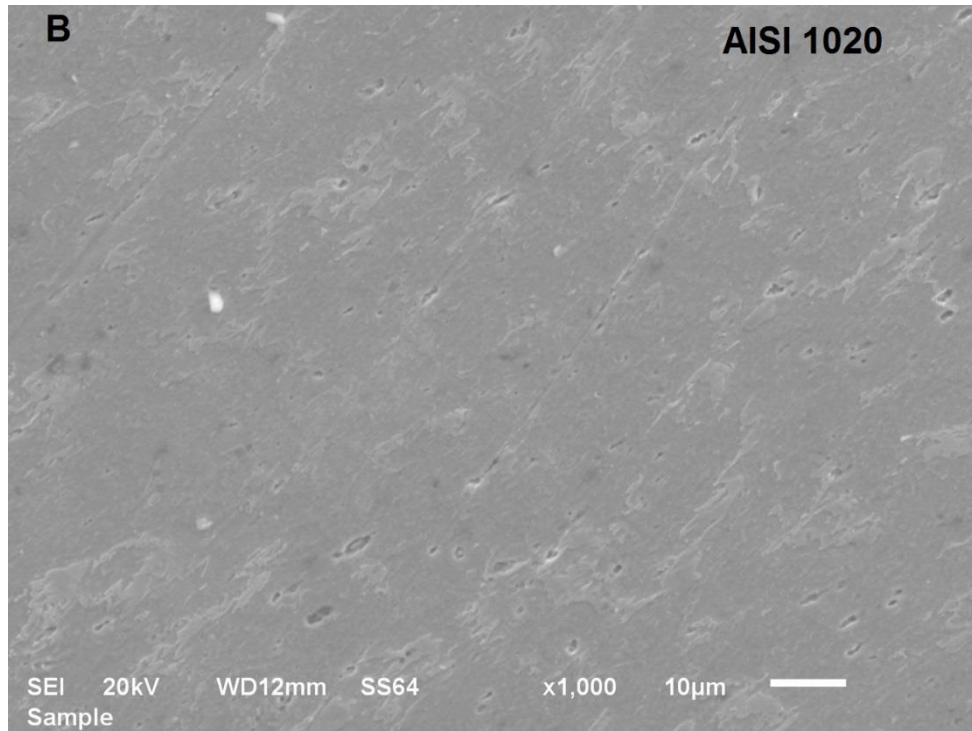
Sürtünme basıncı S1 numaralı numuneye göre 20 MPa arttırılarak birleştirilen S9 numaralı kaynaklı bağlantının birleşme bölgesinde oluşan yapısal değişimi gösteren SEM fotoğrafları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Kaynaklı bağlantıların tamamında birleşme bölgesinde çatlak, boşluk ile bağlantısız bölgelerin olmadığı gözlemlenmektedir. Artan devir sayısı ve sürtünme basıncına bağlı olarak ısınan malzemenin plastik şekil değiştirme direncinin arttığı, malzemenin yeterli viskoziteyi ulaştığı ve flanş boylarının arttığı görülmüştür.



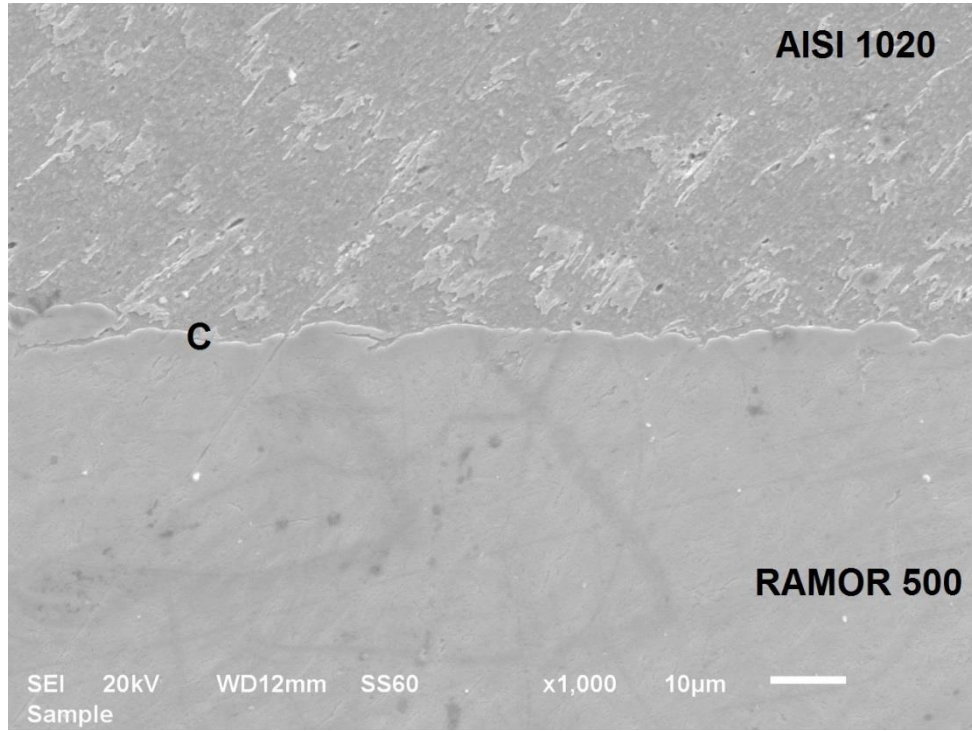
Şekil 5.29. 2200 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S9 numunesinin SEM görüntüsü



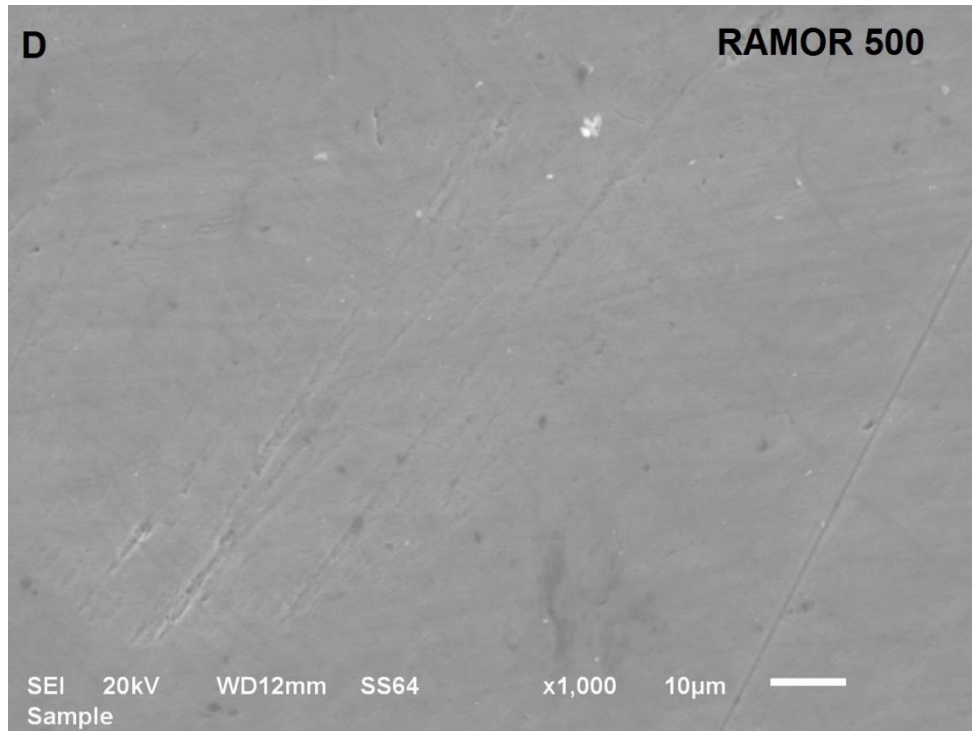
Şekil 5.30. S9 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü



Şekil 5.31. S9 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki B bölgesi SEM görüntüsü



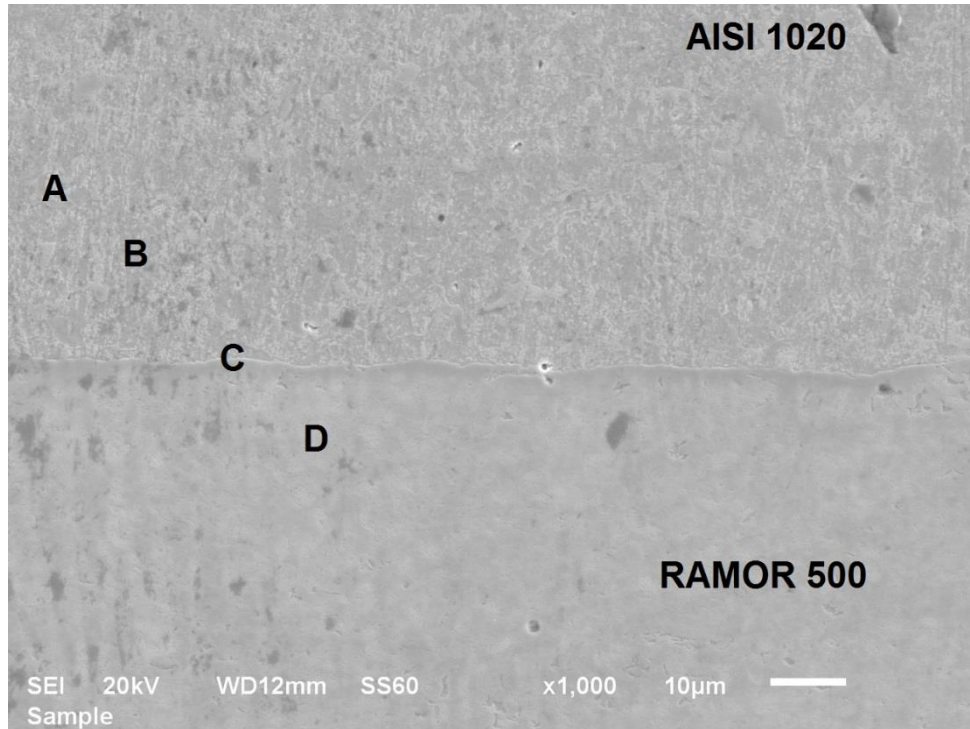
Şekil 5.32. S9 no'lu numunenin C bölgesi SEM görüntüsü



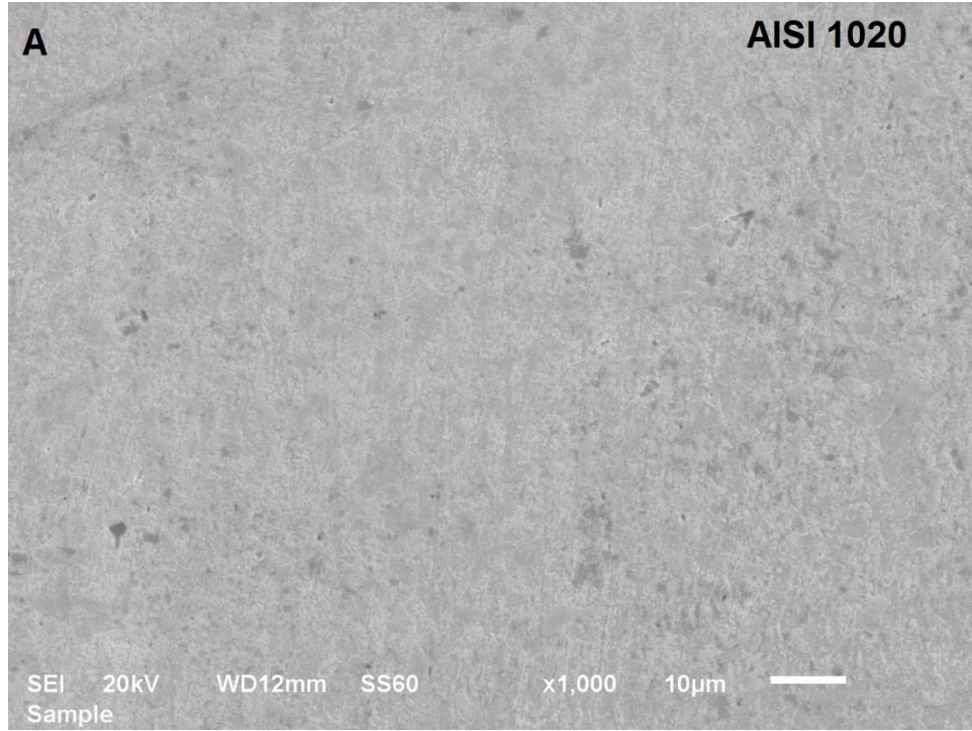
Şekil 5.33. S9 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü

5.3.3. 1800 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S5 Numunesinin SEM Analizi

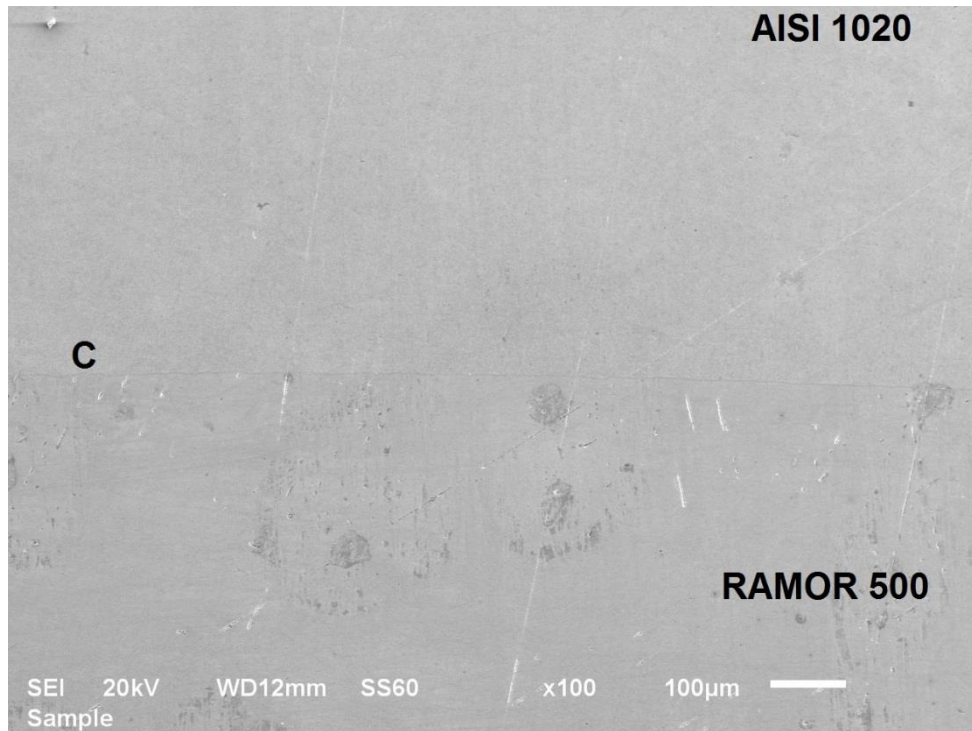
1800 (dev/dak) devir sayısı kullanılarak birleştirilen S5 numaralı kaynaklı bağlantının birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişimi veren SEM fotoğrafları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Bu bağlantıya ait fotoğraflardan da görüldüğü gibi azalan devir sayısı ve sürtünme basıncına bağlı olarak deformasyon bölgesinde daralma kaydedilmiştir. Devir sayısının bu bölgelerde oluşan yapısal değişim üstünde önemli etkisi olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere, arayüzeyin sürtünme etkisi altında kalma zamanına göre birim zamanda ulaşılan sıcaklık derecesi yükselmektedir. Söz konusu durum, özellikle büyük sürtünme süreleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda daha belirgindir. Azalan devir sayısı ve sürtünme basıncına bağlı olarak ısınan malzemenin plastik şekil değiştirme direncinin düştüğü, malzemenin yeterli viskoziteyi yakalayamayıp, tamamen arayüzeyden atılamamasına neden olmuştur. Ayrıca artan sürtünme süresi ile malzemelerin ısı girdisinin artması ve artan eksenel basıncın etkisi neticesinde kayma bantlarının genişliğinde bir artmanın olduğu görülmektedir.



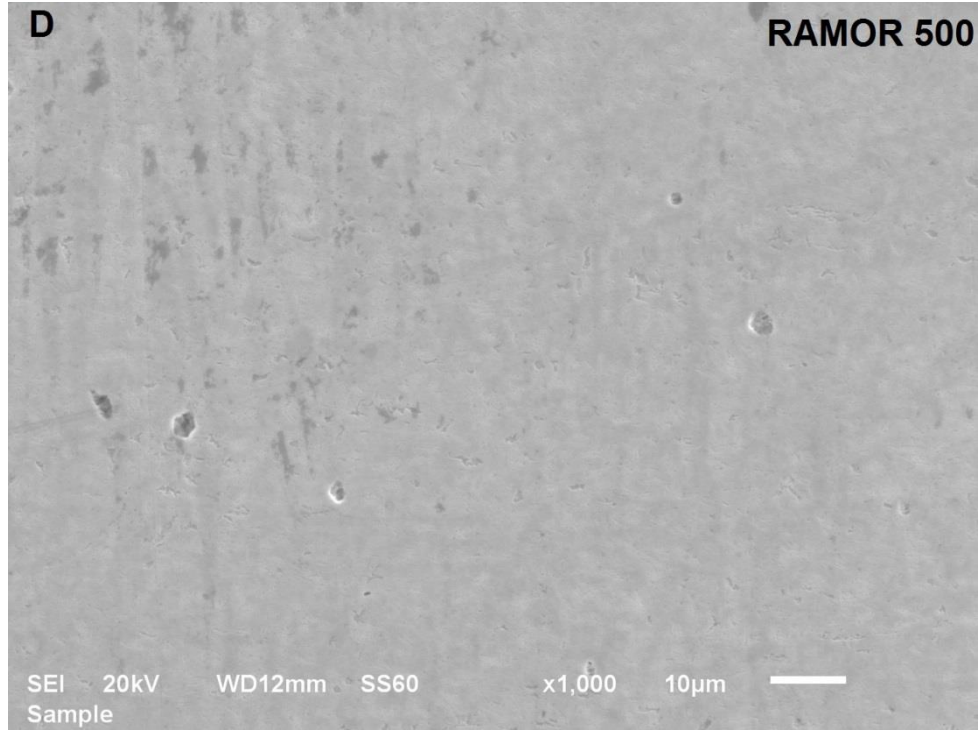
Şekil 5.34. 1800 devir sayısı (dev/dak) kullanılarak birleştirilen S5 numunesinin SEM görüntüsü



Şekil 5.35. S5 no'lu numunenin AISI 1020 malzemesindeki A bölgesi SEM görüntüsü



Şekil 5.36. S5 no'lu numunenin C bölgesi SEM görüntüsü

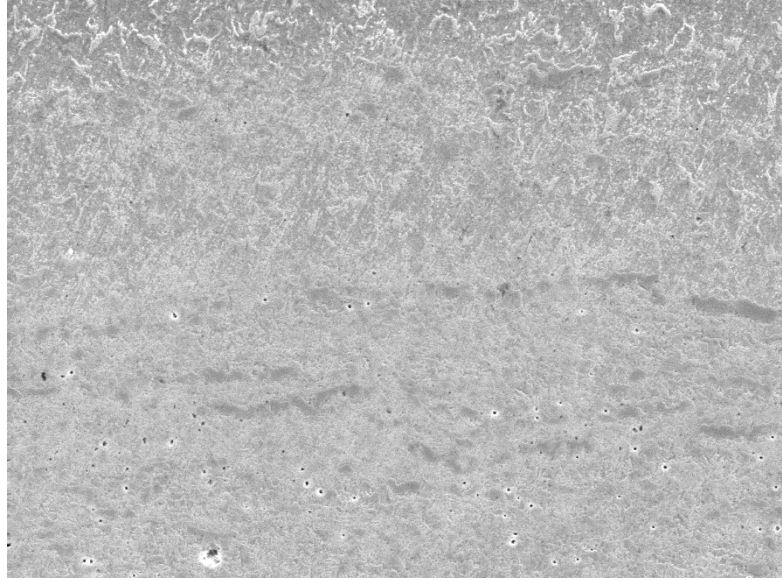


Şekil 5.37. S5 no'lu numunenin RAMOR 500 malzemesindeki D bölgesi SEM görüntüsü

5.4. Kaynaklı Bağlantıların EDS Analizleri

5.4.1. 2200 Devir Sayısı (dev/dak) Kullanılarak Birleştirilen S1 Numunesinin EDS Analizi

S1 no'lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları Tablo 5.1' de verilmiştir. Numune EDS analizleri açısından incelendiğinde; AISI 1020 tarafında kısmen dönüşüme uğrayan bölgede krom ve nikel miktarı yükselmiştir.



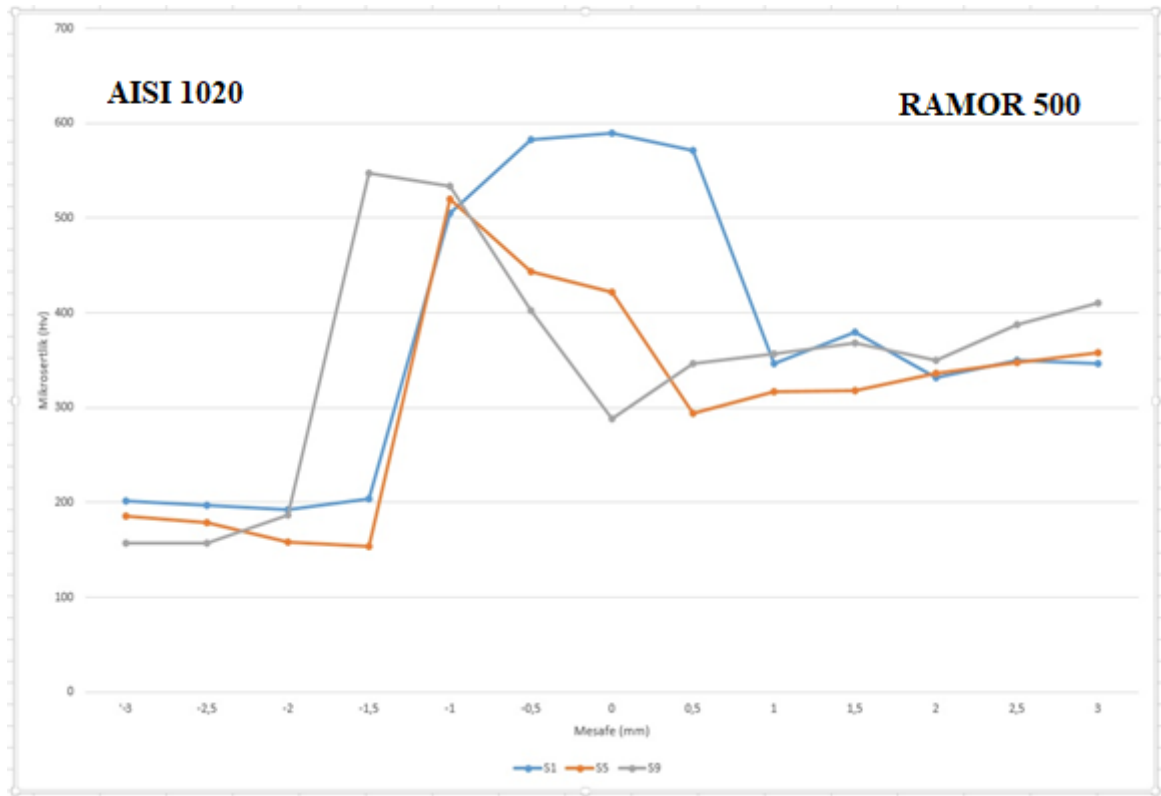
Şekil 5.38. S1 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları

Tablo 5.1. S1 numunesinin 1 numaralı bölgesinin EDS analiz sonuçları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
C	Ka	11.42	2.315	1.366	wt.%	
Cr	Ka	22.24	4.000	0.233	wt.%	
Mn	Ka	31.40	4.065	0.648	wt.%	
Fe	Ka	3,635.69	22.286	97.549	wt.%	
Ni	Ka	4.98	2.859	0.204	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

5.5. Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

İki farklı devir sayısı, farklı sürtünme basıncı ile farklı sürtünme süresi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların, birleşme merkezinden ana metale doğru çizgisel bir hat boyunca 0,5 mm aralıklarla yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları, Şekil 5.39' da gösterilmiştir. Seçilen kaynaklı numunelerin (S1, S5, S9) arayüzeyinden alınan sertlik eğrileri incelendiğinde, üç farklı bölgede (DB, ADB ve KDUB) sertlik dağılımının değiştiği gözlemlenmektedir. Birleşme alanlarında değişim gösteren ölçüm sonuçlarının ana malzemeye ulaşıldığında, ana malzemelerin sertlik değerlerine yakın değerler alınmıştır.



Şekil 5.39. Üç numuneye (S1, S5, S9) ait mikrosertlik grafiği

5.5.1. 2200 dev/dak ile Birleştirilen S1 Numunenin Mikrosertlik Analizi

2200 devir sayısı, 6 saniye sürtünme süresi, 40 Mpa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı ve 12 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin sertlik eğrisi Şekil 5.39'da verilmiştir. Bu numuneye ait sertlik profili incelendiğinde; RAMOR 500 bölgesinde sertliğin maksimum 589,3 Hv olduğu ve ara bölgeden rabor 500 çeliğine doğru düştüğü görülmektedir. Ölçülen minimum sertliğin AISI 1020 tarafında olduğu gözlemlenmektedir.

5.5.2. 2200 dev/dak ile Birleştirilen S9 Numunenin Mikrosertlik Analizi

2200 devir sayısı, 10 saniye sürtünme süresi, 60 Mpa sürtünme basıncı, 120 MPa yığma basıncı ve 20 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin sertlik eğrisi Şekil 5.39 'da verilmiştir. Bu numuneye ait sertlik profili incelendiğinde;

RAMOR 500 bölgesinde sertliğin maksimum 546,8 Hv olduğu ve birleşme çizgisine doğru düştüğü görülmektedir.

5.5.3. 1800 dev/dak ile Birleştirilen S5 Numunenin Mikrosertlik Analizi

1800 devir sayısı, 8 saniye sürtünme süresi, 40 Mpa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı ve 16 saniye yığma süresi ile birleştirilen AISI 1020 ve Ramor 500 malzeme çiftinin sertlik eğrisi Şekil 5.39 'da verilmiştir. Bu numuneye ait sertlik profili incelendiğinde; RAMOR 500 bölgesinde sertliğin maksimum 520,3 Hv olduğu görülmektedir.

5.6. Kaynaklı Bağlantıların Çekme Testi Sonuçları ve İrdelenmesi

TSE 138' standardına göre hazırlanan sürtünme kaynaklı parçaların çekme testi öncesi fotoğrafları Şekil 5.40'da verilmiştir.



Şekil 5.40. Çekme deneyi numune resmi

5.6.1. 2200 dev/dak 40 MPa Sürtünme Basıncı ve 100 MPa yığma basıncı ile Birleştirilen Numunelerin (S1, S2, S3) Çekme Testi Analizi

2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı, üç farklı sürtünme zamanı (6, 8, 10 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 no'lu kaynaklı bağlantılara ait çekme sonrası yüzey görüntüleri Aşağıdaki şekillerde numunelerin fotoğrafları verilmiştir. Yüzey fotoğrafları incelendiğinde S1 nolu numune dışındaki bütün numunelerin arayüzeyinin AISI 1020 tarafında ITAB bölgesinde kırıldığı görülmektedir. Bu durumun sürtünme basıncının düşük tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen çekme grafikleri Şekil 5.28' de gösterilmiştir. Bu grafiklerden, artan sürtünme süresine bağlı olarak maksimum çekme değerleri sırasıyla 527.2, 525.7 ve 537.4 MPa olarak kaydedilmiştir. Maksimum çekme değerindeki bu farklılık, ITAB' ın genişliği ile doğrudan ilişkilidir. İki metal çifti ara yüzeyindeki bağlantısız bölge, çatlak ve boşlukların varlığı ve büyüklükleri de çekme testlerinin kırılma davranışları üzerine önemli rol oynamaktadır.



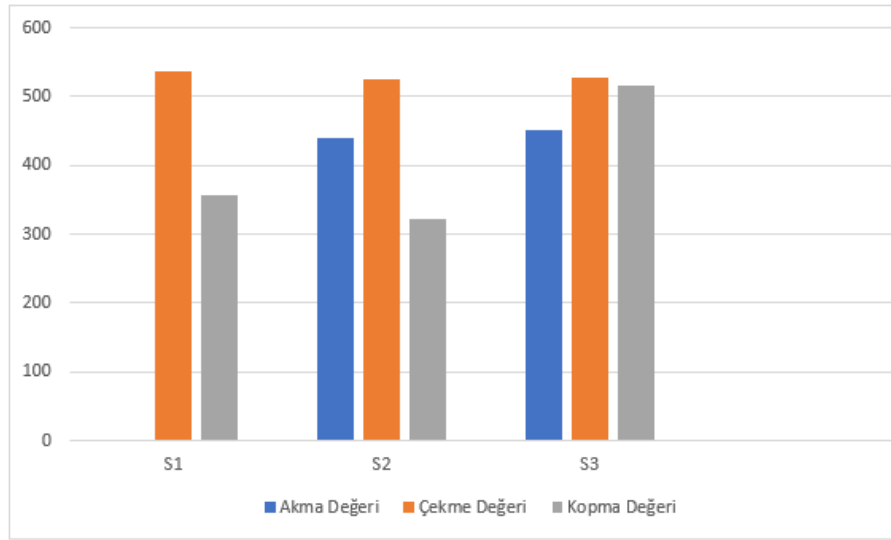
Şekil 5.41. S1 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.42. S2 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.43. S3 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.44. S1, S2, S3 numaralı numunelerin gerilme grafikleri

5.6.2. 2200 dev/dak 60 MPa Sürtünme Basıncı ve 120 MPa Yığma Basıncı ile Birleştirilen Numunelerin (S7, S8, S9) Çekme Testi Analizi

Sürtünme basıncı ve yığma basıncı 20 MPa arttırılarak birleştirilen S7, S8 ve S9 no'lu kaynaklı bağlantılara çekme numunesi görüntüleri ve gerilme grafiği Şekil 5.29 ve Şekil 5.30' da verilmiştir. Aşağıdaki şekillerde verilen yüzey fotoğrafı incelendiğinde, yalnızca S7 nolu numunenin ara bölgeden düzgün olmayan bir şekilde kırıldığı S8 ve S9 no'lu numunelerin ise kaynaklı bağlantının dışında kırıldığı görülmektedir. Bu numunelere ait gerilme grafikleri Şekil 5.30 de verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında, artan sürtünme basıncına bağlı olarak, numunelerin gerilme ve uzama değerlerinde 40 MPa sürtünme basıncı ile birleştirilen numunelere göre belirgin bir miktar artışın olduğu kaydedilmiştir.

Bu numunelerden alınan maksimum çekme değerleri sırasıyla 573, 542.8 ve 579.6 MPa olarak elde edilmiştir. Artan sürtünme süresi ve yığma süresine bağlı olarak gerilme değerlerinde artış olduğu görülmektedir.



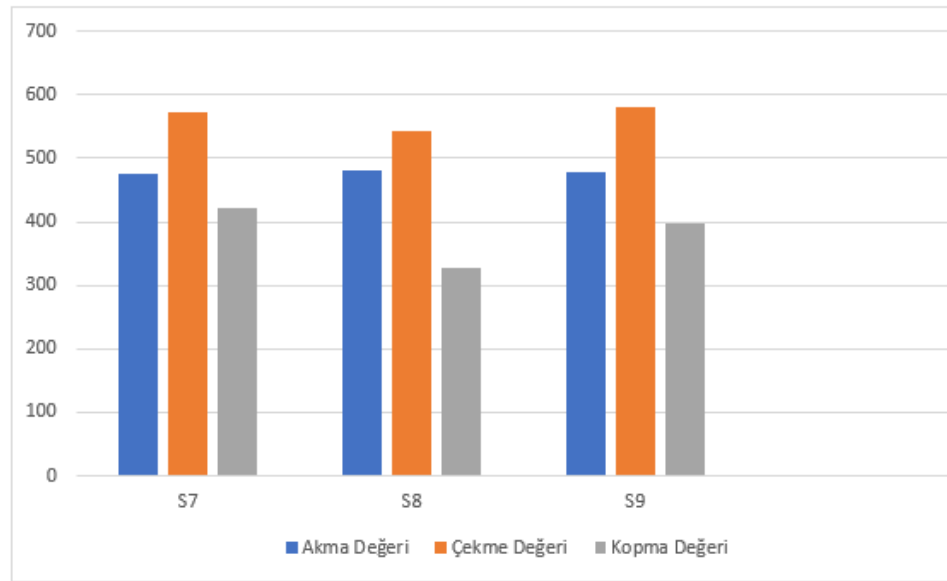
Şekil 5.45. S7 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.46. S8 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.47. S9 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.48. S7, S8, S9 numaralı numunelerin gerilme grafikleri

5.6.3. 1800 dev/dak 40 MPa Sürtünme Basıncı ve 100 MPa Yığılma Basıncı ile Birleştirilen Numunelerin (S4, S5, S6) Çekme Testi Analizi

Devir sayısı 400 (dev/dak) azaltılarak birleştirilen S4, S5 ve S6 no' lu kaynaklı bağlantılara ait çekme sonrası yüzey görüntüleri ve gerilme grafikleri Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de sırasıyla verilmiştir. Aşağıdaki şekillerde verilen yüzey resimleri incelendiğinde S5 ve S6 nolu numunelerin boyun vererek sünek bir kırılma S4 no'lu numunenin ise boyun vermeden kırılma sergilediği görülmektedir. S4, S5 ve S6 numunelerine ait gerilme grafikleri Şekil 5.33' te verilmiştir. Bu numunelere ait grafiklerden maksimum çekme değerleri sırasıyla 541, 559.9 ve 453.6 MPa olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak sürtünme kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen zırh çeliği ve orta karbonlu çeliklerin çekme dayanımları artan devir sayısı ve sürünme basıncı ile artmıştır. Sürtünme kaynağı ile zırh çelikleri ile farklı özellikteki orta karbonlu çeliklerin sorunsuz ve çok daha düşük maliyetle birleştirilebildiği görülmüştür. Sürtünme kaynağı zırh çeliklerindeki zırhlı yapıyı bozmadan ve daha dar bir kaynak bölgesine sahip olduğundan kullanımının yaygınlaştırılması savunma sanayisininde öncelikleri arasında olması gerektiğinin göstergesi olmuştur.



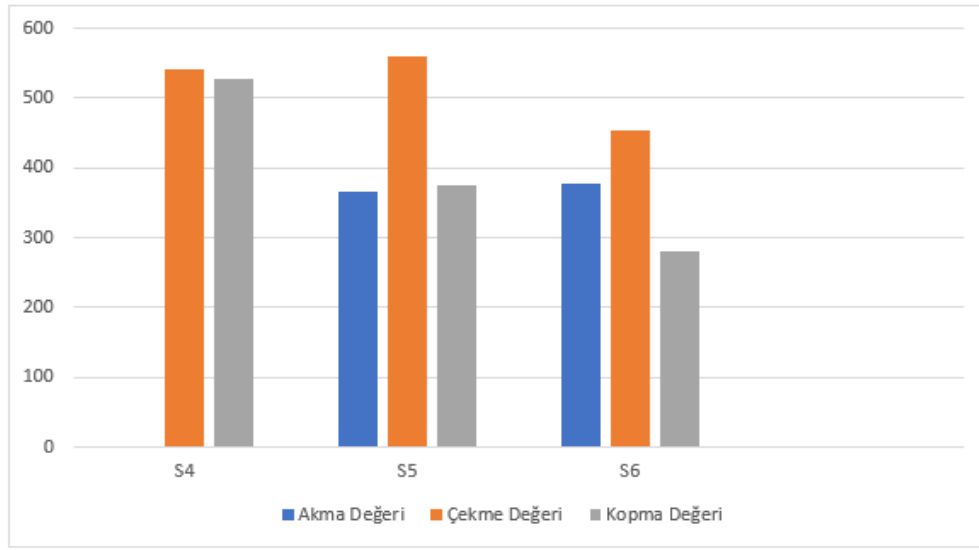
Şekil 5.49. S4 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.50. S5 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.51. S6 no'lu numunenin çekme deneyi sonrası fotoğrafı



Şekil 5.52. S4, S5, S6 numaralı numunelerin gerilme grafikleri

5.7. Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Deneyi Sonuçları

5.7.1. 2200 Devir Sayısı Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deneyi Sonuçları

2200 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı, 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S2 no'lu kaynaklı bağlantıya ait kaynak sonrası yorulma deneyi fotoğrafları Şekil 5.53'te gösterilmiştir. Numunelerin yorulma deneyi sonuçları incelendiğinde, devir sayısının azalması ile birlikte yorulma dayanımının azaldığı görülmektedir. 8 sn' lik sürtünme süresinin kullanıldığı S2 no' lu numunede %80' e çıkan yorulma sınırı, devir sayısının 1800 dev/dak ve sürtünme süresinin ise 6 sn kullanıldığı S4 no' lu numunede %70 olarak kaydedilmiştir. Her iki numunenin ana malzeme AISI 1020 çelik malzemenin yorulma sınırından daha yüksek ancak birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu numunelere ait yorulma sınırının ana malzeme yorulma sınırından daha yüksek çıkmasının sebebinin, sürtünme kaynaklı bağlantılarda eksenel basınç etkisi ile tanelerin küçülmesine bağlı olarak sertlik değerlerindeki artış nedeni ile meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 5.53. S2 numaralı numunelerin yorulma deneyi fotoğrafı



Şekil 5.54. S6 numaralı numunelerin yorulma deneyi fotoğrafı

5.7.2. 1800 Devir Sayısı Kullanılarak Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deneyi Sonuçları

1800 dev/dak, 40 MPa sürtünme basıncı, 100 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S4 no'lu kaynaklı bağlantıya ait kaynak sonrası yorulma deneyi fotoğrafları Şekil 5.34' te gösterilmiştir. 10 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S6 no'lu kaynaklı bağlantıya ait kaynak sonrası yorulma deneyi fotoğrafları da Şekil 5.55' te gösterilmiştir. S4 ve S6 no' lu numunelerde, yorulma sınırları 10^7 çevrimde aynı olmasına rağmen, daha yüksek sürtünme süresinin (10 sn) kullanıldığı S6 no' lu numunede, artan yüklerle birlikte, yorulma mukavemetinin daha yüksek olduğu görülmektedir. 1800 dev/dk devir sayısı ve 40 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen bağlantılarda artan sürtünme süreleri ile daha kaliteli kaynaklı bağlantıların yapılabilirdiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.55. S4 numaralı numunelerin yorulma deneyi fotoğrafı

Sonuç olarak; AISI 1020 ve RAMOR 500 çelik çifti farklı işlem parametreleri (devir sayısı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı) kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile güvenilir bir şekilde birleştirilebilmektedir. Makroyapı analiz incelemelerinde, artan devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi ile ITAB bölgesinin boyutunun genişlediği ve dışarı taşan malzeme miktarının arttığı gözlenmiştir. Yüksek devir ve sürtünme süresine bağlı olarak kaynak işlemi düzgün bir şekilde yapılmıştır.

KAYNAKLAR

Ananthapadmanaban D, Seshagiri R, Nikhil A, Rao K (2009) A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints, Materials & Design, Volume 30, Issue 7, August, p. 2642-2646

Anık S, Tülbentçi K, Kaluç E (1991) Örtülü elektrodlarla elektrik ark kaynağı. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, s. 1-2

Asma Y (2014) AA 7075 - AA 6061 malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Atapek Ş (2006) Zırh çeliklerinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, s. 1-2

Ates A, Turker M, Kurt A (2007) Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron-based superalloy, Materials & Design, p. 28: 948-953

Balalan Z (2013) TM Yöntemiyle üretilmiş alüminyum esaslı SiCp takviyeli kompozit ile 304 paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağıyla birleştirilebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Balta B (2016) Sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı ile birleştirilmiş boruların mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, s. 1-2

Bayar S (2019) Ramor 500 zırh çeliğinin farklı ark ergitme kaynak birleştirmelerinin metalurjik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Metalurji ve Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, s. 1-2

Baysal E (2019) AA6013 / AA7075 alüminyum malzemelerin sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, s. 1-2

Bekçi M (2019) Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliklerinin balistik performanslarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, s. 1-2

Çam G (2002) Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları. PAÜ Mühendislik Fakültesi 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 450-458

Çelik Ö (2008) Sürtünme kaynağı yapılmış farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, s. 1-2

Çil E (2009) Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş paslanmaz çelik ve bakır parçaların kaynak Bölgesi özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, Edirne, s. 1-2

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

Ellis CRG (1977) Friction Welding, Some Recent Applications of Friction Welding, Weld. and Metal February 9(7): p. 207-213

Erdoğan A (2015) Metal malzemelerin ara tabaka kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli Üniversitesi, Tunceli, s. 1-2

Gül A (2006) Farklı metalsel malzemelerin sürtünme kaynağında kaynak arametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi. Fen Bilimleri Enstitüsü Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 1-2

Kırık İ, Özdemir N (2012) Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 1040/AISI 304L çelik çiftinin elektrokimyasal korezyon davranışının araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Karagöz Ş, Atapek H (2007) 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler. 8, İstanbul-Türkiye, 10-15

Karagöz İ, Öksüz M (2016) Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan yöntemler. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi ÖS1: 19 - 28

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

Kuruzar DL (1979) Joint Design for The Friction Welding Process, Welding Journal, s. 31-35

Lee DG, Jang KC, Kuk JM, Kim IS (2004) Fatigue properties of inertia dissimilar friction-welded stainless steels. Journal of Materials Processing Technology, p.1402-1407

Mercan S (2013) Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 2205 / AISI 1020 malzeme çiftinin mikroyapı ve yorulma davranışının araştırılması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Merzalı C (2013) Zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölgenin özelliklerinin ısıtılma işlemi ile iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 1-2

Örenler A (2018) Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyetinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, s. 1-2

Taşkaya S (2017) Ramor 500 çeliğinin tozaltı kaynağıyla birleştirilmesi ve Ansys paket programıyla değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Orhan N (1996) Difüzyon kaynağı için yeni bir model ve duplex alaşımlara uygulanması. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Özdemir M (2003) Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 1-2

Özdemir N, Orhan N (2004) Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al. Metal Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, p. 1-2

Özsoy M, Kaluç E (2002) Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları. Mühendis ve Makine Dergisi 43(513): 19-26

Showalter D, Gooch WA, Burkins, Koch RS (2008) Ballistic Testing of SSAB Ultra-high-hardness Steel for Armor Applications (No. ARL-TR-4632). Army Research Laboratory report

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

Şık A, Kayabaş Ö (2003) Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Endüstriyel Santalar Eğitim Fakültesi Dergisi 11(12): 30-43

url1 <https://www.saglammakina.com/en/urun/punta-kaynak-makineleri/pc180-cok-amacli-punta-kaynak-makinesi/> (Erişim tarihi: 11.11.2021)

url2 <https://www.plastikciyiz.biz/kose-yazilari/plastik/145/ultrasonik-kaynak-hakkinda-temel-bilgiler> (Erişim tarihi: 11.11.2021)

Ünal E (2003) Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 4340 çeliği ile paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 1-2

Yılbaş BS, Şahin AZ, Kahraman N, Garni AZ (1995) Friction welding of St-Al and Al-Cu materials, Journal of Mat. Proc. Tech. 49, p. 431-443

Yılmaz M (1993) Farklı takım çeliklerinin sürtünme kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 1-2

ÖZGEÇMİŞ

1994 tarihinde Bingöl’de doğan Derya ABAK ilk, orta ve lise eğitimini Bingöl’de tamamladı. 2014 yılında Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliğini kazandı.2018 yılında lisans eğitimini bitirdi ve yine aynı yıl aynı üniversitede yüksek lisansa başladı. Kendisi bir firmada Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır