

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI
4340/ AISI 420 ÇELİK ÇİFTİNİN BURULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Arş. Gör. Nida KATI
(091122201)

Anabilim Dalı: Metalurji Eğitimi
Programı: Kaynak

Danışman: Doç. Dr. Sermin OZAN
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30 Ocak 2014

Ocak-2014

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 4340/ AISI 420 ÇELİK
ÇİFTİNİN BURULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Arş. Gör. Nida KATI
(091122201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 OCAK 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 ŞUBAT 2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sermin OZAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet HAŞÇALIK

Doç. Dr. Sedat KOLUKİSA

Doç. Dr. Mustafa TAŞKIN

Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

ŞUBAT 2014

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım sırasında her türlü yardımını ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç.Dr. Sermin OZAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında; fikirlerini ve desteklerini eksik etmeyen bölümümüz öğretim üyesi Sayın Doç.Dr. Mustafa TAŞKIN hocama, burulma deneylerim sırasında yardımlarını esirgemeyen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi öğretim üyelerinden Yrd.Doç.Dr. Hakan GAŞAN ve Yrd.Doç.Dr. Nedret AYDINBEYLİ hocalarıma, TÜBİTAK Malzeme Enstitüsü'nde başuzman araştırmacı olarak görev yapan Sayın Doç.Dr. Havva KAZDAL ZEYTİN Hoca'ma, çekme deneyleri esnasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım arkadaşım Sayın Arş. Gör. Yakup SAY'a ve bu tez çalışmasını proje kapsamında maddi olarak destekleyen FÜBAP ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta babam Zülfü KARAASLAN ve eşim Hasan KATI olmak üzere tüm aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

NİDA KATI

ELAZIĞ-2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
TABLolar LİSTESİ	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ	3
3. TEMEL BİLGİLER	7
3.1. Kaynağın Tanımı ve Sınıflandırılması	7
3.1.1. Ergitme Kaynağı ve Ergitme Kaynak Yöntemleri	7
3.1.1.1. Gaz Ergitme (Oksi-Asetilen) Kaynağı	7
3.1.1.2. Elektrik Ark Kaynağı	9
3.1.1.3. Tozaltı Kaynak Yöntemi	10
3.1.1.4. Gazaltı Kaynak Yöntemleri	11
3.1.1.4.1. Ergimeyen Elektrod ile Gazaltı (TIG) Kaynak Yöntemi	11
3.1.1.4.2. Ergimeyen Elektrod ile Gazaltı Plazma Ark (PA) Kaynak Yöntemi	13
3.1.1.4.3. Ergiyen Elektrod ile (MIG-MAG) Gazaltı Kaynak Yöntemi	14
3.1.1.5. Elektron Işın Kaynağı	17
3.1.1.6. Lazer Işını ile Kaynak	17
3.1.1.7. Elektrocüruf Kaynağı	19
3.1.1.8. Termit Kaynağı	20
3.1.1.9. Direnç Nokta Kaynağı	21
3.1.2. Katı Hal Kaynağı ve Katı Hal Kaynak Yöntemleri	21
3.1.2.1. Difüzyon Kaynağı	22
3.1.2.2. Ultrasonik Kaynak	23
3.1.2.3. Patlamalı Kaynak	23
3.1.2.4. Soğuk Basınç Kaynağı	24
3.1.2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	25
3.1.2.6. Sürtünme Kaynağı	26
3.1.2.6.1. Sürtünme Kaynağının Tarihçesi	26

3.1.2.6.2.	Yöntemin Tanımlanması	27
3.1.2.6.3.	Sürtünme Kaynağının Çeşitleri.....	31
3.1.2.6.3.1.	Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	32
3.1.2.6.3.2.	Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	33
3.1.2.6.3.3.	Kombine Sürtünme Kaynağı	34
3.1.2.6.4.	Kaynak Parametreleri	35
3.1.2.6.4.1.	Çevresel Hız.....	36
3.1.2.6.4.2.	Sürtünme Basınç Kuvveti.....	36
3.1.2.6.4.3.	Sürtünme Süresi	36
3.1.2.6.4.4.	Yığma Süresi.....	36
3.1.2.6.4.5.	Yığma Basınç Kuvveti	37
3.1.2.6.5.	Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti	37
3.1.2.6.6.	Kaynak Öncesi Hazırlık ve Bağlantı Dizaynı.....	40
3.1.2.6.7.	Kaynak Yüzeyinin Hazırlanması	40
3.1.2.6.8.	Kaynak Yapılacak Parçaların Bağlanması	41
3.1.2.6.9.	Birleşme Bölgesindeki İç Yapı	42
3.1.2.6.10.	Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri.....	43
3.1.2.6.11.	Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları	44
3.1.2.6.12.	Sürtünme Kaynağının Avantajları	48
3.1.2.6.13.	Sürtünme Kaynağının Dezavantajları	49
3.2.	Paslanmaz Çelikler	49
3.2.1.	Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi	49
3.2.2.	Paslanmaz Çelik Türleri	53
3.2.2.1.	Ferritik Paslanmaz Çelikler	54
3.2.2.2.	Östenitik Paslanmaz Çelikler	57
3.2.2.3.	Dubleks Paslanmaz Çelikler	60
3.2.2.4.	Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler	61
3.2.2.5.	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	63
3.2.2.5.1.	Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri.....	65
3.2.2.5.2.	Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı	67
3.3.	İslah Çelikleri.....	68
3.4.	Malzemelere Uygulanan Mekanik Testler	70
3.4.1.	Çekme Deneyi.....	70

3.4.2.	Basma Deneyi	71
3.4.3.	Darbe Deneyi	72
3.4.4.	Yorulma Deneyi.....	73
3.4.5.	Sürünme Deneyi.....	74
3.4.6.	Burulma Deneyi	74
3.4.6.1.	Deney Cihazı.....	75
3.4.6.2.	Numuneler	75
3.4.6.3.	Burulma Diyagramı.....	76
3.4.6.4.	Kayma Uzaması (γ)	76
3.4.6.5.	Kayma Gerilmesi (τ)	77
3.4.6.6.	Kayma Elastiklik Modülü (G)	78
3.4.6.7.	Burulmada Kırılma Şekilleri.....	79
3.4.6.8.	Burulmada Bauschinger Etkisi	81
3.4.6.9.	Dairesel Kesitli Millerin Burulması	82
3.4.6.10.	Burulmaya Zorlanan Çubuklarda Meydana Gelen Normal Gerilmeler ..	85
3.4.6.10.1.	İçi Boş Millerin Burulması	85
3.4.6.10.2.	Daire Kesitli Olmayan Millerin Burulması	86
3.4.6.11.	Burulmada Şekil Değiştirme Enerjisi.....	89
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	90
4.1.	Çalışmanın Amacı.....	90
4.2.	Kaynak Öncesi İşlemler	90
4.2.1.	Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	90
4.2.2.	Sürtünme Kaynak Numunelerinin Hazırlanması	91
4.2.3.	Sürtünme Kaynak Tezgahı	91
4.2.4.	Sürtünme Kaynak Parametreleri	92
4.3.	Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler	93
4.3.1.	Metalografik İncelemeler	93
4.3.2.	Mikrosertlik Analizi	95
4.3.3.	Çekme Deneyi.....	96
4.3.4.	Burulma Deneyi	98
5.	DENEY SONUÇLARI VE YORUMLANMASI.....	104
5.1.	Kaynaklı Numunelerin Makroskobik Değerlendirilmesi	104
5.2.	Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirmesi.....	106

5.2.1.	AISI 420/ AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çelik Çiftlerinin (A Grubu) SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	109
5.2.1.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A1 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	109
5.2.1.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A2 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	113
5.2.1.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A3 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	116
5.2.2.	AISI 4340/ AISI 4340 Islah Çelik Çiftlerinin (B Grubu) SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri	120
5.2.2.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B1 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	120
5.2.2.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B2 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	124
5.2.2.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B3 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	128
5.2.3.	AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftlerinin (C Grubu) SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri	132
5.2.3.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C1 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	132
5.2.3.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C2 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	135
5.2.3.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C3 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri.....	137
5.3.	Mikrosertlik Sonuçları.....	141
5.3.1.	AISI 420/ AISI420 Çelik Çiftinin Mikrosertlik Sonuçları	141
5.3.2.	AISI 4340/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Mikrosertlik Sonuçları	144
5.3.3.	AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Mikrosertlik Sonuçları	146
5.4.	Çekme Deneyi Sonuçları.....	149
5.4.1.	AISI 420/ AISI 420 Çelik Çiftinin Çekme Deneyi Sonuçları	153
5.4.1.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A1 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	153

5.4.1.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A2 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	155
5.4.1.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A3 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	158
5.4.2.	AISI 4340/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Çekme Deneyi Sonuçları	161
5.4.2.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B1 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	161
5.4.2.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B2 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	164
5.4.2.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B3 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	166
5.4.3.	AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Çekme Deneyi Sonuçları	169
5.4.3.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C1 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	169
5.4.3.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C2 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	172
5.4.3.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C3 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları.....	174
5.5.	Burulma Deneyi Sonuçları	177
5.5.1.	AISI 420/ AISI 420 Çelik Çiftinin Burulma Deneyi Sonuçları.....	181
5.5.1.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A1 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	181
5.5.1.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A2 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	183
5.5.1.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A3 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	186
5.5.2.	AISI 4340/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Burulma Deneyi Sonuçları.....	189
5.5.2.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B1 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	189
5.5.2.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B2 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	191
5.5.2.3.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B3 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	194

5.5.3.	AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Burulma Deneyi Sonuçları.....	197
5.5.3.1.	700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C1 No’lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	197
5.5.3.2.	1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C2 No’lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	199
5.5.3.4.	1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C3 No’lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları.....	202
6.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	205
6.1.	Genel Sonuçlar.....	205
6.2.	Öneriler.....	209
	KAYNAKLAR	210
	ÖZGEÇMİŞ	216

ÖZET

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte, farklı malzemelerin birleştirilerek kullanılması gereksinimi ortaya çıkmıştır. İki farklı alaşımdaki çeliğin birleştirilmesinde en uygun yöntem kaynaklı birleştirmedir. Kaynak işleminin sonrasında, kaynak bölgesinin özelliklerinin, birleştirilen çeliklerin özelliklerinden farklı olması önemli sorunları ortaya çıkarmıştır. Değişik kaynak yöntemleri içerisinde ergitme kaynak yöntemlerinin kullanılması, bu sorunları daha da arttırmaktadır.

Ergitme kaynak yöntemlerinin kaynak hatalarına açık bir yöntem olması ve soğuma sırasında makro düzeyde iç gerilmelerin oluşması bu yöntemlerin önemli dezavantajları olup, kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Bu sebeple farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde bir ergitme olayının olmaması ya da sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve kaynak sonrası minimum iç gerilmelere sahip olması nedenleriyle katı hal kaynak yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, piyasada yaygın kullanım alanına sahip AISI 4340 ıslah çeliği ile ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi güç olan AISI 420 martenzitik paslanmaz çelikleri farklı devir sayılarında sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Elde edilen bu kaynaklı bağlantılarda arakesitte oluşan yapıların metalografik değerlendirilmesi yapılmış, çekme ve burulma gibi testler ile mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum bir devir sayısının belirlenmiş ve bu devir sayısındaki en iyi burulma dayanımı tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümünde konunun literatürdeki yeri ve öneminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümünde sürtünme kaynak yöntemi, paslanmaz çelikler, ıslah çelikleri, mekanik testler ve burulma deneyi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışma sonuçları incelenmiş ve yorumları yazılmıştır. Altıncı bölümde genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme kaynağı, AISI 420, AISI 4340, Paslanmaz Çelikler, Burulma Dayanımı, Mikroyapı

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF TORSIONAL BEHAVIOUR OF AISI 4340/AISI 420 STEEL COUPLE JOINED WITH FRICTION WELDING METHOD

The need to use different materials in combination emerged with the advancing technology today. The most appropriate method is welded joints joining of two different alloy steel. In the aftermath of the welding process, the characteristics of the source region, is different from the combined properties of steel has revealed significant problems. For this reason, different composition materials in bonding a smelting event absent or is limited, much less resources free from defects and weld minimum internal stresses have reasons, solid-state welding processes have been used.

Fusion welding method is a method open to the source of the error and the macro-level of internal stresses during cooling of the major drawbacks of this method is to occur, which reduces the strength of the source. For this reason, different composition materials in bonding a smelting event absent or is limited, much less resources free from defects and weld minimum internal stresses have reasons, solid-state welding processes have been used.

In this study, with widespread use in the market with AISI 4340 steel fusion welding breeding methods that combine the power of AISI 420 martensitic stainless steel is combined with different speeds, the friction welding method. The resulting structures formed in the intersection of these welded joints made metallographic evaluation, such as tensile and torsion tests aimed to investigate the mechanical behavior. As a result of studies determined optimum rotational speed and the rotational speed has been found best torsional strength.

In the first section of this study, it was made introduction to the subject. In the second section, the place and importance in the literature of the subject were mentioned. In the third section, general informations were given about friction welding method, stainless steels, tempered steels, mechanical tests and torsion test. In the fourth section, experimental studying method was examined. In the fifth section, the results of the experimental studying were examined and their comments were written. In the sixth section, general results and proposals were given.

Key words: Friction welding, AISI 420, AISI 4340, Stainless Steel, Torsion Strength, Microstructure

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Gaz ergitme (oksi- asetilen) kaynağı.....	8
Şekil 3.2. Elektrik ark kaynağı	9
Şekil 3.3. Tozaltı kaynağı	10
Şekil 3.4. Tungsten Inert Gas (TIG) kaynağı.....	12
Şekil 3.5. Plazma ark kaynağı	14
Şekil 3.6. Hava soğutmalı torç kesiti ve torç bağlantı paketi.....	15
Şekil 3.7. Hava soğutmalı MIG tabancası (tel çekmeli tür).....	16
Şekil 3.8. Lazer ışını ile kaynak işlemi.....	18
Şekil 3.9. Elektro-cüruf kaynak metodu	19
Şekil 3.10. Aliminotermi ray kaynağı.....	20
Şekil 3.11. Nokta kaynak makinesi temel bileşenleri ve kaynak bölgesi	21
Şekil 3.12. Difüzyon kaynağı.....	22
Şekil 3.13. Patlamalı kaynağın şematik olarak gösterilişi	23
Şekil 3.14. Soğuk basınç kaynağının şematik görünümü	24
Şekil 3.15. Sürtünme karıştırma tekniği	25
Şekil 3.16. Sürtünme kaynağı işlemi	27
Şekil 3.17. Sürtünme kaynağı işlem basamakları.....	28
Şekil 3.18. Sürtünme kaynağının uygulanma şekilleri	29
Şekil 3.19. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı	30
Şekil 3.20. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı	30
Şekil 3.21. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı	31
Şekil 3.22. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı	32
Şekil 3.23. Klasik sürtünme kaynak parametreleri	32
Şekil 3.24. Volan tahrikli sürtünme kaynağı	33
Şekil 3.25. Volan tahrikli sürtünme kaynak parametreleri	34
Şekil 3.26. Sürtünme kaynak makinası	35
Şekil 3.27. Sürtünme kaynağı bağlantı tasarımları.....	42
Şekil 3.28. Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri.....	44
Şekil 3.29. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş dizel motor pistonu	45
Şekil 3.30. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş egzoz supapları	45
Şekil 3.31. Ticari araçlarda kullanılan, sürtünme kaynağı ve sıcak presleme uygulanmış “V” çeki kolları.....	46

Şekil 3.32. Ticari araçlarda sürtünme kaynağı uygulanmış çeki kolları	46
Şekil 3.33. Sürtünme Kaynağı ile imal edilmiş uçak parçası	47
Şekil 3.34. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parçalara örnekler	47
Şekil 3.35. Demir krom faz diyagramı	53
Şekil 3.36. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı	70
Şekil 3.37. Basma deneyi uygulanan sünek bir malzemede oluşan fiçilaşma,	72
Şekil 3.38. Darbe deney makinasının şematik resmi	73
Şekil 3.39. Burulma momenti- burulma açısı diyagramı	76
Şekil 3.40. a) Yuvarlak bir çubuğun burulmasının şematik gösterilişi;.....	77
Şekil 3.41. Burulmaya maruz kalan bir malzemede kayma gerilmelerinin gösterimi	78
Şekil 3.42. Burulma deneyinde numunede meydana gelen gerilme durumu	79
Şekil 3.43. a) Yuvarlak numunenin sünek kırılma şekli,	80
Şekil 3.44. Burulma sonucunda kırılan gevrek bir malzemenin kırılma biçiminin görünümü	80
Şekil 3.45. Sünek ve gevrek malzemelerin burulmalarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 3.46. Burulmaya maruz kalan bir numune	82
Şekil 3.47. Ankastre mesnetlendirilen mil	82
Şekil 3.48. Kesitteki kayma gerilmesi	83
Şekil 3.49. Burulma sonunda kare disk	84
Şekil 3.50. Mil üzerinde alınan disk	85
Şekil 3.51. Normal gerilmeye daha az mukavemetli olan mil	85
Şekil 3.52. İçi boş mil	86
Şekil 3.53. Dikdörtgenler prizmasının burulması.....	87
Şekil 3.54. Dikdörtgen kesitte gerilmelerin dağılışı	87
Şekil 3.55. Elipsin burulması	88
Şekil 3.56. Eşkenar üçgenin burulması.....	88
Şekil 3.57. Karenin burulması.....	88
Şekil 3.58. Daire kesitli olmayan bir profilin burulma animasyonu	89
Şekil 4.1. Sürtünme kaynak numunesi.....	91
Şekil 4.2. PLC kontrollü sürtünme kaynak makinesi	92
Şekil 4.3. Malzeme çiftinin aynalara bağlanma düzenini gösteren şematik resim.....	92
Şekil 4.4. Metalografik incelemeler öncesi C grubu numunesi	94
Şekil 4.5. Metalografik incelemelerde kullanılan numune	94

Şekil 4.6. Mikrosertlik cihazı	96
Şekil 4.7. Mikrosertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi.....	96
Şekil 4.8. Çekme deney numunelerine ait ölçüler	97
Şekil 4.9. Çekme deney numunesi.....	97
Şekil 4.10. Çekme deney cihazı	98
Şekil 4.11. Burulma deney numunelerine ait ölçüler	99
Şekil 4.12. Burulma deney numunesi	99
Şekil 4.13. A, B ve C gruplarına ait burulma deney numuneleri	100
Şekil 4.14. Burulma deney cihazı.....	100
Şekil 4.15. Burulma deney cihazına ait devir kolu.....	101
Şekil 5.1. A1 no'lu numuneye ait yüzey fotoğrafı	104
Şekil 5.2. B1 no'lu numuneye ait yüzey fotoğrafı.....	104
Şekil 5.3. C1 no'lu numuneye ait yüzey fotoğrafı.....	104
Şekil 5.4. AISI 420 çelik malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı	106
Şekil 5.5. AISI 4340 çelik malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı	107
Şekil 5.6. Sürtünme kaynaklı numunelerin mikroyapı değişimi	108
Şekil 5.7. A1 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri.....	109
Şekil 5.8. A1 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü	109
Şekil 5.9. A1 no'lu numunede EDS analizi yapılan noktalar.....	110
Şekil 5.10. A1 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi	111
Şekil 5.11. A1 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi	111
Şekil 5.12. A1 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi	112
Şekil 5.13. A1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği	112
Şekil 5.14. A2 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri.....	113
Şekil 5.15. A2 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü.....	113
Şekil 5.16. A2 no'lu numunede EDS analizi yapılan noktalar.....	114
Şekil 5.17. A2 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi	115
Şekil 5.18. A2 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi	115
Şekil 5.19. A2 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği	116
Şekil 5.20. A3 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri.....	116
Şekil 5.21. A3 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi	117
Şekil 5.22. A3 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi	118
Şekil 5.23. A3 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi	118

Şekil 5.24. A3 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği	119
Şekil 5.25. B1 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri	120
Şekil 5.26. B1 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi	121
Şekil 5.27. B1 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi.....	121
Şekil 5.28. B1 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi.....	122
Şekil 5.29. B1 no'lu numunenin 4 noktasından alınan EDS analizi.....	122
Şekil 5.30. B1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği.....	123
Şekil 5.31. B2 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri	124
Şekil 5.32. B2 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi.....	125
Şekil 5.33. B2 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi.....	125
Şekil 5.34. B2 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi.....	126
Şekil 5.35. B2 no'lu numunenin 4 noktasından alınan EDS analizi.....	126
Şekil 5.36. B2 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği.....	127
Şekil 5.37. B3 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri	128
Şekil 5.38. B3 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi.....	129
Şekil 5.39. B3 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi.....	129
Şekil 5.40. B3 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi.....	130
Şekil 5.41. B3 no'lu numunenin 4 noktasından alınan EDS analizi.....	130
Şekil 5.42. B3 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği.....	131
Şekil 5.43. C1 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri	132
Şekil 5.44. C1 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü.....	132
Şekil 5.45. C1 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi.....	133
Şekil 5.46. C1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği.....	134
Şekil 5.47. C2 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri	135
Şekil 5.48. C2 no'lu numunede EDS analizi yapılan nokta	136
Şekil 5.49. C2 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi.....	136
Şekil 5.50. C2 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği.....	137
Şekil 5.51. C3 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri	137
Şekil 5.52. C3 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü.....	138
Şekil 5.53. C3 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi.....	139
Şekil 5.54. C3 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği.....	140
Şekil 5.55. A1 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı	141
Şekil 5.56. A2 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı	142

Şekil 5.57. A3 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı	142
Şekil 5.58. A1, A2 ve A3 no'lu numunelerin kaynak bölgelerindeki mikrosertlik dağılımları	143
Şekil 5.59. B1 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı.....	144
Şekil 5.60. B2 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı.....	144
Şekil 5.61. B3 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı.....	145
Şekil 5.62. B1, B2 ve B3 no'lu numunelerin kaynak bölgelerindeki mikrosertlik dağılımları	145
Şekil 5.63. C1 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı.....	146
Şekil 5.64. C2 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı.....	147
Şekil 5.65. C3 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı.....	147
Şekil 5.66. C1, C2 ve C3 no'lu numunelerin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	148
Şekil 5.67. AISI 420 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	150
Şekil 5.68. AISI 4340 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	151
Şekil 5.69. A1 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	153
Şekil 5.70. A1 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	153
Şekil 5.71. A1 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları.....	154
Şekil 5.72. A2 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	155
Şekil 5.73. A2 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	156
Şekil 5.74. A2 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları.....	157
Şekil 5.75. A3 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	158
Şekil 5.76. A3 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	158
Şekil 5.77. A3 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları.....	159
Şekil 5.78. B1 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	161
Şekil 5.79. B1 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	162
Şekil 5.80. B1 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	163
Şekil 5.81. B2 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	164

Şekil 5.82. B2 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	164
Şekil 5.83. B2 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	165
Şekil 5.84. B3 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	166
Şekil 5.85. B3 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	167
Şekil 5.86. B3 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	168
Şekil 5.87. C1 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	169
Şekil 5.88. C1 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	170
Şekil 5.89. C1 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	171
Şekil 5.90. C2 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	172
Şekil 5.91. C2 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	172
Şekil 5.92. C2 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	173
Şekil 5.93. C3 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	174
Şekil 5.94. C3 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	175
Şekil 5.95. C3 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	176
Şekil 5.96. AISI 420 çeliğine ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	178
Şekil 5.97. AISI 4340 çeliğine ait burulma momenti-burulma açısı grafiği.....	179
Şekil 5.98. A1 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	181
Şekil 5.99. A1 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği	181
Şekil 5.100. A1 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	182
Şekil 5.101. A2 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	183
Şekil 5.102. A2 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği	184
Şekil 5.103. A2 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	185
Şekil 5.104. A3 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	186
Şekil 5.105. A3 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği	186

Şekil 5.106. A3 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	187
Şekil 5.107. B1 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	189
Şekil 5.108. B1 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	189
Şekil 5.109. B1 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	190
Şekil 5.110. B2 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	191
Şekil 5.111. B2 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	192
Şekil 5.112. B2 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	193
Şekil 5.113. B3 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	194
Şekil 5.114. B3 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	194
Şekil 5.115. B3 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	195
Şekil 5.116. C1 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	197
Şekil 5.117. C1 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	197
Şekil 5.118. C1 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	198
Şekil 5.119. C2 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	199
Şekil 5.120. C2 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	200
Şekil 5.121. C2 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	201
Şekil 5.122. C3 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	202
Şekil 5.123. C3 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği.....	202
Şekil 5.124. C3 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğraflar	203

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3. 1. Malzemeler ve sürtünme kaynağına uygunluğu	39
Tablo 3.2. Ferrit, östenit oluşturuıcı elementler ile nötr elementler ve etkileri	52
Tablo 3.3. I. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler	55
Tablo 3.4. II. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler	56
Tablo 3.5. III. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler	57
Tablo 3.6. AISI 200 ve 300 serisi östenitik paslanmaz çelikler	58
Tablo 3.7. Ticari olarak kullanılan dubleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	61
Tablo 3.8. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri	62
Tablo 3.9. Standart tip martenzitik paslanmaz çelikler	64
Tablo 3.10. Süper martenzitik paslanmaz çelik tipleri	65
Tablo 3.11. Martenzitik paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı mekanik özellikleri	66
Tablo 3.12. Martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.	67
Tablo 4.1. AISI 420 çeliğinin kimyasal kompozisyonu	91
Tablo 4.2. AISI 4340 çeliğinin kimyasal kompozisyonu	91
Tablo 4.3. Sürtünme kaynağında kullanılan parametreler.....	93
Tablo 4.4. A1 no'lu numunede devir sayısındaki artış ile aç ve burulma momentinde meydana gelen değişim.....	102
Tablo 5.1. A, B ve C grubu numunelerindeki boyca kısıalma miktarları	105
Tablo 5.2. AISI 420 çeliğine ait çekme deneyi sonunda elde edilen değerler.....	150
Tablo 5.3. AISI 4340 çeliğine ait çekme deneyi sonunda elde edilen değerler.....	151
Tablo 5.4. A, B ve C grubu numunelerine ait çekme deneyi sonucunda elde edilen değerler	152
Tablo 5.5 AISI 420 çeliğine ait burulma deneyi sonunda elde edilen değerler.....	178
Tablo 5.6. AISI 4340 çeliğine ait burulma deneyi sonunda elde edilen değerler	179
Tablo 5.7. A, B ve C grubu numunelerine ait burulma deneyi sonucunda elde edilen değerler.....	180

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, tarih boyunca gereksinim duyduğu araç ve gereçleri yapabilmek için bulduğu malzemelerin biçimlendirilmesi ile uğraşmışlardır; bu uğraş günümüzde de devam etmekte ve insanoğlu yaşadıkça da devam edecektir. Taş devrinde sorun, taşların seçilmesi ve yontulmasında; bronz ve demir çağının başında ise, bu malzemelerin bulunmasında ve biçimlendirilmesinde idi. Yüzyıllar boyunca metalsel malzemelerin elde edilmesi ve biçimlendirilmesi büyük emek ve masraf gerektirmiştir.

Metalleri biçimlendirme diğer bir ifade ile üretim yöntemleri genel olarak işlem prensibi açısından dört ana grup altında toplanabilir.

Metalin ergitilerek bir kalıbın içine dökülüp katılaştırılması; yani döküm teknolojisi, metal malzeme üzerine kuvvet uygulayarak biçimlendirme, plastik biçim verme teknolojisi, blok malzeme üzerinden parçacıklar kopararak işleme, talaşlı üretim teknolojisi ve parçaları birleştirerek bir bütün elde etmek, mekanik bağlama yöntemleri ile kaynak ve lehimleme teknolojileridir [1].

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte, farklı malzemelerin birleştirilerek kullanılması gereksinimi ortaya çıkmıştır. İki farklı alaşımdaki çeliğin birleştirilmesinde en uygun yöntemin kaynaklı birleştirme olduğu bilinmektedir [2].

Kaynak işleminin sonrasında, kaynak bölgesinin özelliklerinin, birleştirilen farklı alaşımdaki çeliklerin özelliklerinden doğal olarak farklı olması önemli sorunları gündeme getirmiştir. Çok değişik kaynak yöntemleri içerisinde ergitme kaynak yöntemlerinin kullanılması, bu sorunları daha da arttırmaktadır [3].

Kaynak sonrası oluşan bağlantının özelliklerinin belirlenmesinde, birleştirilen malzemelerin çeşitli özellikleri ile birlikte oluşturdukları faz diyagramları da önemli etkenlerdir. Bununla birlikte birleştirilecek malzemelerin birbirinden farklı alaşımlar olması, hatta bunların çok sayıda bileşenden oluşması sonucunda, öngörülebilmesi imkânsız problemlerle karşılaşmaktadır. Birleşme bölgesinde bağlantıyı oluşturan malzemelerin bileşimine ve bileşenlerine bağlı olarak, bileşim ve özellik bakımından çok farklı bölgeler ortaya çıkar [3].

Ergitme kaynak yöntemlerinin cüruf kalıntısı, porozite gibi kaynak hatalarına açık bir yöntem olması ve soğuma nedenli makro düzeyde iç gerilmelerin oluşması bu yöntemlerin önemli dezavantajları olup, kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Bu sebeple farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde eğer boyutları ve şekilleri müsaade ediyorsa,

bir ertitme olayının olmaması ya da sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve kaynak sonrası minimum i gerilmelere sahip olması nedenleriyle katı hal kaynak yöntemleri, ertitme kaynağı yöntemlerine büyük üstünlük sağlamaktadır [4]. Bu katı hal kaynak yöntemlerinden en önemlisi ve uygulanabilirliği en fazla olan sürtünme kaynağı yöntemi ile ilgili çalışmalar, değişik malzeme ve parametrelere göre, birçok bilim adamı tarafından gerçekleştirilmiştir [5].

2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

Bu konudaki ilk çalışmalar V.I. Vill tarafından yapılmıştır. V.I. Vill çalışmasında sürtünme basıncının bu kaynak çeşidinde büyük öneme sahip olduğunu görmüş ve sürtünme basıncının yaklaşık olarak 25 MPa alınması gerektiğini ileri sürmüştür. Bu çalışma, dönme hızının birleştirmeyi etkilemeden geniş bir aralıkta kullanılabileceğini vurgulamış ve kaynak kalitesinin artırılması için düşük dönme hızlarının daha yararlı olacağını belirtmiştir. V.I. Vill tarafından numune çapına bağlı olarak deneysel formüller önerilmiştir [6].

R.Y. Tylecote tarafından sürtünme basıncı, yığma basıncı ve dönme hızı en önemli üç parametre olarak belirlenmiştir. Bunlardan sürtünme basıncının temas yüzeyleri arasındaki yüzey sıcaklığını ve gerekli momenti etkilediği saptanmıştır [6].

P.Jenning yaptığı çalışmada, 19 mm çaplı Cr-Mo/Cr çelik çifti için kaynak öncesi ısı işlemler de uygulayarak, değişik tutulan kaynak parametrelerinde kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantılara eğme, çekme ve yorulma deneyleri uygulanarak bağlantının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada uygulanan kaynak parametreleri eğme deneyleri yardımıyla eğme açısı ve kırılma pozisyonu temel alınarak tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan çekme deneyleri sonrasında bütün kopmalar kaynak bölgesi dışında olmuştur. Kaynak sonrası numunelere uygulanan ısı işlemlerin çekme özellikleri üzerine önemli etkileri olmuştur. Ayrıca bu çalışmada düşük sürtünme basıncı yüksek yığma basıncı değerleri en iyi çekme özelliklerini vermiştir [6].

K.G.X. Murti ve S. Sundaresan isimli araştırmacılar 22 mm çaplı HSS (Yüksek Hız Çeliği)- C45 (Orta Karbonlu Çelik) çelik çiftleri, sürtünme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi optimize edilen şartlarda yapılmıştır. Birleştirmelere ısı işlenmiş uygulanmış ve birleştirme performansı dinamik burulma altında incelenmiştir. Kaynak ve ısı işlem süresince oluşan yapısal değişiklikler, metalografik inceleme ve sertlik testi yapılarak araştırılmıştır. Deneyler kaynağa yakın C45 tarafında kaynak süresince karbonsuzlaşma oluşmasına rağmen, birleştirme özelliklerinin yeterli olduğu görülmüştür [6].

Ellis, literatüre dayanarak yapmış olduğu sürtünme kaynaklı bağlantılarda kaynak kalitesini etkileyen parametrelerin; sürtünme basıncı, dönme hızı, sürtünme süresi ve yığma basıncına bağlı olduğunu belirtmiştir. Ara yüzey sıcaklığı ve buna bağlı bağlantı kalitesi üzerine en etkin parametrenin dönme hızı olduğunu ileri sürmüştür. Isıtma

süresinin, sürtünen yüzeyleri temizleyecek ve katı hal kaynağı için gerekli plastisiteye ulaşabilecek düzeyde olması gerektiğini vurgulamıştır [7].

Gürleyik, çalışmasında üretim yöntemleri içinde sürtünme kaynağının, genellikle düşük maliyetler çıkarmasına rağmen tasarım ve imalatla çok tercih edilmediğine işaret etmiştir. Çalışma dökme demir çiftlerinin sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesine ait bazı uygulama örneklerini kapsamaktadır [6].

Yılbaş vd. çelik-alüminyum ve alüminyum- bakır çubuk malzeme çiftlerini sürtünme kaynak yöntemi kullanarak birleştirmişlerdir. Hazırladıkları numunelere yorulma, çekme ve çentik darbe deneyleri uygulayarak, üç temel parametre olan dönme hızı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin kaynak kalitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarını deneysel ve istatistiksel olarak değerlendirmişlerdir. Araştırmalarının sonucunda, çelik-alüminyum kaynaklı birleştirmelerde yüksek dönme hızı ve sürtünme basıncının bir sonucu olarak meydana gelen aşırı deformasyon ile birlikte birleşme bölgesinin alüminyum tarafında ince bir intermetalik tabakanın oluştuğunu bildirmişlerdir. Ancak, temas yüzeyi üzerindeki alüminyum oksit filminin kırılması ve arayüzeyde yeterli deformasyonun oluşabilmesi için yüksek dönme hızı ve yüksek sürtünme basıncı kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır [6].

Meriç vd. çalışmalarında SAE 1025, SAE 1035, SAE 1043, 25CrMo4, S460N malzemelerinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğini araştırmışlardır. Bu malzemelerin kaynak bölgesinin metalürjik yapısı ve mekanik özelliklerini ele almışlardır. Kaynak bölgesinin mikrosertlik dağılımını ve içyapılarını incelemişlerdir. Birbirine oranla biri diğerinden daha sert yapıya sahip malzeme çiftlerinin sürtünme kaynağında, sert malzemede plastik deformasyonun daha az olduğunu, yumuşak malzemede ise daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun ise malzeme kaybının hangi malzemede oluşacağını önceden belirlemek ve buna göre kaynaktaki malzemelerin durumunu ve yerini belirlemek açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır [8].

Taşkın vd. yaptıkları çalışmada AISI 430 ve AISI 1010 çelik çiftini farklı devir ve farklı sürtünme basıncı kullanarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde birleştirmişlerdir. Mikroyapı ve mikrosertlik analiz sonuçlarından, bütün kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikte önemli farklılıklar gözlemlemekle beraber, artan devir sayısına bağlı olarak ITAB'nin genişlediğini ve aşırı deformasyona uğramış bölgede sertliğin azaldığını görmüşlerdir. Ancak, artan devir sayısına paralel olarak birleşme arayüzeyinde ulaşılan sıcaklığın artması ile birlikte,

viskoz haldeki malzemenin dışarı taşma miktarında artış kaydedilmiş olup, aşırı deformasyona uğramış bölgenin daraldığını görmüşlerdir [9].

Uzkut vd. yaptıkları çalışmada, supap imalatında kullanılan iki farklı çeliği sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirip mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda numunelerde standart kalınlıkta ITAB ve mekanik yönelmeler ile bu yönelme hatları boyunca karbür oluştuğunu belirlemişlerdir [10].

Çalığülü vd. çalışmalarında AISI 420/AISI 1010 çelik çiftinde çevresel hızın mikroyapı özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Artan devir sayısına paralel olarak karşılıklı bölgelerde difüzyonun arttığı ve buna paralel olarak tamamen deforme olmuş bölgenin de genişlediğini görmüşlerdir ve en düşük devir sayısında deforme olmamış bölgedeki tane sayısının deforme olmuş bölgenin tane sayısı ile yaklaşık olarak aynı oranda olduğunu, en yüksek devir sayısında bu oranın; deforme olmayan bölgede aynı kalırken, kısmen deforme olmuş bölgede arttığını gözlemlemişlerdir [11].

Şahin ve Akata yaptıkları çalışmada plastik deformasyona uğramış çelik çubukların sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Sonuç olarak plastik deformasyona uğramış çeliklere sürtünme kaynağının rahatlıkla uygulanabileceğini görmüşler ve bağlantıların kaynak dayanımının iki sebep nedeniyle önceki plastik deformasyondan etkilenmediğini belirtmişlerdir. İlk sebep olarak plastik deformasyonun sürtünme kaynağındaki sürecinin önceki plastik deformasyonun derecesinden daha uzun olması, İkinci sebep olarak da önceki plastik deformasyonun etkilerinin kaynak bölgesindeki yüksek sıcaklık nedeniyle kaynak bölgesinden uzaklaştırılmış olmasını ileri sürmüşlerdir [12].

P.sathiya vd. çalışmalarında ferritik ve östenitik paslanmaz çelikleri sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir ve bu bağlantıların mikroyapılarını ve mekanik karakteristiklerini inceleyerek, ergitme kaynağı ile meydana gelen problemlerin katı hal kaynak yöntemi ile minimize edildiğini ve bu sebeple ergitme kaynağından daha iyi mekanik ve metalürjik karakteristiğe sahip olduğunu belirtmişlerdir [13].

N. Özdemir ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AISI 304L ve AISI 4340 çeliğinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesinde arayüzey özelliklerine devir sayısının etkilerini incelemişlerdir ve plastik deformasyon bölgesinin genişliğinin kaynaklı numunelerin çekme kuvvetinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve devir sayısının artması ile çekme kuvvetinin artacağını vurgulamışlardır [14].

Şahin ve arkadaşları sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 1040 çeliğinde mekanik özelliklerin karakterizasyonunu incelemişlerdir. İlk olarak uygun parametreleri elde edip, sonrasında bu numunelere çekme testi, yorulma testi, çentik darbe testi ve sertlik testleri uygulamışlardır. Sonuçta kaynaklı parçaların hem statik hem de dinamik olarak yüklenebileceği kanısına varmışlardır. Ara yüzeydeki deformasyonun tane büyüklüğünde güçlü bir artışa sebep olduğunu bu yüzden kaynak ara yüzeyindeki sertliğin deformasyon tarafından arttığını düşündüklerini belirtmişlerdir [15].

N. Özdemir yaptığı çalışmada AISI 304L ve AISI 4340 çelik çiftini farklı devir sayılarında sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirerek bu malzeme çiftinin kaynak sonrası mekanik özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak yüksek dönme hızı ve daha kısa sürtünme süresi kullanıldıkça bu numunelerin çekme mukavemetinin arttığını belirlemiştir ve yeterli mukavemete sahip bir kaynak elde edebilmek için devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncının mümkün olduğu kadar yüksek olmalıyken sürtünme süresinin mümkün olduğu kadar düşük olması gerektiğini gözlemlemiştir [16].

Şahin, yüksek hız çeliği ve orta karbonlu çeliği sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Sürtünme süresi ve basınç arttıkça bağlantının çekme mukavemetinin artacağını belirtmiştir. Kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemetinin çekme özellikleri ile benzer davranışlar gösterdiğini belirtmiş ve bu kaynaklı parçaların dinamik yük altındaki makine elamanları için uygun olduğunun kanısına varmıştır [17].

3. TEMEL BİLGİLER

3.1. Kaynağın Tanımı ve Sınıflandırılması

Kaynak, birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini birden kullanarak, aynı türden bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmektir [18].

Kaynak uygulanacağı malzemenin cinsine göre, metal kaynağı ve plastik malzeme kaynağı olarak ele alınır.

Metal kaynağı: Metalik malzemeyi ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak ve aynı cinsten ve erime aralığı aynı veya yaklaşık bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye “metal kaynağı” adı verilir. İki parçanın birleştirilmesinde ilave bir malzeme kullanılırsa, bu malzemeye “ilave metal” adı verilir.

Plastik malzeme kaynağı: Aynı veya farklı cinsten termoplastik (sertleşmeyen plastik) malzemeyi ısı ve basınç kullanarak ve aynı cinsten bir plastik ilave malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye, “plastik malzeme kaynağı” adı verilir [1].

Kaynak işlem cinsine göre ergitme kaynağı ve katı hal kaynağı olarak iki şekilde sınıflandırılır.

3.1.1. Ergitme Kaynağı ve Ergitme Kaynak Yöntemleri

Malzemeyi yalnız sıcaklığın tesiri ile bölgesel olarak (sınırlandırılmış bir kısmını) eritip, bir ilave metal katarak veya katmadan birleştirmektir.

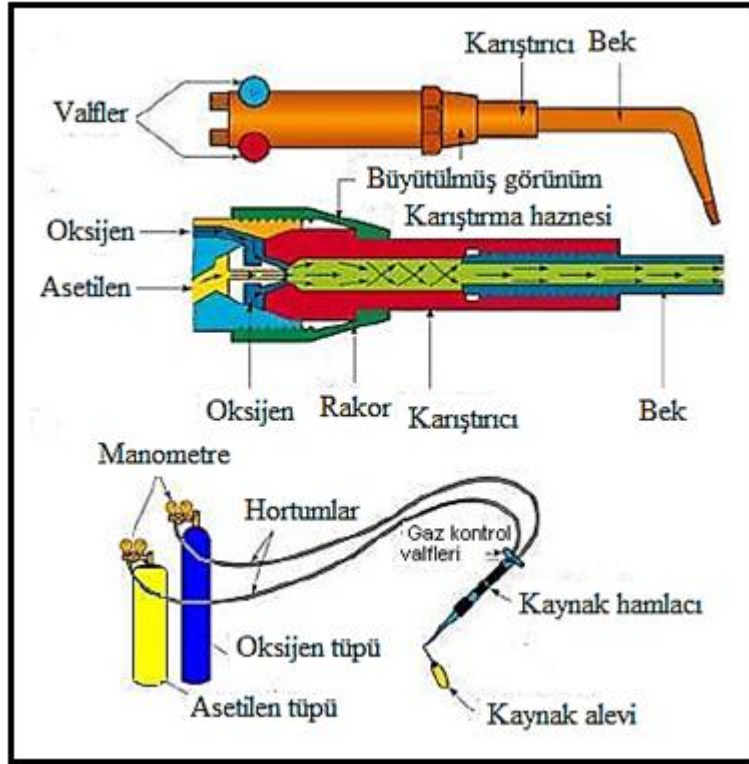
3.1.1.1. Gaz Ergitme (Oksi-Asetilen) Kaynağı

Tüm kaynak yöntemlerinde, işlemi gerçekleştirebilmek için bir kaynak enerjisine, bu enerjiyi üretmek ve kaynak bölgesine taşımak için bir donanıma ve gerektiğinde de kaynak ağzını doldurmak için bir ek kaynak metaline gereksinim vardır.

Bir yanıcı gaz ile oksijenin oluşturduğu alevin enerjisinden yararlanarak gerçekleştirilen ergitme kaynağına, “gaz ergitme kaynağı” adı verilir.

Bu yöntemde parçaların kaynaklanacak yüzeyleri alev yardımı ile ertitilir ve gerektiğinde kaynak bölgesine ek kaynak metalini de katılarak bir basınç uygulanmadan katılaşmaya bırakılarak bağlantı gerçekleştirilir.

Şalümo, hamlac veya üfleç adı verilen yakıcıya, yanıcı gaz ve oksijen iki ayrı hortum tarafından iletilir, üfleçte bu gazlar istenen oranda karıştırılıp üflecin bek kısmından dışarı çıkar ve orada yanarak kaynak için gerekli alevi oluşturur. Kaynak alevi gerek iş parçasını ve gerekse de ek kaynak metalini ertitebilecek güçtedir. Ek kaynak metalini gerektiğinde bir tel çubuk halinde kaynak bölgesine kaynakçı tarafından ilave edilir. Bu durumda kaynak bağlantısının ertimiş bölgesi esas metal ve ek kaynak metalinin karışımından oluşur. Gaz ertitme kaynağının şematik resmi Şekil 3.1’de verilmiştir.



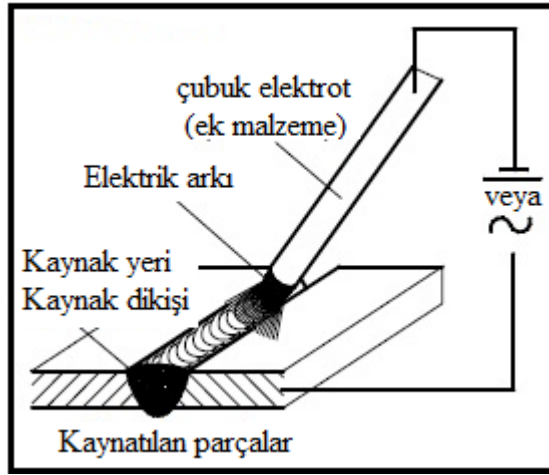
Şekil 3.1. Gaz ertitme (oksi-asetilen) kaynağı [19].

Gaz ertitme kaynak yöntemi ince saclar, küçük çaplı borular ve tamir işleri için çok uygun bir yöntem olup, tamir işleri dışında kalın kesitli parçaların kaynağı için uygulanması ekonomik değildir [18].

3.1.1.2. Elektrik Ark Kaynağı

Kaynaklı bağlantı için gerekli ısının elektrotlar arasında oluşturulduğu ve ark vasıtasıyla sağlandığı eritme kaynağı türüne “elektrik ark kaynağı” adı verilir.

Elektrik ark kaynağının ilk uygulaması, bir karbon elektrot ile iş parçası arasında ark meydana gelmesi biçiminde olmuştur. Bernardos usulü olarak bilinen bu uygulamada, bir de ilave metal kullanılmıştır [1]. Elektrik ark kaynak yönteminin şematik resmi Şekil 3.2’de verilmiştir



Şekil 3.2. Elektrik ark kaynağı [20].

Bu yöntemde kaynakçı birleşme çizgisinde esas metal ile elektrot ucu arasında bir ark oluşturur. Ark, kaynak banyosunu oluşturmak üzere esas metali ve elektrodu eritir. Kaynak banyosu elektrottaki örtü nedeniyle oluşan erimiş cüruf tabakası ve gaz tarafından korunur. Kaynak sırasında elektrot eridiğinden kaynakçı ark boyunu sabit tutmak için elektrodu kaynak banyosuna doğru sürekli hareket ettirir. Akım, güç ünitesi yoluyla kontrol edilir. Elektrotlar normalde 450 mm boyundadır. Elektrodun uzunluğu 50 mm’ye düştüğünde ark söndürülür. Katılaşmış cüruf yüzeyden uzaklaştırılır ve kaynağa yeni bir elektrotla devam edilir.

Basınçlı kapların, gemilerin, çelik yapıların imalatı, boru tesisatlarının bağlantıları ve makinaların imalat ve tadilatında bu yöntem sıklıkla kullanılır [45].

3.1.1.3. Tozaltı Kaynak Yöntemi

Bu kaynak yönteminde, bir bobinden sağılan kaynak teli bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir temas memesinden geçerek kaynak bölgesine gönderilir; gerekli akımı temas memesinden alan tel ile iş parçası arasında ark oluşur ve ayrı bir kanaldan gelen silikat ve toprak alkali metalleri içeren özel bir toz ark bölgesini havanın olumsuz etkilerinden korur. Kaynak teli ve iş parçası arasında oluşan arkın sıcaklığından tel ve esas metalin bir bölümü ergiyerek istenen birleşmeyi sağlar. Ark bir toz örtüsü altında bulunduğundan çevreye ışıyım yapmaz ve bu şekilde ark enerjisinin büyük bir bölümü (yaklaşık olarak %64'ü) doğrudan doğruya kaynak için tüketilmiş olur. Tozaltı kaynak yöntemi Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Tozaltı kaynağı [21].

Arkın sıcaklığında bir miktar toz da ergiyerek dikişi örten bir cüruf durumuna geçer ve bu cüruf henüz çok sıcak olan kaynak dikişini ve banyoyu atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, içerdiği dezoksidan ve alaşım elementleri yardımıyla da kaynak banyosunun dezoksidasyonunu ve kaynak metalinin alaşımlanmasını gerçekleştirir.

Tozaltı kaynak yönteminde, tel elektroda uç kısmına yakın bir yerden ve özel bir bakır temas memesi tarafından akım verildiğinden, çok yüksek akım şiddetlerine çıkmak olanağına erişilir. Bu bakımdan tozaltı kaynak yöntemi çok güçlü bir kaynak yöntemidir ve bir paso ile takriben 85 mm ve iki paso ile 180 mm'ye kadar kaynak yapabilme olanağı sağlar. Akım şiddetinin yüksekliği büyük bir kaynak banyosu oluşturur ve önceden düşünülemeyecek derecede derin bir nüfuziyet sağlar.

Tozaltı kaynak kafası olarak adlandırılan, toz hunisi, meme, tel iletme mekanizması ve ayar kumanda grubu, özel raylar ve palet üzerinde hareket eden bir arabaya monte edilmiştir; arabanın hızı kaynak işlemi boyunca sabit tutulur, bazı

durumlarda da tozaltı kaynak kafası sabit tutulur ve parça belirli bir hızla hareket ettirilir; silindirik kapların çevre dikişlerinde bu ikinci yöntem uygulanır. Kaynak hızının sabit tutulamaması durumunda dikiş homojen kesitte oluşamaz ve kaynak hataları ortaya çıkar, çünkü akım şiddeti, ark gerilimi, toz miktarı ve kaynak hızı birer bağımsız parametre değildir, iyi bir kaynak bağlantısı bunların birlikte ayarlanması sonucu elde edilir [18].

3.1.1.4. Gazaltı Kaynak Yöntemleri

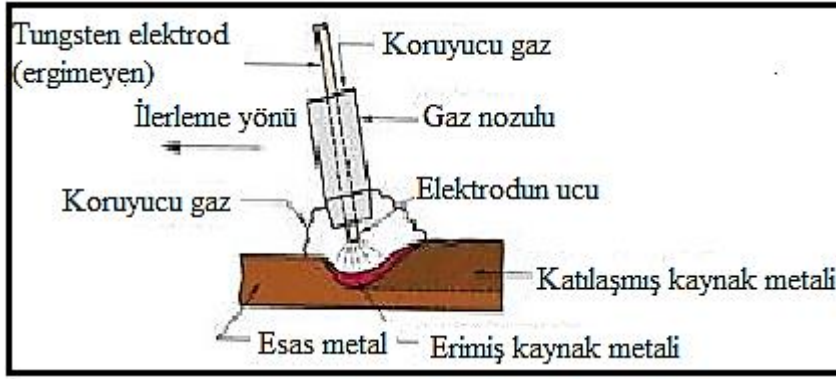
Örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağında, elektrot örtüsünün görevlerinden en önemlisi ve vazgeçilmez olanı, bir koruyucu gaz atmosferi oluşturarak, kaynak banyosunu havanın oksijen ve azotunu olumsuz etkilerinden korumasıdır. Kaynak bölgesinin bir gaz atmosferi tarafından korunduğu ergitme kaynak yöntemleri genel olarak “gazaltı kaynak yöntemleri” olarak adlandırılır.

3.1.1.4.1. Ergimeyen Elektrod ile Gazaltı (TIG) Kaynak Yöntemi

Tungsten Inert Gas kelimelerinin ilk harflerinden oluşmuş TIG kelimesi ile anılan yöntem ilk olarak 1930’lu yılların ortalarında denenmiş ve ABD’de II. Dünya Savaşı sırasında özellikle alüminyum alaşımlarının ve paslanmaz çeliklerin kaynağında yoğun bir biçimde uygulanmıştır.

Bu yöntemde kaynak için gerekli olan ısı enerjisi bir tungsten elektrot ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı tarafından sağlanmakta ve kaynak bölgesi de havanın olumsuz etkilerinden elektrot ile merkezlenmiş konumda bulunan bir lüleden (nozül) gönderilen bir koruyucu gaz (helyum, argon veya bunların karışımı) ile korunmaktadır.

TIG kaynak yöntemi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir, kaynakçı tarafından kullanılması kolaydır, prensip olarak gaz ergitme kaynağını andırır, yalnız torç biraz değişiktir, yanıcı ve yakıcı gaz yoktur, ısı enerjisi elektrik arkı tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 3.4. Tungsten Inert Gas (TIG) kaynağı [22].

Bu yöntemde, ergimeyen bir elektrot kullanıldığı için kıvrık alın kaynak ağzı hazırlanmış ince parçalar, ek kaynak metaline gereksinim göstermeden birleştirilebilir; gerektiğinde esas metalin ergitilerek, ek kaynak metaline olan gereksinimini ortadan kaldırması da yöntemin göz önüne alınması gereken üstünlüklerinden bir tanesidir. Kaynak bağlantısı için ek metal gerektiğinde, aynen oksî-asetilen yönteminde olduğu gibi, bir tel çubuk biçimindeki kaynak metali kaynakçı tarafından kaynak bölgesine sokulmaktadır. TIG kaynak yönteminin şematik resmi Şekil 3.4’de verilmiştir.

TIG kaynak yönteminin diğer bilinen ve endüstride yaygın uygulanan ergitme kaynağı yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü, ısı girdisinin ve ergiyen ek kaynak metali miktarının birbirlerinden bağımsız oluşudur. Bu önemli özellik, yöntemin çok ince parçalara uygulanabilmesine olanak sağlamakta, kök pasoların çekilmesinde, pozisyon kaynaklarında ve tamir işlerinde de kaynakçıya büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

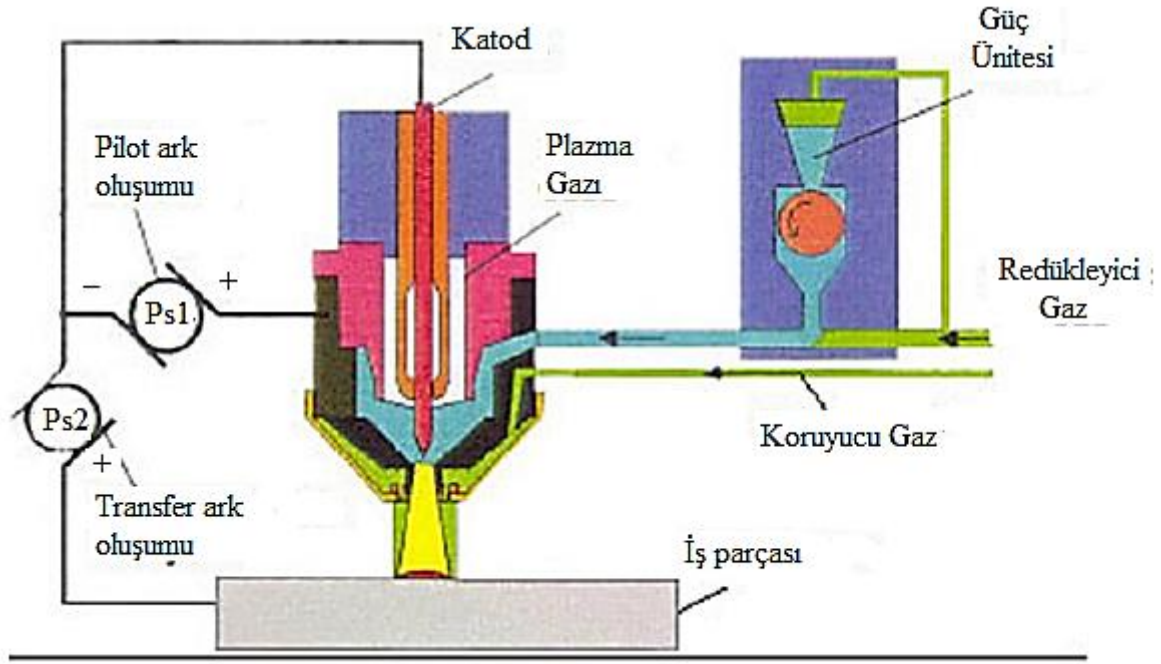
TIG kaynak yöntemi, her pozisyonda ve prensip olarak da her kalınlıktaki parçalara uygulanabilir ise de, çok kalın parçalar için işlem süresinin uzaması yöntemin ekonomikliğini yitirmesine neden olmaktadır, bu bakımdan 7 mm’den kalın parçaların kaynağı için önerilmez; bununla birlikte yüksek kalite ve kaynak güvenliğinin gerekli olduğu uçak ve uzay endüstrisinde çok pasolu kaynak uygulanarak bu olumsuzluğun etkisi azaltılmaya çalışılır. Akım şiddeti azaltılarak diğer ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi olanaksız olan 0.1 mm kalınlığına kadar ince saclar bu yöntem ile çok sağlıklı olarak birleştirilebilmektedir [18].

3.1.1.4.2. Ergimeyen Elektrod ile Gazaltı Plazma Ark (PA) Kaynak Yöntemi

Fizikte partiküller, iyonlar ve elektronlardan oluşmuş, elektriği ileten, maddenin özel bir hali olarak tanımladığımız plazma, kaynak teknolojisinde daha özel bir durumu tanımlamaktadır. Gaz halindeki bir madde radyasyon, elektron bombardımanı veya ısıtma ile iyonize konuma getirilebilir.

Kaynakta kullanılan plazmada gaz, elektrik arkı yardımı ile ısıtılarak iyonize olmaktadır. Bu tanıma göre, ark kaynağı yöntemlerinde elektrik arkı bir plazma oluşturmaktadır. Kaynak ve ısı kesme işlemlerinde plazma olarak adlandırılan ark “radyal doğrultuda sıkıştırılıp, büzülerek enerji yoğunluğu arttırılmış ark” tır.

Standart bir plazma ark torcu, ucunda küçük bir deliği bulunan meme ile bu memenin merkezindeki ergimeyen tungsten bir elektrodan oluşmaktadır. Plazma gazı, bu iç içe geçmiş dairesel meme ile elektrot arasından geçerek dışarıya çıkar. Elektrot ile meme veya iş parçası arasında ark sütunu oluştuktan sonra, basınçlı plazma jetinin oluşturulması için iyonize olan gaz delikten püskürtülür (Şekil 3.5). Ark sütununun dış yüzeyi soğutulduğundan sütun yoğunlaşmış olur, dolayısı ile içe doğru büzülür. Böylece, büzülmüş sütun içinde sıcaklık birden bire 10 000- 30 000 °K arasında bir sıcaklık derecesine yükselir. Dairesel alandan geçen gaz, yüksek bir iyonlaşma düzeyine ve göreceli olarak yüksek bir enerjiye sahip olup bu enerji, kaynak ve diğer işlemlerde iş parçasının tavlama sırasında kullanılır. Uygulamada plazma arkı çeşitli yollarla oluşturulabilir. Elektrik devresi tungsten elektrot ile iş parçası arasında tamamlanarak, ark akımı iş parçası üzerinden akar. Bu transfer olmuş ark veya doğrudan ark olarak adlandırılır. Elektrik devresi meme ve tungsten elektrot arasında tamamlanırsa; ark elektrodla, su ile soğutulan bakır meme arasında yanar ve memeden bir gaz akımı ile zorlanarak sürülür. Transfer olmamış ark veya endirekt ark olarak adlandırılan bu düzenlemede iş parçası ark devresi içinde değildir. Her iki arkın kombinasyonunu kullanan bir diğer yöntem daha vardır, bu da en çok metal tozu püskürtme uygulamalarında kullanılır.



Şekil 3.5. Plazma ark kaynağı [23].

Plazma arkı memeden dışarı çıktığında, biraz daha küçük parlak bir nüveye sahiptir. Nüvenin çevresi, daha az parlak kılıfla sarılmıştır. Nüve uzunluğu, 2-3 mm'den 40-50 mm'ye kadar değişir. Bu değişim meme ve tünelin boyutlarına, plazma oluşturan gazın bileşim ve debisine, akım şiddetine, ark uzunluğuna bağlıdır. İş parçası üzerindeki mekanik ve ısı yükünün dağılımı için uygun biçimlendirilmiş memeler kullanılarak, plazma arkı şekillendirilir.

Plazma ark kaynak yöntemi, üretim kaynağı olarak uzay endüstrisi, havacılık ve nükleer endüstrilerinde çok yaygın kullanıma girmiştir. Özellikle dikiş kalitesi ve güvenilirliği ve ekonomiklik açısından kabul edilen bir yöntemdir. TIG yöntemi ile kaynak edilebilen tüm metal ve alaşımları plazma ark kaynağı ile de güvenilir bir biçimde kaynak edilirler.

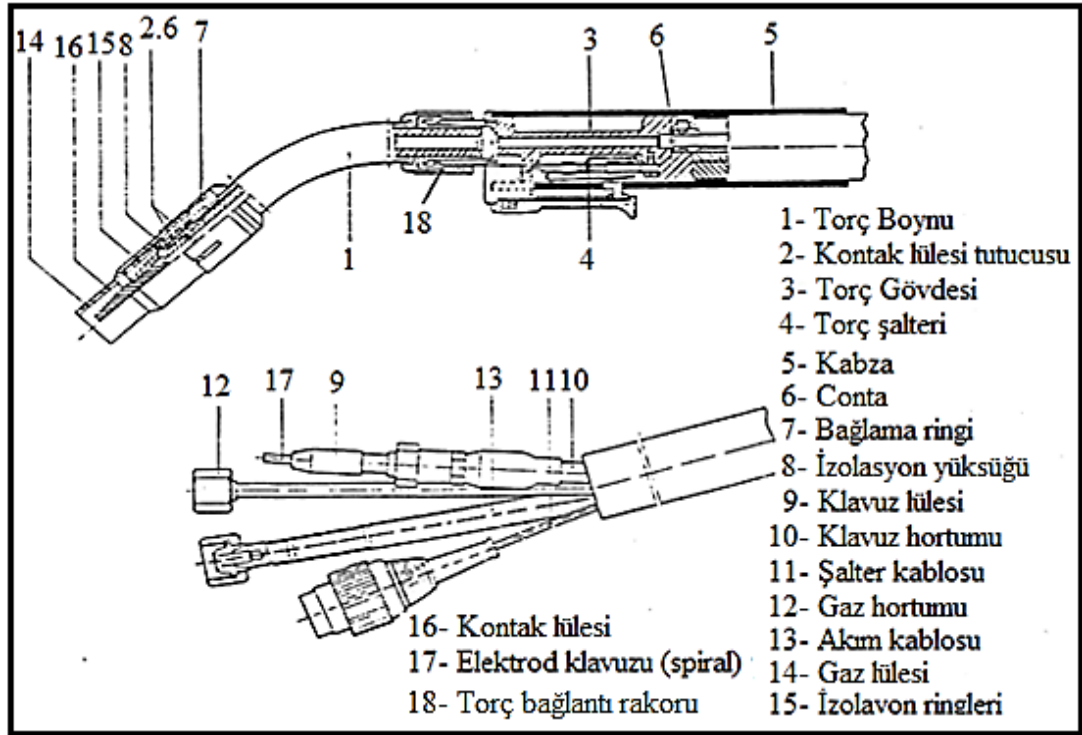
Plazma arkı ile kaynakta iki teknik çok sıkı kullanılır. Bunlar ergitme tekniği (melt_in mode) ve anahtar deliği tekniği (key hole mode) olmaktadır [18].

3.1.1.4.3. Ergiyen Elektrod ile (MIG-MAG) Gazaltı Kaynak Yöntemi

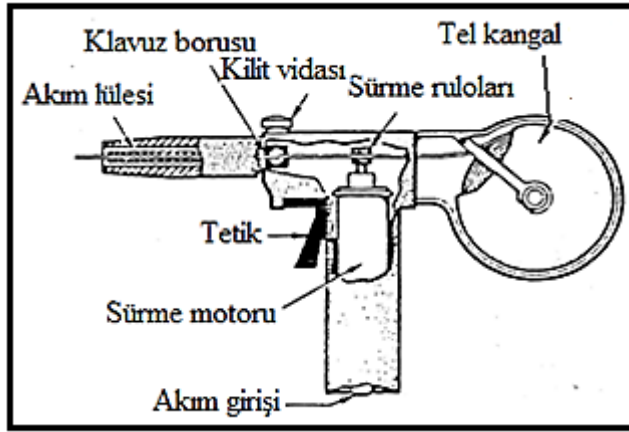
Yapılan araştırmalar sonucu geliştirilmiş ve ilk kez 1948 yılında ABD'de alüminyum ve alaşımlarının sonra da sırası ile yüksek alaşımlı çeliklerin, bakır ve alaşımlarının,

karbonlu çeliklerin kaynağında uygulanmış olan MIG (Metal Inert Gas) kaynak yönteminde de ark helyum ve argon gibi soy bir gazın koruması altında yanar; bu yöntemin TIG yönteminden farkı, arkın iş parçası ile kaynak metali gereksinimini de karşılayan sürekli beslenen ergiyen bir elektrod arasında oluşturulmasıdır. MIG-MAG kaynak yönteminin şematik resmi Şekil 3.6'da, MIG tabancasının şematik resmi ise Şekil 3.7'de verilmiştir.

Ergiyen elektrot ile gazaltı kaynağı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir, çok ince levhalar hariç, her kalınlıktaki demir esaslı ve demir dışı metal ve alaşımların kaynağında uygulanabilmektedir. Yatay karakteristikli, diğer bir deyimle sabit gerilimli kaynak makinelerinin gelişmesi sonucu ince çaplı kaynak teli ile yüksek akım şiddeti uygulama olanağı, ısıdan etkilenen bölgesi (IEB) daha dar ve daha derin nüfuziyetli kaynak bağlantılarının eldesine olanak sağlamıştır.



Şekil 3.6. Hava soğutmalı torç kesiti ve torç bağlantı paketi [24].



Şekil 3.7. Hava soğutmalı MIG tabancası (tel çekmeli tür) [24].

Bu yöntemin uygulanması çok basittir, operatör hiçbir zorlukla karşılaşmaz; toprak kablosunu iş parçasına bağlayıp, torcun ucundaki tel elektrodu kaynak ağzına değdirmek yeterli gelmektedir, torç önceden belirlenmiş bir debide koruyucu gazı ve eriyen elektrot miktarını karşılamak üzere, sabit hızda tel elektrodu bölgeye göndermekte, sistem uygun ark boyunu, kendisi otomatik olarak ayarlamakta ve sabit tutmaktadır.

Uygulama kolaylığı nedeniyle tüm demir dışı metal ve alaşımlarının kaynağında çok popüler ve aranan bir yöntem haline gelen MIG yönteminin başlangıçta sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde uygulama alanı bulamamasının nedeni soy gazın pahalılığı olmuştur.

Bilindiği gibi sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin örtülü elektrot ile kaynağında ark bölgesi, örtünün yanması ve ayrışması sonucu ortaya çıkan CO₂ tarafından havanın olumsuz etkilerinden korunmaktadır; bu olaydan hareket edilerek CO₂'nin koruyucu gaz olarak kullanıldığı ilk denemeler iyi sonuç vermemiş, çok fazla sıçrıntı ve dikişte aşırı gözeneklilik ile karşılaşmıştır. Araştırmalar bunun nedeninin CO₂'nin safiyetsizliği ve içerdiği rutubet olduğunu ortaya koymuştur.

1950'li yılların sonlarına doğru özellikle otomobil endüstrisinde, tam otomatik olarak çalışan, yüksek ergime güçlü, çok hızlı ve sadece yatay pozisyonda çalışabilme olanağı ve fazla miktarda sıçrama oluşması araştırmacıları bu doğrultuda çalışmalara yöneltmiştir.

CO₂ gibi aktif bir koruyucu gaz altında yapılan bu kaynak yöntemine de Metal Active Gas kelimelerinin baş harfinden yararlanılarak MAG yöntemi adı verilmiştir [18].

3.1.1.5. Elektron Işın Kaynağı

Modern fizikteki ilerlemeler, elektronların enerjilerinden bilim ve teknolojinin birçok alanında yararlanmayı olanaklı konuma getirmiştir. Elektron ışının etkileri; elektron mikroskoplarında, elektron çoğaltıcılarında, X- ışını tüplerinde, kütle spektrometrelerinde ve diğer birçok alet ve ekipmanda kullanılmaktadır.

Günümüzde kullanılan elektron ışın kaynağının ilk endüstriyel uygulamaları 1950’li yılların sonlarında gerçekleştirilmiştir, yöntem endüstri tarafından çabuk kabul edilmiş ve başta nükleer endüstrisi olmak üzere uçak ve uzay endüstrilerinde üretim maliyetlerini azaltıcı etkisi ile yaygın uygulama alanı bulmuştur.

Esas olarak, elektron ışın kaynağı, elektronların yüksek vakum altında hızlandırılmaları sonucu kazandıkları kinetik enerji kullanılarak yapılır. Elektronlar, metal yüzeyine çarptıkları zaman enerjilerinin büyük bir bölümünü ısı olarak vereceklerinden metal ergir. Bu nedenle elektron ışın kaynağı uygun biçimde odaklanmış ve ergime sağlayacak kadar enerji kazandırılmış (hızlandırılmış) elektron ışın demetinin metale çarparak durmaya zorlanması prensibine dayanır.

Elektron ışını ile yapılan kaynağın ilk endüstriyel uygulamaları, reaktör tekniği, uzay araçları yapımı, elektronik endüstrisindeki mikro kaynak uygulamaları gibi yeni açılan alanlarda kendisini göstermiştir. Bu teknolojilerde kullanılan özel malzemelerin işlenmesi şimdiye kadar kullanılan alışılmış kaynak yöntemleriyle doyurucu bir şekilde yapılamamış ve parçaların şekillendirilmesi genellikle zor olmuştur.

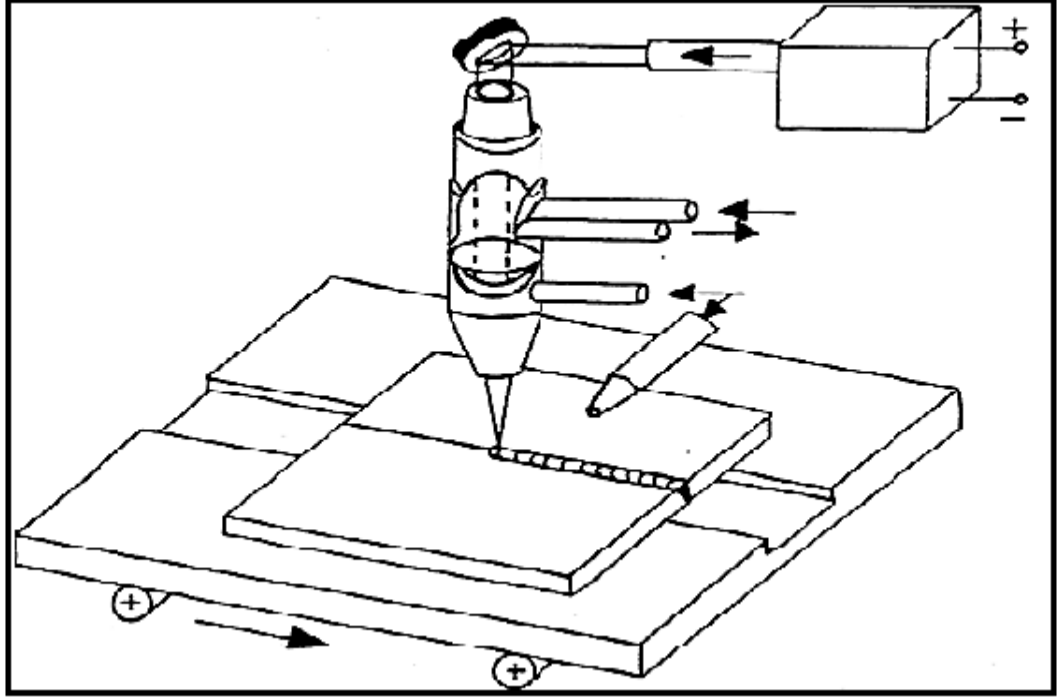
Yöntemin diğer ergitme kaynak uygulamalarına tercih edilmesinde başlıca etkenler; şekil ve boyutsal hassasiyet, birleştirmede ulaşılan mukavemet, kaynak kabiliyeti eş ya da farklı malzemelerin birleştirilmesine yatkınlık, çok az açılma çarpılma ve diğer koşullara bağlı olarak ortaya çıkan ekonomiklik şeklinde özetlenebilir [18].

3.1.1.6. Lazer Işını ile Kaynak

Lazer ışını ile kaynak, monokromatik ışınların yüksek enerjilerinden yararlanılarak malzemelerin bir kısmını ergitilmesi ve buharlaşması esasına dayanmaktadır. Dikiş oluşumunun mekanizması elektron ışın kaynağına benzer şekildedir.

Teknikte bu yöntemden, kaynak işlemlerinin yanı sıra kesme, delme ve ısıtma işlemlerinde de yararlanılmaktadır. İşlemler karakteristik olarak, metal esaslı ve metalsel

olmayan malzemelere uygulanabilmesi dışında, ısıdan etkilenen bölgelerin diğerleri ile kıyaslanamayacak derecede dar olması ve ulaşılan yüksek hızları ile dikkat çekmektedirler. Lazer ışını ile kaynak yönteminin şematik resmi Şekil 3.8’de verilmiştir.



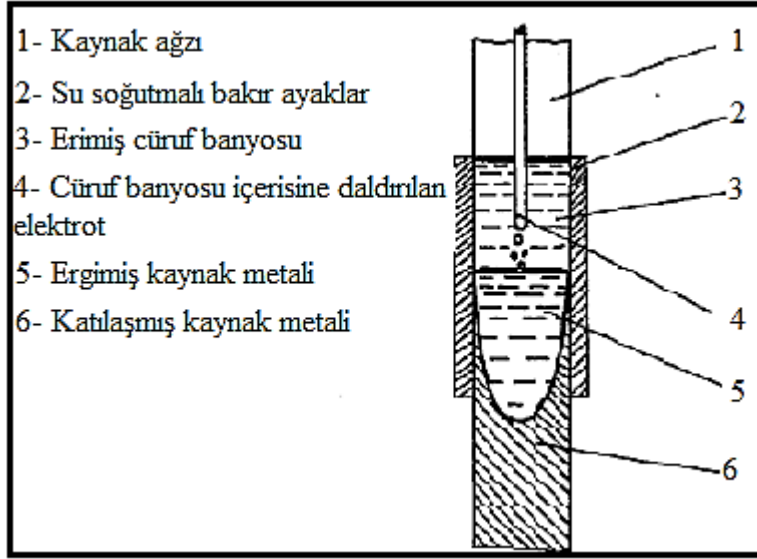
Şekil 3.8. Lazer ışını ile kaynak işlemi [25].

Lazer ışını ile kaynak aslında bir ergitme kaynak yöntemidir. Güç yoğunluğu malzeme kuvvetle buharlaşmadan eriyecek şekilde ayarlanmalıdır. Teorik olarak ek metal kullanılmadan çalışıldığı için, parçalar birbirlerine tam olarak birleştirilmelidir. Ağızlar arasındaki aralık, ergimiş banyo genişliğinin beşte biridir. Ergimiş banyo genişliği ise 100 mikrometre civarındadır.

Lazer ışını ile kaynak yönteminde; enerji taşınımının ve zamana bağlı kumandanın basitliği nedeniyle, hemen hemen tüm malzemeler birbirleriyle kaynak edilebilirler; iş parçası üzerinde hiçbir kuvvetin etkisi yoktur, atmosfer koşullarında çalışma olanağı vardır, takım aşınması söz konusu değildir, ısıdan etkilenmiş bölgeler çok dardır, zor ulaşılan yerlerde kaynak yapabilme olanağı vardır ve lazer kaynak yöntemi iyi bir biçimde otomatize edilebilir [18].

3.1.1.7. Elektrocüruf Kaynağı

Elektrocüruf kaynağı, günümüzde kalın kesitli levhaların dik pozisyonda birleştirilmesi amacı ile kullanılan ve H.K. Hopniks tarafından 1936 yılında bulunan bir direnç ergitme kaynak yöntemidir.



Şekil 3.9. Elektro-cüruf kaynak metodu [26].

Elektrocüruf yöntemi ile birleştirilecek levhalar küt alın kaynak ağızı biçiminde, ağız aralığı 25-30 mm olacak şekilde dik olarak yerleştirilirler. Levhaların altına bakır altlık konur ve ağızın her iki tarafı su soğutmalı bakır kayar bloklar ile kapatılır. Tel ya da bant biçimindeki kaynak ek metali (elektrod) bir kangaldan sağılarak ve kaynak akımı ile yüklenerek yukarıdan aşağıya doğru belirli bir hızda sürekli olarak beslenir (Şekil 3.9). Başlangıçta levhaların oturduğu bakır altlık üzerine bir miktar kaynak tozu dökülür; kaynak işlemi arkın toz ve tel elektrodu ergitmesi ile başlar, kapalı ağız içindeki tozun ergimesi ile cüruf banyosu oluşur oluşmaz, cürufun elektrik direnci arkın elektrik direncinden daha küçük olduğundan ark söner ve kaynak akımı cüruf üzerinden akmaya başlar ve bu şekilde kaynak işlemi de başlamış olur. Elektrottan cürufa geçerken karşılaşılan direnç sayesinde yaklaşık olarak 2000 °C sıcaklığa erişen cüruf banyosunda oluşan elektromanyetik kuvvetlerin karıştırıcı etkisi ile kaynak banyosuna geçen kaynak ısısı, ağızların ve elektrodun ergimesini sağlar. Aralık kaynak metali ile doldukça yan bakır kayar bloklar (pabuçlar) kaynak hızına bağlı olarak yukarıya doğru hareket ettirilir.

Kaynak teli kaynak işlemi sırasında sürekli olarak beslendiği gibi, ağzın bir tarafından diğer tarafına salınım hareketi verilerek fiçı biçiminde bir kaynak dikişi oluşturulur [18].

3.1.1.8. Termit Kaynağı

Termit kaynağı bir metal oksit tozu ile alüminyum tozu arasında oluşan alüminotermik reaksiyon sonucu, aşırı ısıtılarak ergitilen metalin kaynak edilecek parçaların alın yüzeylerine dökülerek birleştirilmesini sağlayan bir döküm ergitme esaslı kaynak yöntemidir. Bu yöntemde kaynak edilecek bölge bir döküm kalıbı içine alınır ve ergitilerek dökülen sıvı metal, hem kaynak enerjisini taşır hem de ek kaynak metali görevi yapar.

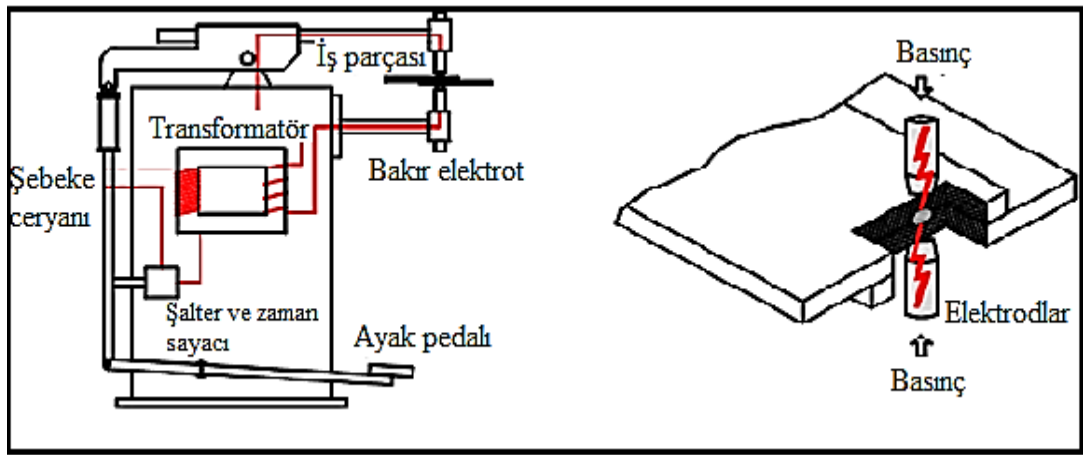


Şekil 3.10. Aliminotermite ray kaynağı [27].

Termit kaynağı, özellikle demiryolu raylarının birleştirilmesinde ve tamirinde uygulanan bir kaynak yöntemi olarak günümüzde geçerliliğini sürdürmektedir (Şekil 3.10). Bunun yanı sıra; yöntem, ön gerilmeli beton çeliklerinin ve elektrik iletim hatlarında kullanılan bakır iletken tellerin birleştirilmesinde de uygulanmaktadır [18].

3.1.1.9. Direnç Nokta Kaynağı

Bu yöntemde birbiri üzerine bindirilmiş saclar iki bakır elektrot arasında sıkıştırılır. Düşük gerilimli yüksek şiddette bir elektrik akımı elektrotlar arasındaki iş parçasından geçirilir. Ara yüzeyde, akım geçişine karşı gösterilen direnç nedeniyle, ısı üretilir. Ara yüzeyde bir metal nokta eriyerek bir köprü oluşturur. Akım çok kısa bir süre için geçer (0.06- 3 s). Akım kesildiğinde (bu otomatik olarak yapılır) kaynak basınç altında katılaşır. Direnç nokta kaynağının şematik resmi Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Nokta kaynak makinesi temel bileşenleri ve kaynak bölgesi [28].

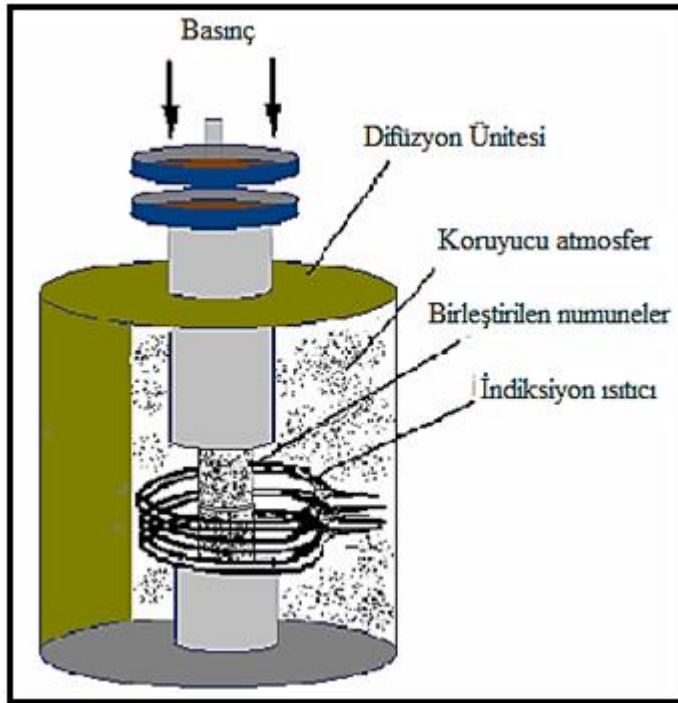
Direnç nokta kaynağı; çamaşır makinesi ve araba gövdesi gibi preslenmiş saclardan hafif imalatlarda, uçak motorlarında ve yüksek kaliteli işlerde kullanılan bir yöntemdir [18].

3.1.2. Katı Hal Kaynağı ve Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Aynı ya da farklı iki malzemenin, malzemeleri ergitmeksizin, eğer ergime olmuş ise ergimiş metalin ekstrude edildiği ve nihai birleştirmenin iki katı yüzey arasında meydana geldiği kaynak yöntemidir.

3.1.2.1. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, özellikle uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta kullanılan bir kaynak yöntemidir. Difüzyon kaynağı, birbiri ile temasta olan yüzeyler arasında minimum makroskobik deformasyon ile belirli bir süre ısı ve basınç uygulayarak kontrollü difüzyon ile oluşturulan katı hal kaynağıdır. Bu tanımdan görüleceği üzere, difüzyon kaynağının birinci aşaması, birleştirilecek parçaların genelde bir vakum ortamında ısıtılması ve basma kuvvetinin uygulanmasıdır. İkinci aşamada ise metal atomlarının bir parçadan diğerine yayılması ve kuvvetli bir bağın oluşmasıdır. Bazı hallerde ince bir metal ara tabaka da kullanılmaktadır. Difüzyon kaynağının şematik resmi Şekil 3.12’de verilmiştir [23].



Şekil 3.12. Difüzyon kaynağı [23].

Difüzyon kaynağında işlemin düşük sıcaklıklarda yapılması, birleştirilecek parçalardaki deformasyonun çok azalması ve çok değişik malzeme çiftlerinin birleştirilebilmesi (yani farklı metal ve alaşımların), donanımlarının basitliği bu yöntemin avantajlarıdır. İşlemin yavaş oluşu, büyük parçalara uygulanmasının zorluğu ve tahribatsız kontrol olanağının da sınırlı oluşu dezavantajlarını teşkil eder [1].

3.1.2.2. Ultrasonik Kaynak

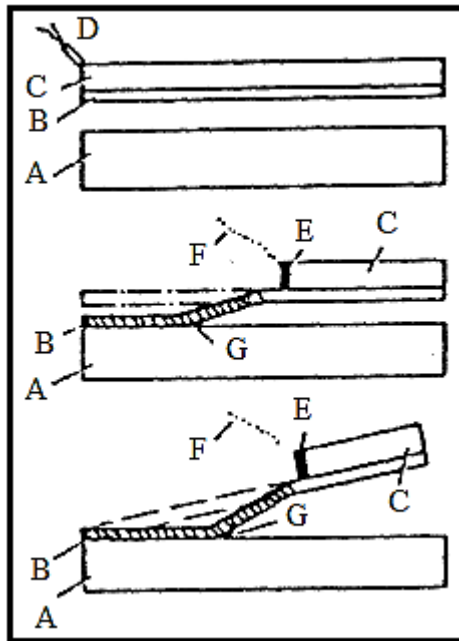
Ultrasonik kaynakta birleştirilecek parçalar, hareketli ultrasonik frekansla titreşen sonotrot ile sabit duran bir altlık arasına konur ve az bir kuvvetle bastırılır, sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde yani alt ve üst kaynak yerinde izafi bir harekete neden olur. Ultrasonik dikiş kaynağında bindirilen saclar dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından sekronize çakıştırılan altlık makaralarına bastırılır. Tekerlek şeklindeki sonotrotların levha titreşimleri üstteki iş parçasına iletilir.

Ultrasonik kaynak, bir pres (basınç) kaynağı yöntemidir. Kısmen veya tamamen mekanik hale sokulabilir. Kaynak işleminden sonra dikişlerin tekrar işlenmesine gerek yoktur.

Ultrasonik kaynak yöntemi; alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, plastik malzemeler, cam ve beton gibi malzemenin kaynağında kullanılmaktadır [1].

3.1.2.3. Patlamalı Kaynak

Prensip bakımından soğuk basınç kaynağına benzer. Her iki yöntemde de dikey bir basınç kuvveti, teğetsel bir yükleme ile kombine şekilde etki eder. Bu yüzeydeki oksit tabakasının yırtılmasına ve yüzeyin büyümesine neden olur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Patlamalı kaynağın şematik olarak gösterilişi [29].

Patlamalı kaynak yöntemi ile nokta ve çizgisel şekilde birleştirmeler elde edilebileceği gibi, geniş levha yüzeylerinin birbirleriyle birleştirilmesi de sağlanır.

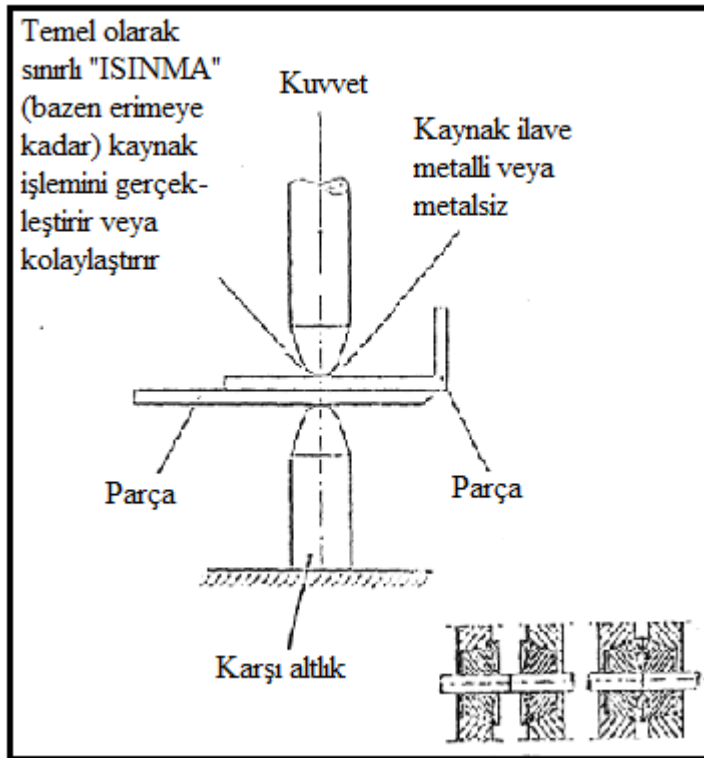
Birleştirilecek yüzeylerin pisliklerden arı olması ve metalik temiz bir yüzeyin elde edilmesi kaynak için önemlidir [1].

Yaygın uygulaması paslanmaz çelik, bakır ve titanyum alaşımlarının alüminyum ile kaplanmasıdır. Patlama kaynağı uygulanmış bimetalik parçalar aslında geçiş parçaları olarak kullanılırlar [23].

3.1.2.4. Soğuk Basınç Kaynağı

Soğuk basınç kaynağı oda sıcaklığında veya hafif sıcaklık uygulayarak basınç altında katı halde parçaları birleştirmektir. Parçaların en düşük rekristalizasyon sıcaklığı, en yüksek sınır sıcaklık olarak alınır.

Metallerin yüzeyi çevre koşullarında daima yağ, oksit, sülfür veya gaz gibi bir tabaka ile kaplandığından, bu tabakanın kaynak işleminden önce temizlenmesi gerekir ve kaynak sırasında uygulanan basınçla şekil değiştirmelidir.



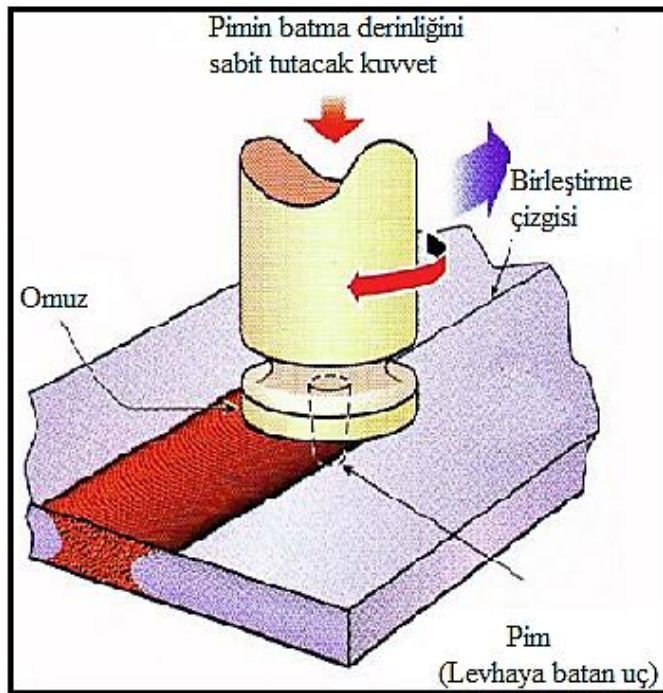
Şekil 3.14. Soğuk basınç kaynağının şematik görünümü [29].

Soğuk basınç kaynağı temelde yeterli form verilebilen ve yüzey tabakasının sınırlandırılmış kaynak bölgesi yırtılabilen bütün malzemelere uygulanabilir. En uygun malzemeler aşınmaya uygun olanlardır. Demir dışı metallerde istenen soğuk basınç kaynağı birleştirmeleri sağlanmıştır [1]. Soğuk basınç kaynağının şematik resmi Şekil 3.14’de verilmiştir

3.1.2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Bir katı hal birleştirme işlemi olan SKK, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir.

Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir. İşlem kaynak yapılacak parçadan daha sert bir malzemeden üretilmiş sürtünme aparatının dönen ucu ile kaynaklanacak parçaların birleşme bölgesinde ısı meydana getirilmesi prensibine dayanır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Sürtünme karıştırma tekniği [23].

Karıştırıcı uç, daha geniş çaplı bir metal gövdeye bağlı, daha küçük çaplı bir sonda olarak şekillenmiştir. Karıştırıcı uç birleşme bölgesi içine daldırıldığında geniş çaplı omuz diye tarif edilecek metal kısım birleştirilecek yüzeylere önce bir temas yapar. Karıştırıcı ucun dalma derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da söylenebilir. Omuzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı sağlamanın yanı sıra, yumuşayan bölgeye karıştırıcı ucun kesik koni şeklindeki ucu daldırılır. Isıl olarak yumuşayan metal karıştırıcı uca doğru giderek daralan ancak üst yüzeyde omuz ile temas eden daha geniş bir görünüm arz eder. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturur. Karıştırıcı uç çevresinde malzeme akışı, karıştırıcı uç arkasında ise malzeme ile dönen uç arasında izafi bir dönüş meydana gelmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı, kendi kendine oluşan bir birleşme tekniğidir. Birleşen malzeme doğal katı faz halindedir ve ergitme kaynağı hataları içermez [23].

3.1.2.6. Sürtünme Kaynağı

3.1.2.6.1. Sürtünme Kaynağının Tarihçesi

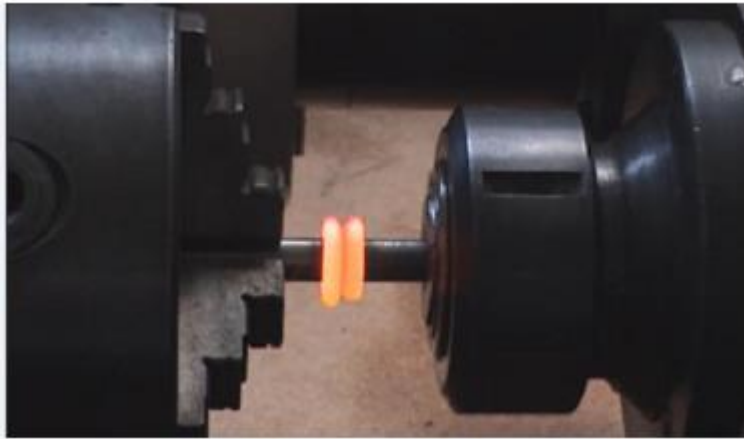
Sürtünme kaynağı gelişen dünyamızda birçok ülkede ve endüstride geniş olarak uygulama alanı bulmuş, ticari bir prosestir. Malzemelerin kaynağı ve şekillendirilmesi için sürtünme ile ısı üretimi fikri yeni değildir, öncelikle bilinmelidir ki tarih öncesinde dahi insanlar ateş yakmak için sürtünme ısısından yararlanmışlardır. Sürtünme kaynağının başlangıcı 15. yy'a kadar gitmektedir. Fakat konu ile ilgili ilk patent 19. yy'da 1891'de Amerikalı makinist J.H. Bevington tarafından alınmıştır. Bevington sürtünme ısını kullanarak metal boruların kaynağını gerçekleştirmiştir. Daha sonraları konu ile ilgili W. Richter tarafından 1924 yılında İngiltere'de ve 1929 yılında Almanya'da, H. Klopstock tarafından 1924 yılında Sovyetler Birliği'nde birer patent alınmıştır. H. Klopstock ve A.R. Neelands silindirik parçaların sürtünme kaynağı için 1941 yılında bir patent almışlardır. Ayrıca 2. Dünya savaşı sırasında Almanya ve Amerika'da plastik malzemelerin kaynağı için sürtünme kaynağı kullanılmıştır.

Bununla birlikte sürtünme kaynağının ticari bir proses olarak gelişimi ve konu ile ilgili bilimsel çalışmaların başlaması bir Rus makinist tarafından gerçekleştirilmiştir. Rus makinist A.J. Chdikov iki metal çubuk arasında başarılı bir kaynak gerçekleştirerek 1956

yılında Sovyetler Birliği'nde konu ile ilgili bir patent almıştır. Sovyetler Birliğindeki daha yoğun çalışmalar Vill ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Bu proses ABD'ye 1960 yılında girmiştir. American Machine and Foundry Co. da Holland ve Cheng adlı araştırmacılar sürtünme kaynağının temel parametre analizleri üzerinde çalışmışlardır. İngiltere'de ilk sürtünme kaynağı kaynak enstitüsü tarafından 1961 yılında üretilmiştir. 1962 yılı itibariyle ise Sovyetler Birliği'nde birçok fabrikada sürtünme kaynağı kullanılır hale gelmiştir. (Kharkov ısıtma ve havalandırma fabrikası, Lysbensk metal fab., Vitebsk takım fab. K. Gotwald otomobil fab., Minsk traktör fab. v.b.). Yine 1962 yılında ABD 'de Caterpillar Tractor Co. Sürtünme kaynağını modifiye ederek atalet kaynağı olarak anılan yöntemi geliştirmiştir ve bundan sonra konvensiyonel sürtünme kaynağı Rus tipi proses, atalet kaynağı ise Caterpillar tipi proses olarak adlandırılmıştır. Bu tarihten itibaren daha hızlı gelişme gösteren proses, hızla bütün dünyaya yayılmış ve birçok endüstride uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında elektron ışın kaynağından sonra pratikte en çok uygulama alanı bulmuş olan yöntemdir [3,30].

3.1.2.6.2. Yöntemin Tanımlanması

Sürtünme kaynağı elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından yararlanmaksızın, çalışma parçalarının ara yüzeylerinde mekanik olarak oluşturulan sürtünme yoluyla üretilen mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılarak yapılan bir katı hal kaynak tekniğidir (Şekil 3.16) [6].



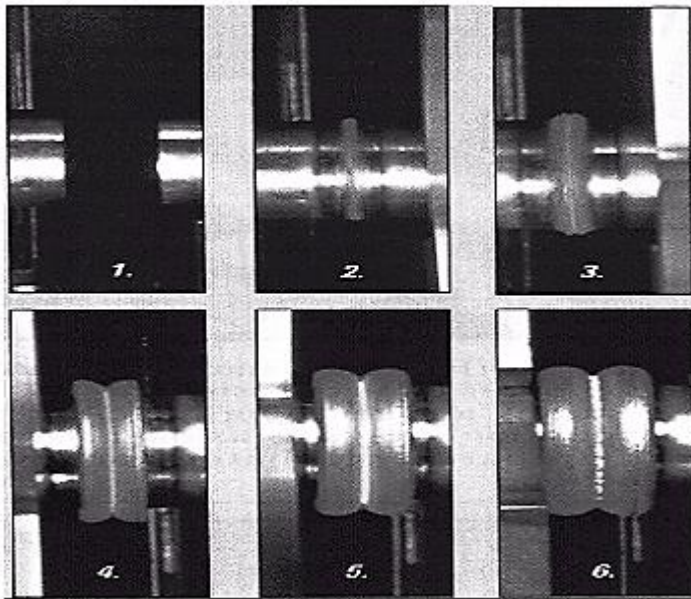
Şekil 3.16. Sürtünme kaynağı işlemi [31].

Genel olarak sürtünme kaynağı eksenel simetriye sahip ve daire kesitli parçaların birleştirilmelerinde kullanılmasına rağmen cihazların otomasyonu ve bilgisayarlı kontrol olanaklarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılabilmektedir. Ayrıca bu kaynak yönteminde malzeme ve enerji tasarrufu sağlamak gibi önemli bir avantaja da sahip olduğu için gittikçe artan oranlarda tercih edilmektedir.

Yine bunlara ek olarak sürtünme kaynağı ile aynı veya farklı malzeme türleri, eşit veya farklı kesitli parçaların birleştirilmesi de kolaylıkla gerçekleştirilmektedir.

Yöntemin işlem basamakları aşağıdaki gibidir ve bu işlem basamakları şekil 3.17’de gösterilmiştir.

1. Parçalardan biri sürtünme kaynağı mekanizması tarafından döndürülürken diğer parça sabittir. Sabit parça dönen parçaya temas edecek şekilde ilerletilir.
2. Dönme sonucu sürtünen yüzeylerde ısı açığa çıkar. Metallerde ortaya çıkan yüksek ısı, kaynak bölgesi sıcaklığını her zaman ergime sıcaklığının altında tutar.
3. Yumuşayan metal uygulanan basıncın etkisiyle dışarı doğru taşmaya başlar.
4. Dövülmüş sıcak bölge ara yüzeyden dışarı doğru yönlendirilir.
5. Makine döndürme işlemine durdurur ve dövme kuvveti ile kaynak tamamlanır.
6. Sıcak işlemeye maruz kalan birleşme bölgesi tüm yüzey ve çap boyunca homojen bir forma ve yüksek kalitede kaynağa sahiptir.

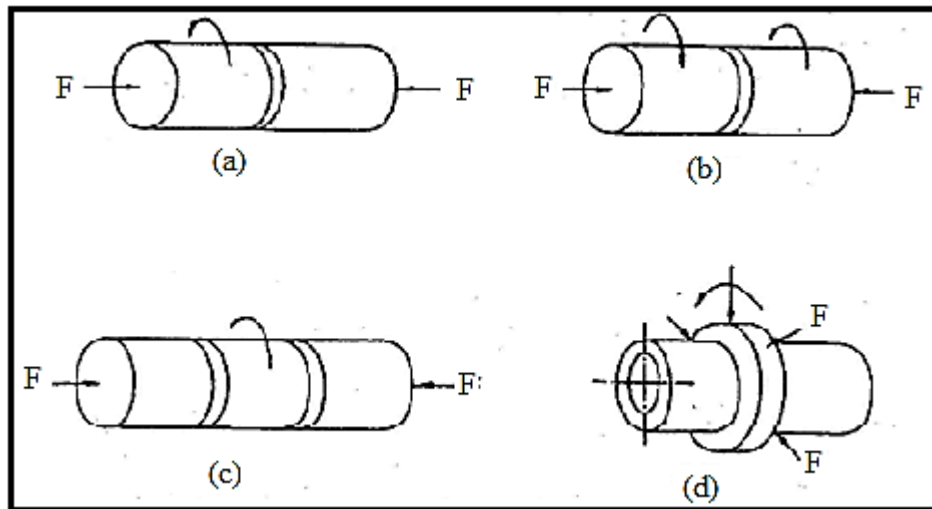


şekil 3.17. Sürtünme kaynağı işlem basamakları [31,32].

Kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler basınç altındadır ve ısıtma fazı ya da sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç yüzeylerde plastik şekil verme sıcaklığı oluşana kadar sürer. Çelikler için bağlantı bölgesinde oluşan sıcaklık 900-1300 °C arasındadır. Çoğu durumda ısıtma fazı sonrasında basınç arttırılarak ara yüzeydeki ısıtılmış metal yığılır. Böylece kaynak bölgesi bir tür termomekanik işleme tabi tutulmuş olur ve dolayısı ile bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir. Bundan dolayıdır ki, diğer yöntemlerle kaynak edilemeyen metaller ve metal alaşımları rahatlıkla kaynak edilebilir.

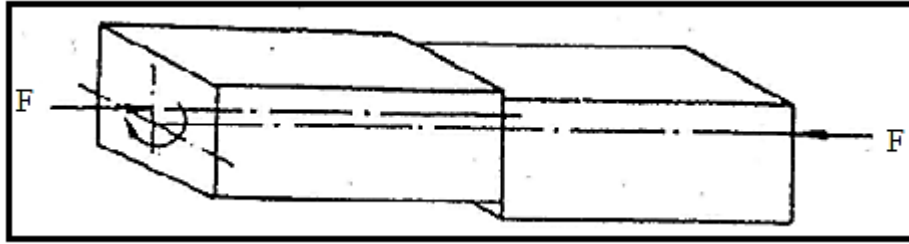
Bilindiği gibi parçalar arasında kaynak bağı oluşabilmesi için çıplak yüzeylerin temas haline gelmesi gerekir, sürtünme kaynağında bütün temassızlıklar sürtünme yolu ile giderildiği için bu temas çok iyi gerçekleşir. Normal şartlar altında sürtünen yüzeylerde bir ergime olayı oluşmaz, şayet çok küçük miktarlarda bir ergime oluşmuşsa da kaynak sonu uygulanan yığma işleminden dolayı ergimiş metale ait bir delil bulunmaz [31,33].

Sürtünme kaynağı uygulamalarının büyük çoğunluğunu dairesel kesitli çubukların ya da boruların kaynağı oluşturmaktadır. Bu tür uygulamalarda sürtünmeyi oluşturan temel hareket dönme hareketidir ve proses konvensiyonel sürtünme kaynağı olarak adlandırılır. Şekil 3.18’de alışla gelmiş sürtünme kaynağının uygulama şekilleri görülmektedir. Şekil 3.18 (a) en çok kullanılan ve en basit uygulama şeklidir. Şekil 3.18 (b) durum yüksek dönme hızlarının gerekli olduğu küçük çaplı numuneler için uygun olmaktadır. Şekil 3.18 (c) çok uzun iki parçanın birleştirilebilmesi için uygun bir yöntemdir. Şekil 3.18 (d) ise boru kaynağı için geliştirilmiş ve radyal kuvvet etkisi altında dönel bir bilezikten yararlanılarak yapılan kaynağı göstermektedir [30].

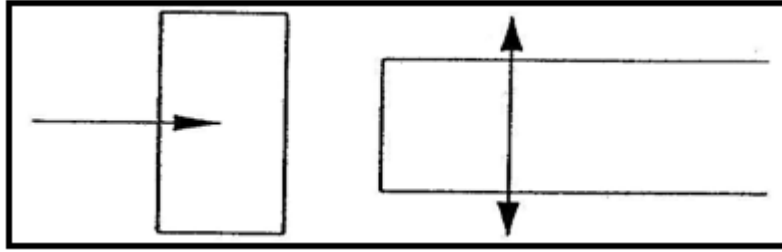


Şekil 3.18. Sürtünme kaynağının uygulanma şekilleri [3,30].

Sürtünme kaynağında, sürtünme için kullanılan dönme hareketi yanında, yörüngesel hareket, lineer titreşim hareketi ve açısal titreşim hareketi de uygulanabilir. Yörüngesel hareket silindirik olmayan parçaların kaynağı içindir. Bu uygulamada sabit duran parça üzerinde diğer parça bir köşesi dairesel bir yörünge çizecek şekilde hareket eder (Şekil 3.19). Lineer titreşim hareketinde parçalardan biri uygulanan basınç altında ileri geri titreşim hareketi yapar. Bu yöntem ilk defa Vill tarafından önerilmiştir (Şekil 3.20). Açısal titreşim hareketinde ise parçalardan biri uygulanan basınç altında belirli bir açıyı gören yay parçası yörüngesinde hareket eder [30].

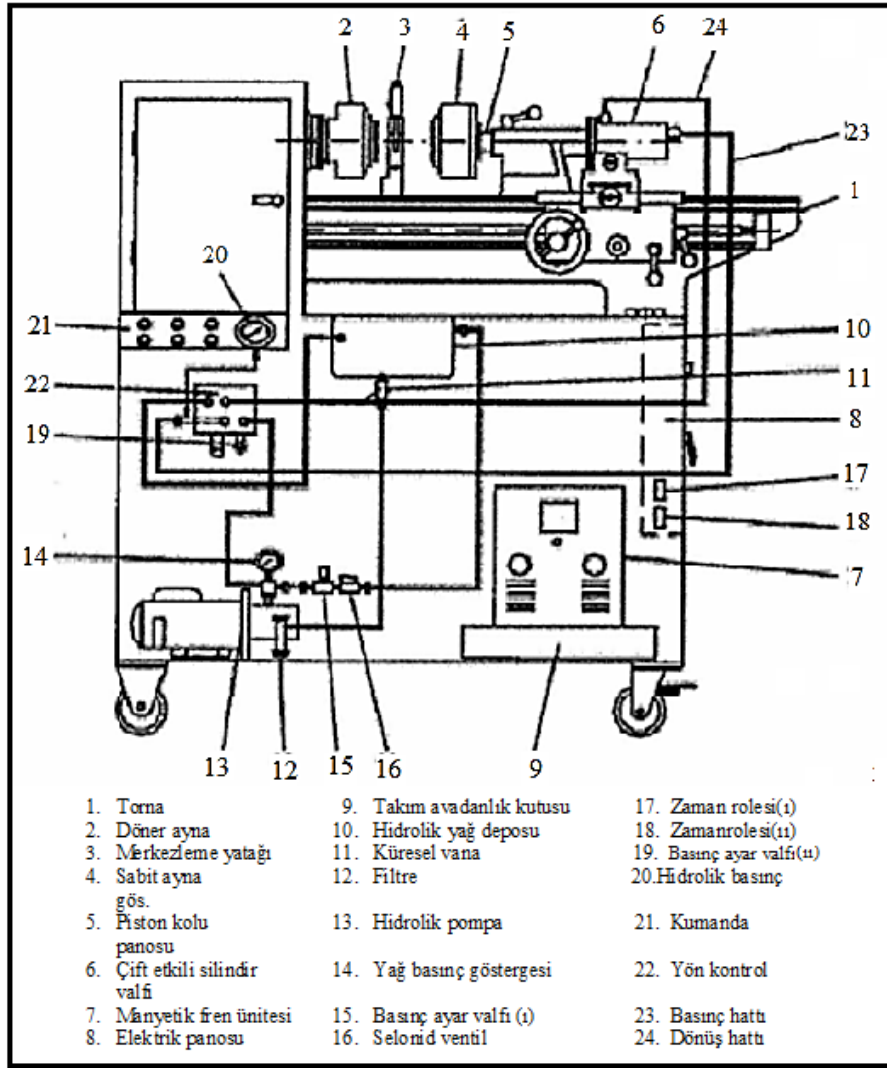


Şekil 3.19. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı [3,30].



Şekil 3.20. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı [3,30].

Sürtünme kaynağı cihazı tasarım olarak bir tür torna tezgâhını andırmaktadır. Bu makinelerin üzerinde birtakım değişiklikler yapıp modifiye edilmesiyle Şekil 3.21’de bölümlerini rahatlıkla görebildiğimiz sürtünme kaynağı makineleri elde edilmektedir [31].



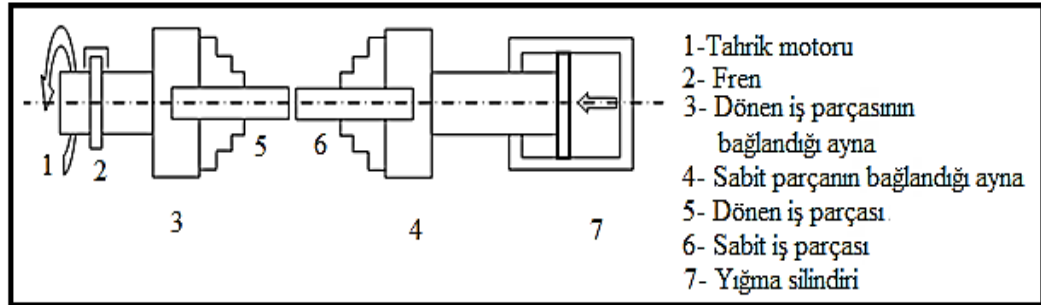
Şekil 3.21. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı [31,34].

3.1.2.6.3. Sürtünme Kaynağının Çeşitleri

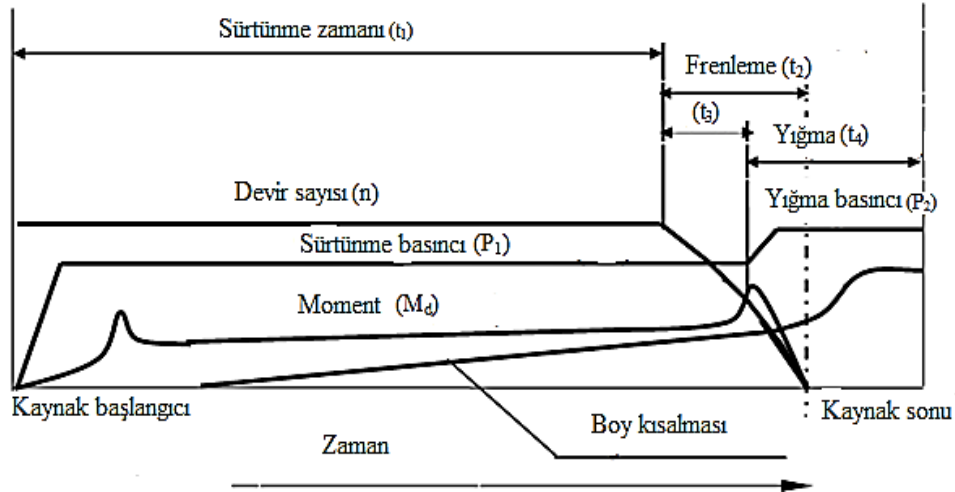
Sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre iki ayrı yöntemle uygulanabilir. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde, bu iki yöntemin bir arada uygulanması ile gerçekleştirilen kombine kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar, sürekli tahrikli sürtünme kaynağı, volan tahrikli sürtünme kaynağı ve kombine edilmiş (hibrid) sürtünme kaynağı şeklinde adlandırılabilirler [35,36].

3.1.2.6.3.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu yöntemde dönme enerjisi sürekli bir tahrik grubu ile sağlanır. Mekanik enerji dönen iş parçasından dönmeyen iş parçasına basınç uygulamak sureti ile ısı enerjisine dönüştürülür. Parçalardan birisi bir motor tahrik ünitesine bağlıdır ve sabit bir hız altında döner, aynı zamanda sabit eksenel kuvvet birleştirilecek parçalara uygulanır. Birleştirilecek parçalar, daha önceden belirlenen kaynak süresince veya belirlenen eksenel kısalma oluşuncaya kadar birbirine sürtünür ve daha sonra dışarıdan frenleme işlemi ile durdurulur. Kaynak esnasında uygulanan basınç, yığma amacıyla artırılır ve kaynak soğuyuncaya kadar tutulur (Şekil 3.22) [35,36].



Şekil 3.22. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı [6].



Şekil 3.23. Klasik sürtünme kaynak parametreleri [6].

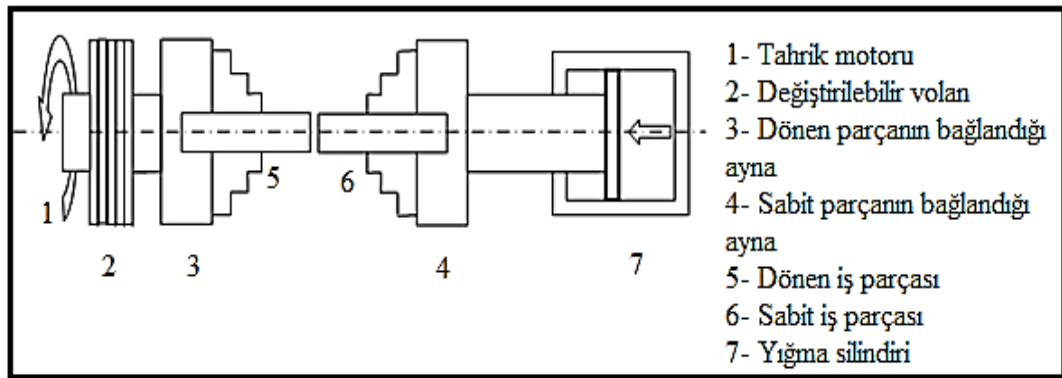
Temel kaynak parametreleri:

- Devir sayısı
- Yüzeye bağlı sürtünme kuvveti ve sürtünme süresi/sürtünme mesafesi,

- c. Yüzeye bağlı yığılma kuvveti ve yığılma süresi / yığılma mesafesidir (Şekil 3.23) [30].

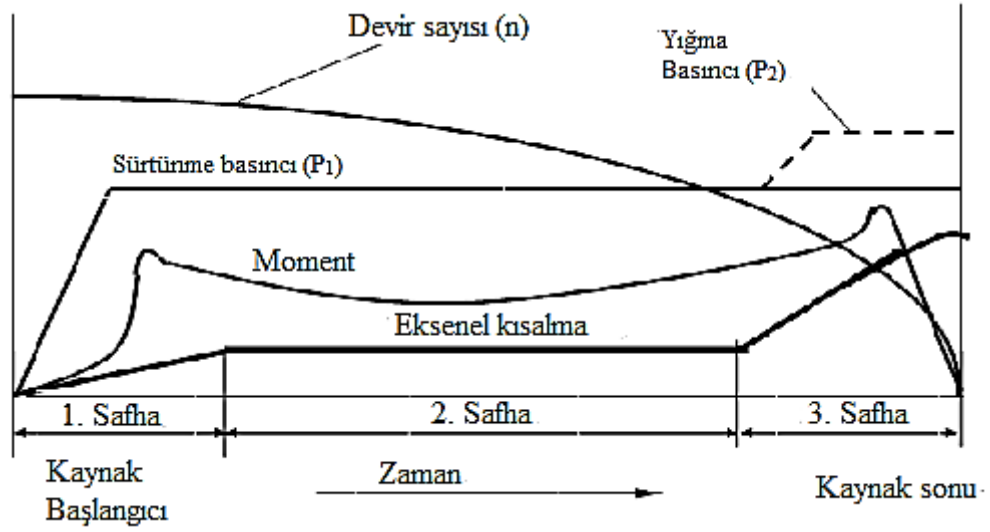
3.1.2.6.3.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu kaynak yönteminde, tahrik motoru volan sistemi sürekli döner ve dönen iş parçasını uygun bir hıza getirmek için volan- mil sistemine birleştirilir. Arzu edilen hıza ulaşıldıktan sonra motor volanı, mil volanından kurtarılır. Düşük bir atalet momentine sahip olan mil volanı, kaynağı tamamlamak için fren yapmaksızın hızlı bir şekilde durur. Bu sebepten dolayı literatürde bu kaynak yöntemi “atalet kaynağı” olarak geçmektedir. Parçalardan biri bir volana bağlıdır ve belirlenen bir hıza ivmelendirilir, böylelikle mekanik enerji bir volana depolanmış olur. Daha sonra sonra iki parça temas ettirilir ve bir kaynak basıncı uygulanır. Parçalar bu basınç altında sürtünür ve volan enerjisi ara yüzeydeki sürtünmeye harcanır. Volanın hızı azalırken kaynak bölgesi ısınır. Bazı durumlarda, volan tamamen durmadan basınç artırılır ve volan durduktan sonra da bir müddet etki devam ettirilir (Şekil 3.24). Volan tahrikli sürtünme kaynağının, sürekli tahrikli sürtünme kaynağına olan üstünlükleri; kaliteli bir kaynak dikişi, daha dar bir ITAB bölgesi, daha seri üretim, daha düşük güç ihtiyacı ve daha basit düzenek şeklinde sıralanabilir.



Şekil 3.24. Volan tahrikli sürtünme kaynağı [6].

Temel kaynak parametreleri; devir sayısı, yüzeye bağlı dövme kuvveti, dövme süresi ve volanın kütlesidir (Şekil 3.25) [35].



Şekil 3.25. Volan tahrikli sürtünme kaynak parametreleri [6].

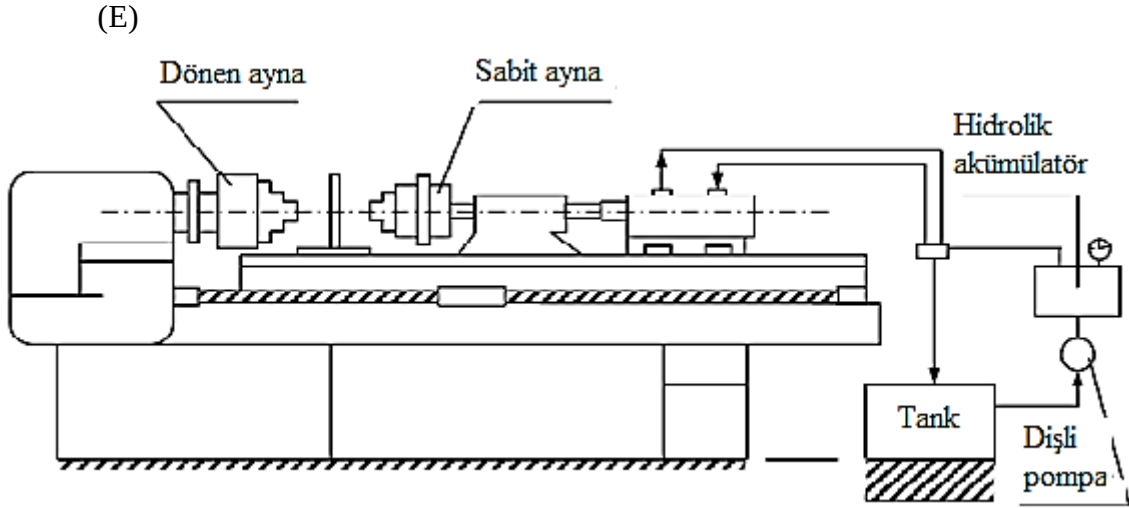
3.1.2.6.3.3. Kombine Sürtünme Kaynağı

Her iki kaynak işleminin yapıldığı kaynak türüdür. Kaynak işlemi, sürtünme ve yığma safhalarını içermektedir. Hem atalet hem de sürtünme kaynağı için moment eğrilerinin değişimi işlemin izahı için önemli değer taşımaktadır. İşlemin başlangıcında kuru sürtünme hakimdir ve bu sürtünmenin etkisiyle moment eğrisi bir zirve yaptıktan sonra dengeye gelir. Süreç içerisinde oksit tabakalarının parçalanması sonucu çıplak yüzeyde temaslar sırasında kuvvetli atomsal bağlar oluşmaya başlar. Sürtünme hareketi ile bu bağlar koparılmaya çalışılır. Sonuçta bu temas noktalarında büyük adhezyon kuvvetleri oluşur, moment artar ve sıcaklık istenilen düzeye ulaşır. Frenleme sonrası hız azalırken moment de sıfıra düşer.

Tasarım olarak sürtünme kaynak makineleri, torna, matkap gibi metal işleme makinelerini andırmaktadır ve ilk sürtünme kaynağı makineleri bu tezgâhların modifiye edilmiş şekilleridir. Şekil 3.26'da tipik bir sürtünme kaynağı makinesi görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere bir sürtünme kaynağı, ana gövde bağlama tertibatları, dönme ve yığma mekanizmaları, fren sistemi, güç ünitesi, kontrol üniteleri ve kumanda tablosu kısımlarından oluşmaktadır.

Sürtünme kaynağı makineleri tam mekanize makinelerdir. Parçaların bağlanması, çözülmesi ve oluşan çapakların alınması otomotize edilebilir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağının ana fonksiyonları parçaların bağlanması ve sıkıştırılması, basınç altında dönme ve sürtünme, frenleme, yığma ve gerekli sürelerin hassas olarak ayarlanmasıdır. Numune

bağlama aparatları gerekli rijitliğe sahip olmalı, üzerine gelecek momentleri karşılamalı, radyal kaçıklıklar ve titreşimler, gerekli incelemeler ve araştırmalar yapılarak sönümlenecek şekilde makine tasarlanmalıdır. Titreşimler yanında oluşacak radyal ve eksenel kuvvetlerden dolayı parçaların sabitlenmesi ve eksenel kaçıklıkların önlenmesi zordur. Bu nedenle bağlama tertibatı parçaları gereken miktarda sıkıştırarak dizayna sahip olmalıdır. Bu işlem için genellikle V şekilli iki çene veya özel çeneler kullanılır. Kaynak ekipmanlarını tutmak için kullanılan bütün durdurma elamanları güvenilir olmalıdır. Bağlantısı yapılacak parçalarda oluşabilecek küçük bir kayma hem kaynak bağlantısına hem de frenleme sisteminin zarar görmesine neden olur. Uygulamaların çoğunda otomatik olarak merkezleyen frenleme tertibatları kullanılır [6].



Şekil 3.26.Sürtünme kaynak makinası [6].

3.1.2.6.4. Kaynak Parametreleri

Sürtünme kaynağı, kontrolü gereken oldukça fazla sayıda parametre içermektedir. Bu yöntemle ilgili değişkenler dönme hızı, sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi, yığma geciktirme süresi ve yığma süresidir. Bunun dışında numune geometrisi ve numunenin yapıldığı malzemeden kaynaklanan diğer parametreler de söz konusudur. Ancak yapılan çalışmalar yöntem üzerinde en etkili olan ve optimazasyonu gereken parametrelerin dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi olduğunu göstermiştir. Konu ile ilgili temel eserler incelendiğinde kaynak parametreleri ile ilgili şu genel sonuçlar çıkartılabilir;

3.1.2.6.4.1. Çevresel Hız

Literatürde ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğu görülmüştür. Yüksek çevresel hız, yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken; düşük çevresel hız, yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler. Yüksek çevresel hıza bağlı olarak deformasyon hızının değişimi kaynak süresini kısaltır. Çelikler için çevresel hız 1.2- 1.8 m/s arasında önerilirken, 1.2 m/s altındaki hızlar çok yüksek momentler, dolayısıyla üniform olmayan bir yığma üretir. Bununla birlikte, farklı metal bağlantıları için düşük hızlar, gevrek bir intermetalik fazın oluşumunu sınırlayabilir. Yüksek hızların kullanılması durumunda ise kaynak bölgesindeki aşırı ısınmayı önlemek için sürtünme basıncı ve sürtünme süresi çok dikkatli kontrol edilmelidir [3,30].

3.1.2.6.4.2. Sürtünme Basıncı Kuvveti

Sürtünme basıncı kuvveti, numune geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak değişir. Sürtünme basıncı kuvveti, temas eden ara yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve ara yüzeyde üniform bir ısıtma sağlayabilecek bir düzeyde olmalıdır. Sürtünme basıncı, dar bir aralıkta değişmez. Basıncı değişkeni, kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel kısalma ile kontrol edilebilir [2,30].

3.1.2.6.4.3. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresi, sürtünen yüzeylerdeki olası kalıntı ve pislikleri temizleyecek ve gerekli plastisite için üniform bir kaynak bölgesi sıcaklığına ulaşmayı sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Buna karşın sürtünme süresinin aşırı uzun olması ısının etkisindeki bölgenin genişlemesine ve aşırı yığılmaya sebep olacaktır [3,30,37].

3.1.2.6.4.4. Yığma Süresi

Yığma süresi, malzeme çifti ara yüzeyinde gerekli plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için yığma basıncı kuvvetinin uygulandığı süredir [3,30,37].

3.1.2.6.4.5. Yığma Basınç Kuvveti

Sürtünme periyodu sonrasında, özellikle çelikler için, bir yığma basıncının uygulanması bağlantı kalitesini artırır. Yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır ve aşırı kaynak yığılmasına sebep olacak kadar yüksek, elverişsiz şekillendirmeye dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Yığma basınç kuvveti, sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla uygulanır. Yığma basıncı, malzemelerin birleştirilebilmeleri için malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Buna karşın yığma basıncı çok yüksek alınırsa aşırı metal deformasyonu oluşur ve bu aşırı yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan inklüzyonlar arzu edilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler [3,30].

3.1.2.6.5. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti

Demir ve demir dışı metaller sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilir. Ayrıca sürtünme kaynağı, diğer kaynak yöntemleri ile kaynak edilemeyen farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin kaynağında da kullanılabilir. Erime sıcaklığı altındaki sıcaklıklar ve kısa kaynak süresi sürtünme kaynağına bu olanağı vermektedir. Farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin sürtünme kaynağı simetrik olmayan deformasyon miktarlarına yol açar. Yüksek bir kaynak mukavemeti ise relatif olarak simetrik plastik deformasyon veren farklı malzemelerin kaynağında elde edilebilir.

Sürtünme kaynağında dövülebilen iyi kuru sürtünme özellikleri olmayan bütün malzemeler kolaylıkla kaynak edilebilir. Kuru yağlama sağlayan alaşım elementleri bağlantı bölgesinin kaynak sıcaklığına erişmesini engeller. Demir esaslı malzemeler, yumuşak çelikten, yüksek alaşımlı çeliklere kadar kaynak edilebilmektedir. Yumuşak çelikler relatif olarak daha kolay kaynaklanmakta ve geniş bir parametre aralığına sahiptirler. HSS türü yüksek alaşımlı çelikler ise daha dar parametre aralığında ve daha yüksek eksenel kuvvetlerde kaynaklanabilir. Bunların tokluğu ve çatlak hassasiyeti dikkat edilmesi gereken bir konudur, parçalarda oluşan çapaklar mutlaka alınmalıdır. Çünkü bu çapaklar çatlak başlangıcı için uygun yerlerdir. Tablo 3.1’de malzemeler ve sürtünme kaynağına uygunlukları verilmiştir.

Paslanmaz çelikler, sinterlenmiş çelikler ve maraging çelikleri literatürde verilen kaynak parametrelerinde kolaylıkla kaynaklanabilir. Isıl işlemli paslanmaz çelikler diğer yüksek alaşımlı çelikler gibi kaynak değişkenlerine çok hassastır ve ITAB' da arzu edilen özellikler için kaynak sonu prosesler gerektirir. Bunların dışında sinterlenmiş malzemeler, Al ve alaşımları, Cu ve alaşımları, Ti alaşımları, Zr alaşımları, Mg alaşımları, ısıl direnç alaşımları olan Ni- Co alaşımları, refrakter metaller olan T, Mo, Ni ve Ta alaşımları da sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilmektedir. Bazı metal ve alaşımlarına aşağıda belirtilen metalurjik içeriklerinden dolayı başarılı bir kaynak yapılamaz. Bu sınırlamalar genelde sürtünme ısı ve dönmeye yöneliktir.

- Bazı dökme demirler, serbest grafitin sürtünme sıcaklığını sınırlaması nedeniyle,
- % 0,3'ün üzerinde kurşunlu bronz ve pirinçler, sürtünme aralığının sınırlanmasından,
- %0,13'ün üzerinde S, Pb içeren çelikler, sürtünme sıcaklığını sınırlamasından,
- Yüksek derecede anizotropik malzemeler geçiş bölgesi kırılganlığından dolayı,
- Yapısında hazır olarak grafit, Mn, serbest Pb gibi zayıflatıcı faz içeren malzemeler başarılı bir şekilde kaynak edilemez [38,39].

Tablo 3. 1. Malzemeler ve sürtünme kaynağına uygunluğu [31,40].

	Ticari Saf Alüminyum	Alüminyum Alaşımları	Bakır	Bakır Alaşımları	Yumuşak Çelik	Orta Karbonlu Çelik	Düşük Alaşımlı Çelik	Sertleştirilmiş Çelik	Yüksek Hız Çeliği	Östenitik Paslanmaz Çelik	Ferritik Paslanmaz Çelik	Dublex Paslanmaz Çelik	PH Paslanmaz Çelik	Martenzitik Paslanmaz Çelik	Nikel	Nikel Alaşımları	Niobyum	Titanyum Alaşımları	Tungsten	Zirkonyum
Ticari Saf Alüminyum																				
Alüminyum Alaşımları																				
Bakır																				
Bakır Alaşımları																				
Yumuşak Çelik																				
Orta Karbonlu Çelik																				
Düşük Alaşımlı Çelik																				
Sertleştirilmiş Çelik																				
Yüksek Hız Çeliği																				
Östenitik Paslanmaz Çelik																				
Ferritik Paslanmaz Çelik																				
Dublex Paslanmaz Çelik																				
PH Paslanmaz Çelik																				
Martenzitik Paslanmaz Çelik																				
Nikel																				
Nikel Alaşımları																				
Niobyum																				
Titanyum Alaşımları																				
Tungsten																				
Zirkonyum																				

Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır

- | | |
|--|---|
| 1 Kaynak Edilebilir | 4 Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır |
| 2 Kaynak Edilebilir
Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Olmalı | 5 Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Olmalı |
| 3 Kaynak Edilebilir
Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Tavsiye edilir | 6 Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Tavsiye edilir |

3.1.2.6.6. Kaynak Öncesi Hazırlık ve Bağlantı Dizaynı

Tasarımcı, iş parçasının şekli, her bir parçanın gruplandırılması ve üretim şartlarının seçimi vasıtasıyla sürtünme kaynağının avantajlarından yararlanabilir. Sürtünme kaynağı bağlantısı genel olarak anma yüzeyini kapsadığından aşağıdaki hususlara özellikle dikkat etmek gerekir [38,39].

- Dönel simetrik alın kaynağı öncelik taşımalıdır.
- Parçaların bağlanmasında yeterli uzunluk ve rijitliğe dikkat edilmelidir.
- Büyük çaplı parçalarda küresel veya kesik koni şekilli bir ağız sürtünmeye yardımcı olabilir.
- Ayrılma kesitlerine dikkat etmek gerekir.
- Büyük masif kesitlerde, sürtünme kaynağı sırasında malzeme transferini kolaylaştırmak amacıyla yeterli çap ve derinlikte eksenel girinti yapılabilir.
- İnce cidarlı borularda tesviye işlemi mümkün olduğu kadar az tutulmalıdır.

3.1.2.6.7. Kaynak Yüzeyinin Hazırlanması

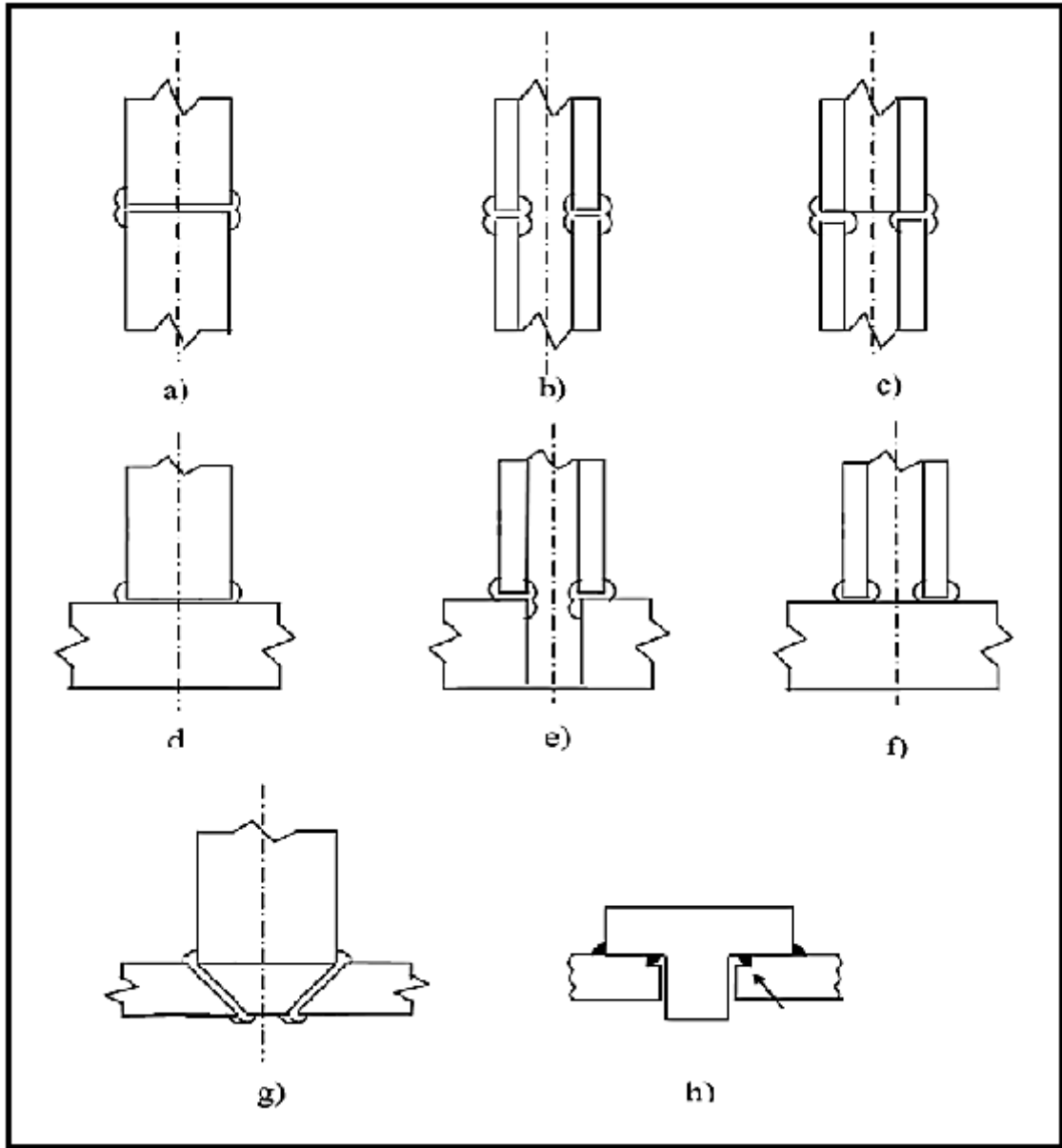
Kaynak yapılacak parçaların yüzeyleri hazırlanırken aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır: [38,39].

- Sürtünmeyi önleyecek veya azaltacak, kav, hadde ve döküm tabakaları, kalın oksit tabakaları, çekme veya dövme işlemi tozları, yağlama maddeleri, kaplama tabakaları gibi yabancı maddeler kaynak yüzeylerinden uzaklaştırılmalıdır. Kaynaklı parçalarda az bir kısalma söz konusu ise yağ, gres, boya, ince pas tabakası da giderilmelidir.
- Ağız bölgesindeki su verilmiş sert tabakalar da yumuşatma tavlamaıyla giderilmelidir veya bu tabaka kaynak işlemi sırasında ortadan kalkabilecek şekilde ince olmalıdır.
- Malzeme kombinasyonlarında kaynağın cinsi malzemenin özel şartlarına uygun olmalıdır.
- Malzeme kombinasyonlarında farklı deformasyon kabiliyetinin dengelenmesi amacıyla, sıcakta yüksek mukavemetli parçalar bir ön tavlama tabi tutulmalıdır.

3.1.2.6.8. Kaynak Yapılacak Parçaların Bağlanması

Kaynakta söz konusu olan dönme momentleri ve eksenel kuvvetler iletilebilmelidir. Kuvvet ve momentlerin alınabilmesi için, sürtünme (kuvvet) bağlı veya şekil bağlı bağlama tiplerinde yeterli bağlama boyu ve mümkünse bir destek öngörülmalıdır. Sınırlı bağlama boyu için yüzeyleri işlenmiş parçalarda şekil bağlı tip gereklidir. Bağlama yüzeylerinin kirlenmesi önlenmelidir. Parçalar her şeyden önce en az kaçıklığı verecek şekilde tasarlanmalıdır. Sürtünme kaynağının doğasından dolayı özel sürtünme hareketi durumları hariç, parçaların en az bir tanesinin dönel olması arzu edilir. Karışık şekilli parçalar ya da dövülmesi çok zor parçalar için, dövülerek şekillendirilmiş iki veya üç parça sürtünme kaynağı ile bir araya getirilerek üretilebilir. Sürtünme kaynağı ile ilgili temel tasarım şekilleri, çubuk-çubuk, boru-boru, çubuk-boru, çubuk-levha, boru-levha ve boru-disk şeklindedir (Şekil 3.27 a-f).

Sürtünme kaynağı ile yapılacak açılı bağlantılarda eksenle olacak açının 30° den büyük olması D.L. Kuruzar (1979) tarafından önerilmiştir. Genel literatürde bu açının $30-45^\circ$ ve $45-60^\circ$ arasında olması önerilmiştir. Açılı bağlantıya ilişkin bir örnek Şekil 3.27 (g)'de görülmektedir. Bazı birleştirmelerde yığmanın yapılması zor olduğundan yığma aralıkları bırakılmaktadır (Şekil 3.27 h) [38,39,41].



Şekil 3.27. Sürtünme kaynağı bağlantı tasarımları [38].

3.1.2.6.9. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı

Sürtünme kaynağında yapılan kaynak dikişinde de, ertitme ve difüzyon kaynaklarındaki gibi, kaynak malzemelerinin birbirine karıştığı bir bölge ve bu bölgenin etrafında her iki malzeme tarafında da ısıdan etkilenmiş alanlar mevcuttur. Malzemelerin birbirine karıştığı bölgede difüzyon söz konusu olup atomlar karşılıklı yer değiştirir. Isıdan etkilenen bölgeler genelde kaynak sırasında oluşan sıcaklığın, değeri olarak yaklaşık malzemelerin erime sıcaklıklarının yarısına kadar çıktığı ve daha da üzerine çıktığı alanlardır.

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

- İntermetalik fazın oluşması,
- Yüksek karbonlu alaşımsız çeliklerde karbon miktarının azalması,
- İçyapı da rekriztalizasyon,
- Ergitme sıcaklığı malzemelerin kendinden daha az olan ötektik alaşımların oluşması,
- İçyapıda tane irileşmesinin olması,
- Çeliklerde martenzitik içyapı dönüşümü.

Yukarıda maddeler halinde verilen durumlar, kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

İntermetalik fazlar sert ve gevrek olduklarından kalınlıkları belli genişliği aşınca bulundukları tabaka boyunca aşırı bir gevrekleşme gösterirler. Alaşımsız çeliklerde karbon azalması lokal olarak mukavemet değerlerinin azalması demektir. Bu şekilde oluşan yumuşak bölgelerin kaynak bölgelerinin mukavemeti de az olacaktır. İçyapıda rekriztalizasyon veya tanelerin irileşmesi, yumuşak bölgelerin oluşmasına neden olur. Martenzitik dönüşüme uğrayan bölgelerde belli bir büyüklük ve sertliği aşınca intermetalik fazlarda olduğu gibi gevrekleşmeye neden olurlar.

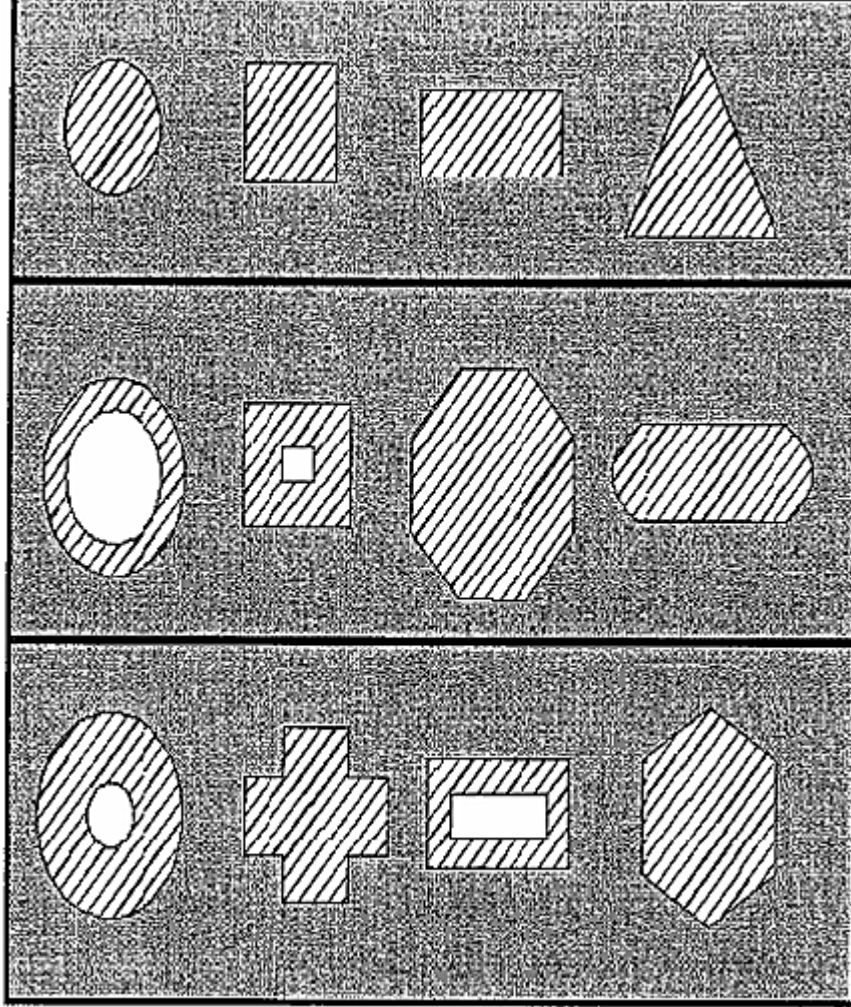
Sürtünme kaynağının kısa sürmesi ve bu sırada sıcaklık artarken, daha sonrada şişirme esnasında aşırı plastik deformasyonların meydana gelmesi, diğer kaynak metotlarına göre malzeme içyapı dönüşümünü azaltıcı yönde bir avantaj sağlar.

3.1.2.6.10. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri

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

Sürtünme kaynağı ile hem içi dolu hem de boş kesitlerin kaynağını yapmak mümkündür. Dolu kesitlerde parça için çap değeri 1 mm'den 300 mm'ye kadardır. Parçalar eğer boş ise, birbirine benzer büyüklükteki kesit alanlarına sahip olanları sürtünme kaynağı ile birleştirilebilir. Günümüzde yapılan çok sayıdaki araştırmalar sonucunda, sürtünme

kaynağı ile birçok basit biçimli parçanın birleştirilmesi imkânı ortaya çıkmıştır. Az önce bahsedilen teknolojinin gelişmesiyle, sürtünme kaynağı cihazındaki dönel aynanın istenilen pozisyonda frenlemesi sayesinde, dönel simetrisi olmayan kesitli parçaların da alın kaynağının yapılabileceği ve meydana gelebilecek açısız çarpımların önlenilebileceği ortaya konmuştur (Şekil 3.28) [31,42].



Şekil 3.28. Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri [31,43].

3.1.2.6.11. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları

Daha öncede belirtildiği gibi çağımızda sürtünme kaynağı birçok endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Aşağıda, sürtünme kaynağının uygulama alanlarına dair örnekler verilmiştir:

Makine İmalatı: Dişli çarklar, piston kolları, hidrolik silindirler, radyal pompa pistonları ve piston kolları, iğler, sonsuz vidalı miller, krank milleri, matkap uçları (Şekil 3.29) [38].



Şekil 3.29. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş dizel motor pistonu [31,44].

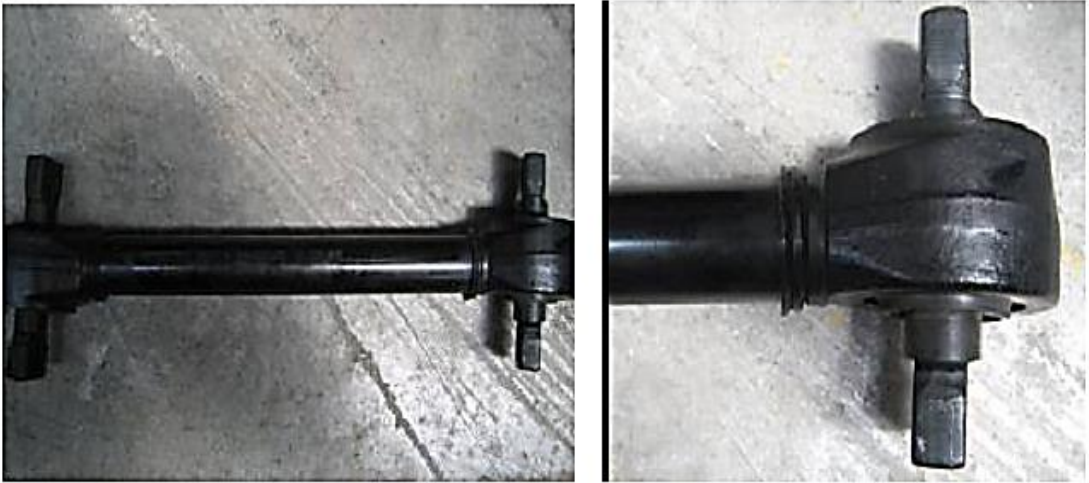
Otomotiv Endüstrisi: Supaplar, kardan milleri, fren milleri, akslar (rotkolu, çeki kolu, stabilizer vb), vites kolları, turbo dondurucular, ön yıkama odaları, şanzıman parçaları, ön ısıtma odaları, boru milleri, taşıyıcı aks boruları (Şekil 3.30-3.32) [31].



Şekil 3.30. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş egzoz supapları [31,44]



Şekil 3.31. Ticari araçlarda kullanılan, sürtünme kaynağı ve sıcak presleme uygulanmış “V” çeki kolları [31].



Şekil 3.32. Ticari araçlarda sürtünme kaynağı uygulanmış çeki kolları [31].

Havacılık ve Uzay Tekniği: Rotorlar, türbinler, miller, yanma odaları, itme jetleri (memeleri), borular, flanşlar, fittingsler (Şekil 3.33) [38].

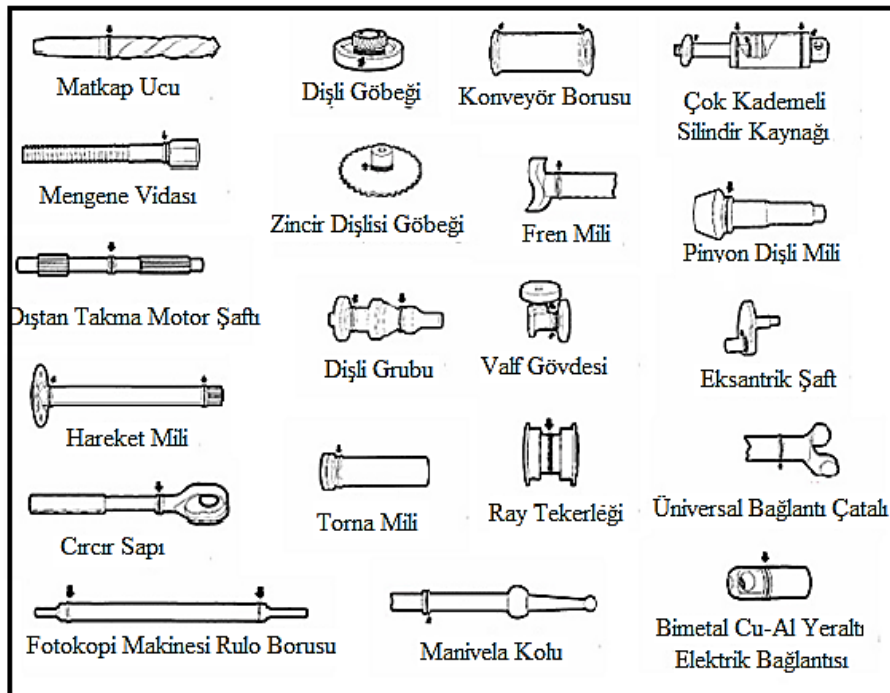


Şekil 3.33. Sürtünme Kaynağı ile imal edilmiş uçak parçası [31].

İş Takım Endüstrisi: Spiral matkaplar, freze bıçakları, delik zimbaları, çelik kalemler (munçlar), raybalar [38].

Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi: Gaz analizleri için alıcı kameraları, kromatograflar için ayırma sütunları, röntgen cihazı tüpleri için döner anod milleri, sürekli lehim uçları, devre kontakları, geçiş parçaları, cihazlar ve borular, flanşlar, fittingsler, supap yuvaları, boru tesisatı bağlantıları.

Aşağıda sürtünme kaynağı ile üretilmiş çeşitli parçalara ait örnekler verilmiştir (Şekil 3.34) [38].



Şekil 3.34. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parçalara örnekler [31,46].

3.1.2.6.12. Sürtünme Kaynağının Avantajları

1. Sürtünme kaynağı metoduyla birleştirilen malzemelerde sarf edilen enerji diğer metotlara göre daha azdır. Daha düşük güç ihtiyacı ve tüketimi ile yakma alın kaynağının kullanımının imkânsız olduğu durumlarda kullanılabilir. Bazı uygulamalarda diğer kaynak yöntemlerine göre %70-80 daha düşük güç tüketimi olmaktadır.
2. Sürtünme kaynağında malzeme kaybının az olması ve diğer yöntemler ile kaynak edebilme imkânının olmadığı malzemeleri kaynak edebilmeyi sağlaması nedeniyle ciddi şekilde malzeme maliyetinde tasarruf sağlamaktadır [30,47].
3. Diğer kaynak yöntemleri ile gevrek faz oluşumu nedeniyle, yetersiz mekanik özellikler elde edildiği için birleştirilemeyen pek çok alaşım çoğu kez sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilir [30].
4. Kaynak sırasında bölgesel ısıtma ve ergime derecelerinin altında bir sıcaklıkta kaynak yapıldığı için, farklı metallerin kaynağını yapmak mümkündür.
5. Sürtünme kaynağında kaynaklanan bölgenin dayanımı, birleştirilen malzemelerin dayanımına denk, bazı durumlarda da yüksek olabilmektedir. Sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olduğu için kaynak bölgesi cüruf vs. içermez
6. Sürtünmenin etkisiyle bütün oksit ve diğer yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır.
7. Sürtünme sonucunda meydana gelen ısı, bölgesel olduğu için kaynak dikişinin her iki tarafında ısıdan etkilenen bölge çok dardır ve herhangi bir dönüşüm meydana gelmez.
8. Kaynak süreci içerisindeki yığılma kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korur [3,30,48].
9. Yöntemin pek çok uygulamasında otomatik olarak parça yüklenmesi, boşaltılması ve bunun yanında kaynak edilmiş parçaların diğer operasyonlara transferi sağlanabilir.
10. Sürtünme kaynağı sırasında kıvılcım çıkmadığı için makineler operatörlerin bulunduğu alanların yakınına kurulabilir ve alan tasarrufu sağlanır [30,47].
11. Kaynak parametrelerini kontrol edebilmek basittir.
12. Sadece silindirik değil, çok farklı kesitteki malzemelerin kaynağını yapmak mümkündür [31].

3.1.2.6.13. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları

1. Sürtünme kaynağına sınırlandırılan en büyük etken parçanın geometrik biçimidir. Her ne kadar günümüzde özel yöntemler geliştirilmişse de bağlantısı yapılacak parçalardan birinin bir eksene göre simetrik olması ve çoğu kez bir eksen tarafında dönebilir olması istenir.
2. Sürtünme kaynağını sınırlandıran diğer önemli bir etken ise, kesit alanıdır. Kesit alanının çok büyük olması, motor gücünün ve yığma basıncı değerlerinin çok yüksek olmasına neden olur [30,49].
3. Kaynak sonunda birleştirilen ebatlar aksenal kısalmaya uğradıkları için malzeme sarfiyatına sebep olmaktadır.
4. Sürtünme kaynağı makine ve donanımlarının maliyeti yüksektir [30,50].
5. Kaynak sonrası gevrekleşme söz konusudur.
6. İş parçasının boyutları, sürtünme kaynak makinesinin boyutlarıyla sınırlanmaktadır.
7. Oksijene karşı büyük ilgi vardır.
8. Su verilmiş veya su alınmış malzemelerde mukavemet düşer.
9. Özellikle yüksek karbonlu çeliklerde kaynak sonrasında sertleşme söz konusu olur [31].

3.2. Paslanmaz Çelikler

3.2.1. Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi

Demirin ilk kez üretimi M.Ö 1400 yıllarına rastlamaktadır. Zamanla demir alaşımları geliştirilmiştir. Demir, ilk olarak Cort ‘un geliştirdiği bir yöntemle üretilmiştir. Daha sonra Henry Bessmer pinomatik sistemlerle seri çelik üretimini gerçekleştirmiştir. Zamanla günlük üretimi bir milyon tonu bulan elektrik fırınları ve oksijen üfleli konverterler geliştirilmiştir. Çeliğin seri bir şekilde üretilmesi ile malzeme bilimi çok önem kazanarak ilginç bir hal almaya başlamış ve bu konuda birçok araştırmalar yapılmıştır. 1890 yılına kadar çeliğin yapısı ve özellikleri hakkında metodik olarak yapılan araştırmalar mevcut değildi. 1920’li yıllarda metalürjisiler metalürjik özellikleri araştırmak için x-ışını kırılmasından yararlanıyordu. Sonradan Sorby adlı araştırmacı tarafından mikroskobik teknikler kullanılmaya başlandı. Aslında, krom elementi Alman kimyacı M.H. Klaproth ve

Fransız analizci L.N. Vaguelin tarafından 1797 yıllarında doğal filizlerinden kimyasal yollarla üretilmesine rağmen, paslanmaz karakteristikli demir-krom alaşımları yüzyıl sonrasına kadar keşfedilemedi. 1900-1915 yılları arasındaki dönemler ise, metalürjik buluşların artmaya başladığı dönemlerdir. Bu dönemlerde demirin allotropik yapısının incelenmesi ve demirin özelliklerine karbon elementinin etkileri araştırılmış, metal sistemlerindeki uygulamalar bilim adamları tarafından zamanla kabul edilmiştir. Demirin mikro yapısındaki dönüşümler mikroskopla, sıcaklık ölçümleri ise termokupullarla yapılmaya başlanmıştır. Dilatometre ve x-ışını gözlemleri ile ilgili yöntemler araştırılmıştır. Bu süreç, paslanmaz çeliklerin başlangıç periyodunu oluşturmaktadır. Carl Zappfe isimli bilim adamı paslanmaz çeliklerle ilgili kitabında ilk kez bu çelikleri incelemiş, daha sonra Almanya ve Fransa’da bu çelik türleri ve kullanım alanları araştırılmıştır.

Alman bilimci paslanmaz çeliklerin korozyon direncini ve birçok özelliklerini, bu çeliklerdeki krom içeriğini molibden ve karbonun çeliğe etkilerini araştırmış; bu doğrultuda diğer araştırmacılarda, Amerika’da ve Avrupa’da paslanmaz çeliklerin endüstrideki önemini vurgulamışlardır. Giessen ve Porte isimli bilim adamları bu çeliklerde kullanılan alaşım elementlerinin endüstrideki yerini saptamışlardır. Östenitik paslanmaz çeliklerle ilgili 1940’lı yıllarda ortaya çıkan ilk yenilik östenit grubunda krom nikelli paslanmaz çeliklerde nikel elementi yerine Krom’a manganın katılması işlemidir. II. Dünya Savaşı sırasında nikelin piyasada yeterince olmayışından doğan bir zorunluluk olarak bu alaşımlar, Avrupa’da geliştirilmiş ve standart gruplar haline getirilmiştir. Genellikle krom çeliklerinde, sadece krom ve manganez ile malzemeyi östenitik paslanmaz çelik şekline getirmek mümkün değildir. Bu nedenle mangan elementi nikel kadar etkili olamaz, mutlaka bir miktar nikel’in (%5 oranının üzerinde) yapıya katılması zorunlu olmaktadır. Bu zorunluluk ise, Dünya’da çok az bir yerde üretilen ve çoğunluğunun Kanada gibi Avrupa’ya uzak olan bir ülkeden temin edilmesi nikel ihtiva etmeyen ve daha düşük maliyetli ferritik paslanmaz çeliklerin kullanımını cazip hale getirmiştir. Azot elementi bu çeliklerde östenit oluşturmada güçlü bir etkiye sahiptir. Nikelin bir kısmı yerine çeliğe mangan katılması mümkündür. Bu tür alaşımlarda azot miktarı en çok % 0.25’dir. Son yıllardaki II. büyük gelişme olarak paslanmaz çeliklere karbür yapıcı elementlerin katılması, katılan elementlerin çeliğe mükemmel metalürjik özellikler kazandırması ve buna bağlı olarak söz konusu çeliklerin kullanım alanlarının dikkate değer ölçülerde genişlemesi gösterilebilir [51].

Paslanmaz elikler; içerisinde en az % 10,5 oranında (ağırlıkça) krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Paslanmaz eliğın yüzeyinde oluşan ince, fakat yoğun krom oksit tabakası korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru ilerlemesini engeller [52].

Paslanmaz elik esas olarak oksitleyici ortamlarda paslanmayan çeliklerin genel adıdır. Özellikle nikel ve molibden, eliğın paslanmazlık özelliğini iyileştirmek için alaşım yapımında kullanılsa da paslanmazlığı sağlayan element kromdur. Dünyada üretilen eliğın çoğu karbonlu ve alaşımlı çeliktir. Karbon ve alaşımlı çeliğe göre paslanmaz eliğın, daha küçük fakat cazip ve gelişen bir pazarı vardır [53,54].

Paslanmaz yapı çeliklerinin karbon oranı da en çok %1,2'dir. Paslanmaz elikler normal atmosfer şartlarına ve suya dayanıklıdır. Asitli ve koroziif ortamlarda dayanım da bu çeliklerin büyük bir bölümünde iyidir. Paslanmaz eliklerde en önemli alaşım elementi kromdur. Kromun oksijene karşı olan afinitesi demirden fazla olduğu için mevcut oksijenle kendisi birleşerek 20-30 mm kalınlığında pasif Cr₂O₃ tabakası oluşturur [53, 55]. Bu film tabakası oksitleyici ortamlarda kararlı ve stabil olurken indirgen ortamlarda stabilitesini kaybeder ve tabaka incelmeye başlar. Film herhangi bir nedenle hasar görebilir. Bu durumda pasif film tabakası oksitleyici ortamlarda kendi kendini tamir eder. Artan krom, nikel ve molibden miktarı ile pasif film tabakasının stabilitesi artarken daha şiddetli koroziif ortamlara karşı direnç de artar [53].

Alaşım elementi olarak eliğın içinde % 12' yi aşan miktarda kromun bulunması, çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, HNO₃ (nitrik asit) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur. Buna karşın sadece krom içeren elikler HCl (hidroklorik asit) ve H₂SO₄ (sülfirik asit) gibi asitlere karşı dayanıklı değildir. Bu asitler yüzeyi koruyan kromoksit tabakasını ortadan kaldırır ve dolayısı ile elik kromsuz kalır. Günümüz endüstrisinde redükleyici asitlere karşı iyi bir dayanım gösteren, içinde nikel, molibden gibi alaşım elementleri bulunan paslanmaz çelikler imal edilmektedir. Bu tür çelikler yapılarında kromun yanı sıra yüksek miktarlarda nikel ve molibden içerirler. Bu alaşım elementleri çeliklerin mikro yapılarını etkin bir şekilde değiştirerek; paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına yardımcı olur [53,56].

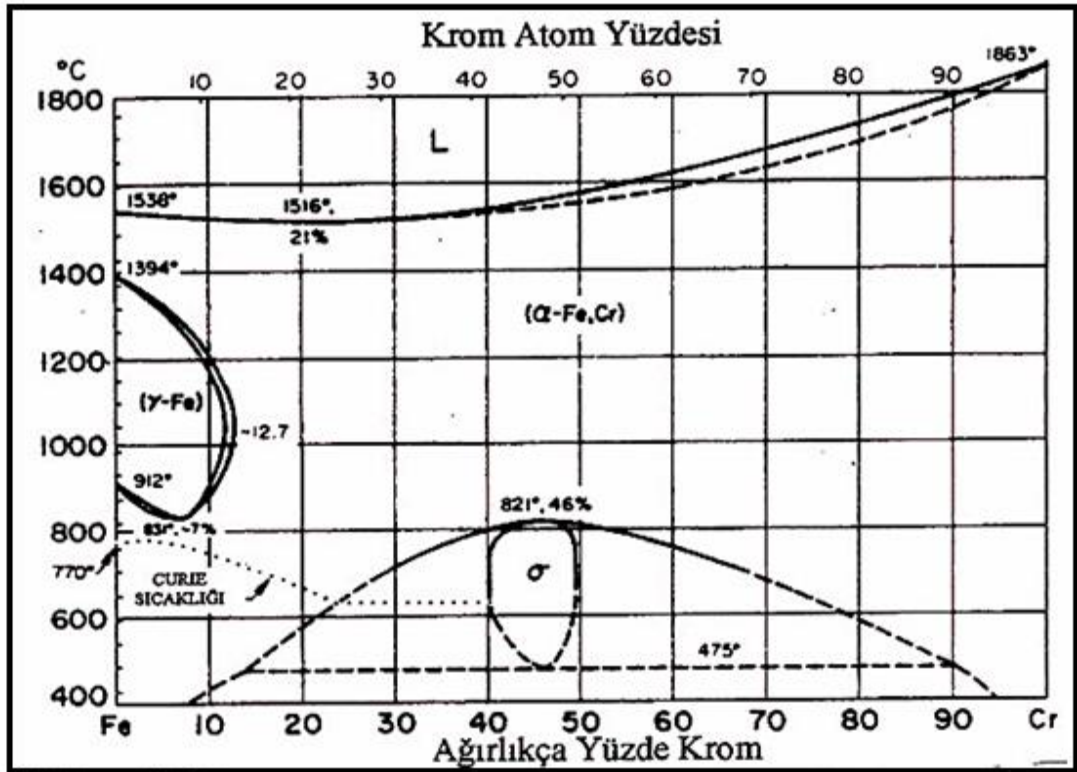
Paslanmaz elikler içerisinde bulunan alaşım elementleri ferrit ve östenit oluşturucu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Ferrit ve östenit oluşturucu ve nötr elementlerin fonksiyonları Tablo 3.2' de verilmiştir [57,58].

Tablo 3.2. Ferrit, östenit oluşturu elementler ile nötr elementler ve etkileri [57,58].

ELEMENT	ETKİLERİ
Krom	Ferrit oluşumunda etkili olmakta, malzemenin oksidasyon ve korozyon dayanımının yükselmesine katkı sağlamaktadır.
Molibden	Ferrit oluşumunda etkili olup malzemenin yüksek sıcaklıklarda dayanıklı olmasını ve redükleyici ortamlarda malzemelerin korozyona karşı dirençlerinin artmasını sağlamaktadır.
Niyobyum ve Titanyum	Bu elementler paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyon hassasiyetinin azaltılması amacıyla, karbonla birleşerek karbür oluşturmaları için yapıya eklenmektedir. Niyobyum karbür yapıcı element olup, ilave olarak tanelerin küçülmesine ve ferrit oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Paslanmaz çelik malzemenin sürünme dayanımını sağlar, ancak sürünme sünekliğini azaltmaktadır. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlarda sertliğe ve mukavemet değerlerine katkıda bulunması için katılmaktadır. Ayrıca bazı martenzitik paslanmaz çelik türlerinde bünyedeki karbonu bağlayarak, çeliğin sertleşme eğiliminin azaltılması için katılmaktadır.
Fosfor, Kükürt, Selenyum	Paslanmaz çeliklerin işlenebilme kabiliyetini yükseltmekte ancak kaynak sırasında sıcak çatlak oluşmasına neden olması nedeniyle kaynak kabiliyetini sınırlamaktadır. Paslanmaz çeliklerin TIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirildiğinde nüfuziyetin artmasına katkıda bulunmaktadır.
Karbon	Paslanmaz çelik malzemelerde kuvvetli östenit oluşturu element olup krom ile reaksiyona girerek taneler arası korozyona neden olan karbürleri oluşturmaktadır.
Nikel	Östenit oluşumunu sağlamakta ve paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıkta direnci, korozyona karşı dayanımı ve sünekliğini arttırmaktadır.
Azot	Östenit oluşumuna çok kuvvetli etkide bulunmakta olup, çoğu zaman östenit oluşturmada nikel elementi kadar etkilidir.
Bakır	Paslanmaz çeliklere, bazı ortamlardaki korozyon dayanımlarını arttırmak amacıyla katılmakla beraber gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti azaltır ve yaşlanma yoluyla sertleşmeyi teşvik etmektedir.
Mangan	Düşük sıcaklıklarda östenitin kararlı olmasını sağlarken yüksek sıcaklıklarda ferrit oluşturmaktadır. Ayrıca manganer sülfat oluşturmaktadır.
Silisyum	Paslanmaz çelik malzemelerin tufallenmeye karşı dayanımını yükseltmekte olup yapıda %1'den daha fazla olması durumunda ferrit ve sigma oluşumuna etki etmektedir. Her tür paslanmaz çeliğe oksit giderme amacıyla düşük oranda eklenir. Akışkanlığı artırmakta ve kaynak metalinin ana metali daha iyi ısıtmasını sağlamaktadır.

Paslanmaz çeliklerin temelini demir-krom sistemi oluşturmaktadır olup Şekil 3.35’de demir krom faz diyagramı verilmiştir. Krom, hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahiptir. Demir karbon denge diyagramında yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısına sahip östenitik yapı oluşturan bölge olan östenit (γ) kapalı hale getirir ve 1000 °C sıcaklığında % 12 kadar krom çözünürlüğüne sahiptirler. Yapıda % 12’den fazla krom içerdiğinde demir-krom alaşımları YMK’den HMK’e dönüşüm göstermezler.

Düşük sıcaklıklarda demir krom faz diyagramı, tamamı katı eriyik olmayıp 821 °C altında yaklaşık % 46 krom içeren sert ve kırılğan olan σ oluşmaktadır. Fe-Cr alaşımlarına karbon katıldığında östenit alanları genişlemektedir [57,59].



Şekil 3.35. Demir krom faz diyagramı [57,59].

3.2.2. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Krom miktarı yükselterek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile ilave olumlu etkiler sağlanmaktadır. Bu şekilde makine tasarımcıları ve imalatçıları değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz

çeliği seçme şansına sahip olurlar. Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Paslanmaz çeliklerin içerisinde, paslanmazlık özelliği sağlayan elementlerin yanı sıra, diğer bazı gereksinimleri karşılamak üzere isteyerek katılan alaşım elementleri veya kaçınılmaz olarak bulunan karbon ve alaşım elementleri bulunmaktadır [53,60].

Paslanmaz çelikler ile ilgili çıkan en son standart EN 10088'dir. Bu standartta paslanmaz çelikler aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

1. Ferritik paslanmaz çelikler,
2. Östenitik paslanmaz çelikler,
3. Martenzitik paslanmaz çelikler,
4. Dupleks paslanmaz çelikler,
5. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler [53,55].

3.2.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler SAE – AISI 400 serisi paslanmaz çelikler sınıfındandır. Bu çelikler genellikle % 11-28 arasında Cr içeriğine sahiptirler.

Ferritik paslanmaz çeliklerin tamamı ergime sıcaklığından oda sıcaklığına kadar ferritik olarak bilinen hacim merkezli kübik (KHM) kristal kafes sistemine sahiptirler. Yüksek Cr içeriğine sahip alaşımlar, istenilmeyen tetragonal sigma (σ) fazının çökmesiyle gevrekleşebilirler. σ fazı, yaklaşık 440 °C gibi düşük bir oluşum sıcaklığına sahiptir. Yüksek saflıklı ferritik paslanmaz çeliklerde, Cr ve Mo içeriği σ fazının çökeltme sıcaklığını yaklaşık 1000 °C'ye kadar yükseltir [61].

Ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklerden daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük sünekliğe sahiptirler. Oda sıcaklığında korozyon direncinin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılırlar. Ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklerden daha ucuzdurlar [62].

Ferritik paslanmaz çeliklerin darbe tokluğu üzerine parça kalınlığının önemli bir etkisi vardır. Bu çelikler, aynı zamanda soğutma hızı hassasiyetine sahiptirler. Soğutma hızına bağlı olarak karbür ve nitrür çökelmeleri tane sınırları boyunca aynı hızda, matriste ise rastgele dağılıma sahiptir. Bu yüzden tane boyutu, süneklik ve tokluk açısından önemli bir faktördür.

Ferritik paslanmaz çelikleri üç grupta sınıflandırabiliriz. I. grup alaşımlar, standart ferritik paslanmaz çeliklerdir. II. grup alaşımlar, standart alaşımların biraz değiştirilmiş versiyonudur. III. grup alaşımlar ise çok düşük oranda ara yer elementi (C, N ve O) içerirler.

I.grup ferritik paslanmaz çelikler, korozyon ve yüksek sıcaklıklarda pul pul dökülmeye, yani hidrojen kırılabilirliğine karşı dayanıklıdır. Tablo 3.3’de standart tip I. grup ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri görülmektedir. Bu alaşımların kaynak işlemi sonrası martenzitik durum ve tane büyümesinden dolayı korozyon direnci, tokluk ve sünekliğinin azaldığı bilinmektedir. Bu alaşımların kaynağında ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıtma işlemi gereklidir [61].

Tablo 3.3. I. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler [61].

Tipi	% Bileşim			
	C	Cr	Mo	Diğer
429	0.12	14.0-16.0	-	-
430	0.12	16.0-18.0	-	-
430 F	0.12	16.0-18.0	0.6	0.06 P
430 FSe	0.12	16.0-18.0	-	-
434	0.12	16.0-18.0	0.75-1.25	0.6 Nb + Ta
436	0.12	16.0-18.0	0.75-1.25	-
442	0.20	18.0-23.0	-	-
446	0.20	23.0-27.0	-	-

II. grup ferritik paslanmaz çelikler kaynak edilebilirliği düzeltmek ve diğer özelliklerin geliştirilebilmesi için standart tip ferritik paslanmaz çeliklerin biraz değiştirilmiş halidir. Bu gruptaki ferritik paslanmaz çelikler daha düşük oranda C ve Cr içerir. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları ve aynı zamanda tarımsal ilaçlama tankları ve otomotiv sanayinde kullanılmaktadırlar. Tablo 3.4’de II. grup standart tip ferritik paslanmaz çelikler görülmektedir.

Tablo 3.4. II. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler [61].

Tipi	% Bileşim				
	C	Cr	Mo	Ni	Diğer
405	0.08	11.5-14.5	-	-	0.1-0.3 Al
409	0.08	10.5-11.5	-	0.5	0.48-0.75 Ti
409 C	0.02	12.5	-	0.2	0.4 Nb
441	0.02	18.5	-	0.3	0.7 Nb, 0.3 Ti
AL 433	0.02	19.0	-	0.3	0.4 Nb, 0.5 Ti
AL 446	0.01	11.5	-	0.2	0.2 Nb, 0.1 Ti
AL 468	0.01	18.2	-	0.2	0.2 Nb, 0.1 Ti
YUS 436 S	0.01	17.4	1.2	-	0.2 Ti
439	0.07	17.0-19.0	-	0.5	0.5-1.0 Ti
12 SR	0.2	12.0	-	-	1.2 Al, 0.3 Ti
18 SR	0.04	18.0	-	-	2 Al, 0.4 Ti
406	0.06	12.0-14.0	-	0.5	2.75-4.25 Al, 0.6 Ti

III. grup ferritik paslanmaz çelikler yüksek Cr ve Mo içerikli ferritik paslanmaz çeliklerdir ve genel korozyon, oyuklaşma (pitting) korozyonu ve gerilmeli korozyon kırılmasına karşı dayanıma sahiptirler. Bu alaşımlar, kaynak işlemi sonrası korozyona dayanıklı, tok ve sünekliğe sahip olabilmesi için, hem vakum ortamında elektron ışınlı veya vakum ortamında indüksiyonla ergitme, hem de vakum ortamında oksijen ile dekarbürize edilerek üretilmelidir.

İçerisinde 150 ppm'den daha az arayer elementi (C+N) bulunan III. grup paslanmaz çelikler ultra yüksek saflığa sahip ferritik paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. Bu alaşımlarda saflık, yüksek Cr içeriğinden dolayı tokluk ve kaynak edilebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Alaşıma az miktarda Nb katılarak kaynaklı malzemelerde korozyon direnci düzeltilebilir [61]. Tablo 3.5'de standart tip III. grup ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Tablo 3.5. III. Grup standart 400 serisi ferritik paslanmaz çelikler [61].

Tipi	% Bileşim						
	C	N	Cr	Mo	Ni	Nb	Diğer
E-Brite 26-1	0.01	0.015	25-27	0.75-1.5	0.30	0.05-0.20	0.4 Mn
AL 29-4-2	0.01	0.020	28-30	3.5-4.2	2-2.5	-	-
AL 29-4	0.01	0.020	28-30	3.5-4.2	0.15	-	0.3 Mn
SHOMAC 30-2	0.003	0.007	30	2	0.2	-	0.3 Mn
YUS 190 L	0.004	0.0085	18	2	0.4	-	-

Ferritik paslanmaz çeliklerin temel özellikleri kısaca aşağıda belirtildiği gibidir:

- Korozyon dayanımı, krom miktarının artması ile iyileşir,
- Isıl işlemle dayanım arttırılamaz ve sadece tavllanmış durumda kullanılır,
- Manyetikler,
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür,
- Östenitik paslanmaz çelikler kadar kolay şekillendirilemezler [53,60].

Ferritik paslanmaz çelikler, ekonomiklikleri yanında üstün özellikleri nedeni ile de çok çeşitli kullanım alanları bulmuşlardır. Yaygın kullanım alanları;

- Otomobil egzozu (X2CrTi12) (AISI 409),
- Bilgisayar sürücü disket göbeği (X6Cr17)(AISI 430),
- Otomobil sanayi (kalıplama, iç döşeme, şekil verme)
- Yüksek ısı tankları (X2CrMoTi18-2)(AISI 444),
- Kömür maden işletmesi ekipmanları [53,63].

3.2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, geniş bir sıcaklık aralığında (oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar) tek fazlı KYM bir kristal kafes sistemine sahiptir. Bu yüzden, yalnızca katı eriyikli alaşımlama ve dövmeyle dayanımları artırılabilir.

Östenitik paslanmaz çelikler, orta dereceli ve şiddetli korozif ortamlar için geliştirilmiştir. Aynı zamanda kriyojenik (dondurucu) sıcaklıklardan 600 °C'ye kadar yüksek tokluğa sahiptir. Bu çelikler, manyetik olmadıkları için manyetik malzemelerin kullanılmadığı uygulamalarda da kullanılırlar.

Östenitik paslanmaz çelikler içerisinde kullanılan en yaygın tipler AISI 200 ve 300 seri alaşımlardır. Ayrıca, alaşım katkıları ve özel alaşım bileşimi, kaynak edilebilirlik ve kaynak bölgesinin mikroyapısı üzerine büyük bir etkiye sahiptir. Bu alaşımlardan AISI 300 serisi, genellikle % 8-20 Ni ve % 16-25 Cr içerir. Düşük oranlardaki alaşım katkılarında % 1 Si dezoksidasyon için, % 0.02-0.08 C östenitin kararlılığı için ve % 1.5 Mn ise hem östenitin kararlılığı hem de sülfür ve Si ile bileşik oluşturması açısından katılmaktadır. Tablo 3.6'da AISI 200 ve 300 serisi paslanmaz çelikler görülmektedir [64].

Tablo 3.6. AISI 200 ve 300 serisi östenitik paslanmaz çelikler [64].

Tipi	% Bileşim							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Diğer
201	0.15	5.5-7.5	1.0	16-18	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25 N
202	0.15	7.5-10.0	1.0	17-19	4-6	0.06	0.03	0.25 N
205	0.12-0.2	14.0-15.5	1.0	16.5-18	1-1.75	0.06	0.03	0.32-0.4 N
301	0.15	2.0	1.0	16-18	6-8	0.045	0.03	-
302	0.15	2.0	1.0	17-19	8-10	0.045	0.03	-
302 B	0.15	2.0	2.0-3.0	17-19	8-10	0.045	0.03	-
303	0.15	2.0	1.0	17-19	8-10	0.2	0.15	0.6 Mo
303 Se	0.15	2.0	1.0	17-19	8-10	0.2	0.06	0.15 Se
304	0.08	2.0	1.0	18-20	8-10.5	0.045	0.03	-
304 H	0.04-0.1	2.0	1.0	18-20	8-10.5	0.045	0.03	-
304 L	0.03	2.0	1.0	18-20	8-12	0.045	0.03	-
304 LN	0.03	2.0	1.0	18-20	8-12	0.045	0.03	0.1-0.16 N
304 Cu	0.08	2.0	1.0	17-19	8-10	0.045	0.03	3-4 Cu
304 N	0.08	2.0	1.0	18-20	8-10.5	0.045	0.03	0.1-0.16 N
305	0.12	2.0	1.0	17-19	10.5-13	0.045	0.03	-
308	0.08-0.20	2.0	1.0	19-21	10-12	0.045	0.03	-
309	0.08	2.0	1.0	22-24	12-15	0.045	0.03	-
309 S	0.25	2.0	1.0	22-24	12-15	0.045	0.03	-
310	0.08	2.0	1.0	21-26	19-22	0.045	0.03	-
310 S	0.25	2.0	1.5	24-26	19-22	0.045	0.03	-
314	0.08	2.0	1.5-3.0	23-26	19-22	0.045	0.03	-

316	0.08	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo
316 F	0.04-0.1	2.0	1.0	16-18	10-14	0.2	0.03	1.75-2.25 Mo
316 H	0.03	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.1	2-3 Mo
316 L	0.03	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3- Mo
316 LN	0.03	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo,0.1 N
316 N	0.08	2.0	1.0	16-18	10-14	0.045	0.03	2-3 Mo,0.1 N
317	0.08	2.0	1.0	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4 Mo
317 L	0.03	2.0	1.0	18-20	11-15	0.045	0.03	3-4 Mo
321	0.08	2.0	1.0	17-19	9-12	0.045	0.03	0.4 Ti
321 H	0.04-1.0	2.0	1.0	17-19	9-12	0.045	0.03	0.4 Ti
330	0.08	2.0	0.75-1.5	17-19	34-37	0.045	0.03	-
347	0.08	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.8 Mo
347 H	0.04-0.1	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.47-1 Nb
348	0.08	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.2 Co, 0.8 Nb, 0.1 Ta
348 H	0.04-0.1	2.0	1.0	17-19	9-13	0.045	0.03	0.2 Co, 0.8-1 Nb, 0.1 Ta
384	0.08	2.0	1.0	15-17	17-19	0.045	0.03	-

Östenitik paslanmaz çeliklerin en önemli alaşımı X12CrNi18.8'dir. Bu alaşımın yapısı normal ısıtıl işlemlerden sonra 1050 °C' den suya çekilir veya havada bırakılırsa ince östenit tanelerinden meydana gelir. Oda sıcaklığında kararlı olan bu yapı, yüksek sıcaklıklarda kararlılığını yitirir. Oda sıcaklığında çeliğin mikroyapısı östenit + (δ)-ferrit ve (Cr,Fe)₄C karbürlerinden oluşur. Bunun dışında σ-fazı da yapıda görülebilir [65].

Östenitik paslanmaz çeliklerin temel özellikleri kısaca aşağıda belirtildiği gibidir:

- Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler,
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir,
- Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilirler,
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır,
- Yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir,
- Manyetik değildirler (tavlanmış halde),
- Dayanımları sadece pekleşme ile arttırılabilir.

Bu çeliklerin yaygın kullanım alanları;

- Bilgisayar disket sürücüleri, kapakları ve yayları,

- Mutfak lavabosu,
- Yemek hazırlama ekipmanları,
- Mimari uygulamalar,
- Bilgisayar klavyesi ve tuşlarının yayları,
- Kimyasal gübre hazırlama ekipmanlarıdır.

3.2.2.3. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler; Fe, Cr, Ni sistemine dayalı iki fazlı alaşımlardır. Bu alaşımlar, mikroyapıda eşit oranda KHM ferrit ve KYM östenit bulundurur. Dupleks paslanmaz çelikler düşük karbon içeriği ($\% < 0.03$) ve Mo, N, W ve Cu katkılarıyla bilinirler. Genellikle $\% 20-30$ Cr ve $\% 5-10$ Ni içerirler. Dupleks paslanmaz çeliklerin geleneksel 300 serisi paslanmaz çeliklerden üstün özellikleri; gerilmeli korozyon kırılma dayanımı, mukavemet ve oyuklaşma (pitting) korozyonu dayanımıdır. Bu malzemeler asitler ve sudan kaynaklanan klora karşı direncin gerektiği orta dereceli sıcaklık (-60 ile $+300$ °C) alanlarında kullanılırlar. Ticari olarak kullanılan dupleks paslanmaz çelik tipleri Tablo 3.7’de görülmektedir.

Dupleks paslanmaz çeliklerin alaşım katkıları hem östenit hem de ferrit oluşturmalarıdır. Dupleks paslanmaz çeliklerde kullanılan ana alaşım elementleri içerisinde Cr ve Mo ferrit oluşturuu, Ni, C, N ve Cu östenit oluşturmaktadır. Östenit ve ferrit oluşturmaları alaşım elementlerinin dengesi malzeme mikroyapısını oluşturmaktadır.

Dupleks paslanmaz çeliklerin sahip olduğu yüksek alaşım içeriği ve ferritik bir matris gevrekleşmesine karşı hassasiyeti ve mekanik özellik kaybını ve özellikle de tokluğu düzeltir. Bu çelikler daha çok yağ, gaz, petrokimya ve kağıt endüstrisi gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır [66].

Tablo 3.7. Ticari olarak kullanılan dubleks paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri [66].

Tipi	% Bileşim								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
S 31200	0.03	2.0	1.0	24-26	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20	690	450
S 31500	0.03	1.2-2	1.4-2	18-19	4.25-5.25	2.5-3.0	0.05-0.1	630	440
S 31803	0.03	2.0	1.0	21-29	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	620	450
S 32304	0.03	2.5	1.0	21-24	3.0-5.5	0.05-0.6	0.05-0.2	600	400
S 32550	0.03	1.5	1.0	24-27	4.5-6.5	2.9-3.9	0.1-0.2	760	550
S 32750	0.03	1.2	1.0	24-26	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	800	500
S 32760	0.03	1.0	1.0	24-26	6.0-8.0	3.0-4.0	0.3	750	550
S 32900	0.03	1.0	0.75	23-28	2.5-5.0	1.0-2.0	-	620	485
S 32950	0.03	2.0	0.60	26-29	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15-0.35	690	480

3.2.2.4. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, 585-795 MPa akma gerilmesi ve sertleşebilir 400 seri paslanmaz çeliklerden daha üstün korozyon direncine sahip Fe-Cr-Ni alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, Cu, Al, Ti, Nb ve Mo gibi elementlerin biri veya birkaçı kullanılarak çökelme sertleşmeli martenzitik ve östenitik hale gelirler. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, martenzit başlama ve bitiş sıcaklıklarına dayanarak martenzitik, yarı östenitik ve östenitik olmak üzere üç ayrı isimde gruplandırılabilir. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri Tablo 3.8’de verilmiştir [67].

Tablo 3.8. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri [67].

Tipi	% Bileşim								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
Martenzitik Tip									
PH 13-8 Mo	0.05	0.1	0.1	12-15	7.5-8.5	2.0-2.5	0.9-1.3 Al	1410	1520
15-5 PH	0.07	1.0	1.0	14-15	3.5-5.5	-	2.5-4.5 Cu	1170	1310
17-4 PH	0.07	1.0	1.0	15-17	3.0-5.0	-	3-5Cu,0.3 Nb	1170	1310
Custom 450	0.05	1.0	1.0	14-16	5.0-7.0	0.5-1.0	1.5Cu,0.4Nb	655	895
Custom 455	0.05	0.5	0.5	11-12	7.5-9.5	0.5	2Cu,1.2Ti,0.5 Nb	1520	1620
Yarı Ost. Tip									
PH 15-7 Mo	0.09	1.0	1.0	14-16	6.5-7.7	2.0-3.0	0.75-1.5Al	1210	1380
17-7 PH	0.09	1.0	1.0	16-18	6.5-7.7	-	0.75-1.5Al	1030	1275
AM-350	0.09	0.5	0.5	16-17	4.0-5.0	2.5-2.5	0.1 N	610	1380
AM-355	0.15	0.5	0.5	15-16	4.0-5.0	2.5-3.5	0.1 N	1070	1170
Ostenitik Tip									
A-286	0.08	2.0	1.0	13-16		1.0-1.5	2Ti,0.3Al,0.3V	105	724
JBK- 75 (b)	0.015	0.02	0.02	13-16		1.5	2Ti,0.2Al,0.2V	-	

17-4 PH gibi martenzitik PH çelikler, yüksek normalizasyon sıcaklığından havada soğutmayla tamamen martenzite dönüşebilmektedir. Bunlar oda sıcaklığının hemen üzerinde bulunan bir M_f sıcaklığına sahiptirler. Bu yüzden oda sıcaklığında martenzitiktirler. Sertleşme, 680-620 °C'de 1-4 h süreyle yaşlandırma işlemi sonucunda elde edilir.

17-7 PH alaşımı gibi yarı östenitik çökelme sertleşmeli çelikler, Ms sıcaklığının oda sıcaklığından oldukça düşük olduğu dengeli bileşim oranlarına sahiptirler. Bu yüzden, ısıtılma sıcaklığından soğutulduklarında sünek, aynı zamanda rahatlıkla şekillendirilebilen bir yapıya sahip olurlar. şekillendirme işlemi sonrasında martenzite dönüşüm, uygun bir ısıtılma işlemle C ve diğer alaşım elementlerinin çökelmesi sonucu Ms ve Mf sıcaklıklarının artmasıyla elde edilir. Eğer düşük bir ısıtılma sıcaklığı (730-760 °C) kullanılırsa, Mf sıcaklığı oda sıcaklığı civarına yükselir ve martenzit dönüşümü soğumayla elde edilir. Eğer yüksek bir ısıtılma sıcaklığı (930-955 °C) kullanılırsa bu durumda daha az karbon çökelir ve Mf sıcaklığı sıfırın altında kalır. Bu durumda martenzit dönüşümü elde etmek için soğutmak gerekir. Martenzitik dönüşüm aynı zamanda soğuk dövmeyle de elde edilebilir. Tüm bu durumlarda martenzitik yapı 455-565 °C'lik bir sıcaklık alanında yaşlanmayla sertleştirilebilir.

Östenitik PH çelikler; (A-286 gibi) martenzite dönüştürülemediklerinden düşük Ms sıcaklığına sahiptirler. Bu tip çeliklerde sertleştirme östenitik bir martenzite intermetalik bileşiklerin çökelmesiyle elde edilir. Herhangi bir alaşım için geniş bir özellik alanı uygulanan değişik ısıtılma işlemlerle elde edilebilir. Bununla beraber uygun mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için belirli standart ısıtılma işlemler kullanılır [67].

Çökelme sertleşme yapılabilen paslanmaz çeliklerin özellikleri;

- Orta ile iyi derecede korozyon dayanımı vardır,
- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler,
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir,
- Manyetikler.

Tipik kullanım yerleri, dişli kutuları, yakıt tankları, uçak motorları, buhar türbinleri ve kesme takımlarıdır [53].

3.2.2.5. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, kübik hacim merkezli (KHM) veya sertleştirilmiş halde tetragonal kristal kafes sistemine sahip Cr-C alaşımlarıdır. Ferromanyetikler ve ısıtılma işlemle sertleştirilebilirler. Martenzitik paslanmaz çelikler genellikle atmosferik korozyona karşı dirençlidirler. Cr içerikleri genellikle % 11-18, C içeriği ise % 1,2'ye kadar çıkabilir. Cr ve C oranları sertleştirme sonrası martenzitik bir yapı elde etmek için dengelenmiştir. Tablo 3.9'da standart tip martenzitik paslanmaz çelikler verilmiştir [68].

Tablo 3.9. Standart tip martenzitik paslanmaz çelikler [68].

Tipi	% Bileşim							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Diğer
403	0.15	1.0	0.5	11.5-13.0	-	0.04	0.03	-
410	0.15	1.0	1.0	11.5-13.0	-	0.04	0.03	-
414	0.15	1.0	1.0	11.5-13.0	1.25-2.25	0.04	0.03	-
416	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.15	0.6 Mo
416 Se	0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.03	0.15 Se
420	Min 0.15	1.0	1.0	12.0-14.0	-	0.04	0.03	-
420 F	Min 0.15	1.25	1.0	12.0-14.0	-	0.06	0.15	0.6 Mo
422	0.20-0.25	1.0	0.75	11.5-13.0	0.5-1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo
431	0.20	1.0	1.0	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	0.15-0.3 V
440 A	0.60-0.75	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo
440 B	0.75-0.95	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo
440 C	0.95-1.20	1.0	1.0	16.0-18.0	-	0.04	0.03	0.75 Mo

En yaygın olarak kullanılan 410 tipi martenzitik paslanmaz çelik, % 12 Cr içeriği ile yüksek mukavemet özelliğine sahiptir. Molibden, 422 tipi paslanmaz çeliklere mekanik özellikleri ve tane sınırı korozyonuna karşı korozyon direncini artırmak için katılmıştır. Nikel, 414 ve 431 tipi paslanmaz çeliklere yine aynı nedenlerle katılmaktadır. Martenzitik paslanmaz çeliklerde korozyon dayanımını artırmak için daha yüksek Cr miktarları da kullanılmıştır.

410 tipi martenzitik paslanmaz çelikler, buhar tribünleri, jet motorları ve gaz tribünlerinde kullanılmaktadır. Daha yüksek C içeriğine sahip 440 tipi paslanmaz çelik, çatal-bıçak takımı, cerrahi dişçilik aletleri, makaslar, yaylar, valfler, dişliler, şaftlar, kamlar ve bilyeli yataklarda kullanılmaktadır [68].

% 13 Cr ve düşük karbon içerikli çelikler süper martenzitik paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. Bu çelikler özellikle yağ ve gaz endüstrisinde kullanılmaktadır. Süper martenzitik paslanmaz çelikler, kaynak edilebilir martenzitik paslanmaz çelikler veya süper 13 Cr çelikleri olarak adlandırılırlar. Tablo 3.10'da süper martenzitik paslanmaz çelik tipleri görülmektedir.

Tablo 3.10. Süper martenzitik paslanmaz çelik tipleri [68].

Tipi	% Bileşim								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer
X80 11Cr-2Ni	<0.015	<2	0.15	11	2	<0.5	0.4	<0.012	-
HP 13 Cr	<0.03	0.4	<0.3	13	4	1	-	0.05	-
D 13.5.2N	0.02	0.7	0.3	13.3	4.8	1.6	0.1	0.08	-
X80 12Cr-4.5Ni	<0.015	<2	0.15	12	4.5	1.5	0.4	0.012	-
CRS	0.02	0.5	0.3	12.5	4.5	1.5	1.5	0.05	-
Super 13 Cr	0.02	0.5	0.2	12.2	5.5	2	0.2	0.02	0.2V
Super 13 C	0.02	0.4	0.2	12.5	5	2	-	<0.08	-
Super 13 Cr-6- 2.5-Ti	<0.01	0.4	0.3	12	6.2	2.5	-	<0.01	0.07 Ti
X80 12 Cr- 6.5Ni-2.5Mo	<0.015	<2	0.15	12	6.5	2.5	0.4	<0.012	-

Bu yeni kaynak edilebilir martenzitik çelik tipleri, yüksek dayanım, tatlı ve ekşi ortamlarda iyi korozyon direnci ve -40 °C'nin altında uygun kırılma tokluğu gibi özelliklerin tamamına sahiptir. Mikroyapısı, yüksek dayanım ve tokluğa sahip düşük karbonlu temperlenmiş martenzitten meydana gelir. Çekme dayanımları, 780-1000 MPa arasındadır.

3.2.2.5.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Martenzitik paslanmaz çelikler, normal şartlarda 275 MPa'lık bir akma dayanımına sahiptirler. Bununla birlikte, C içeriğine bağlı olarak sertleştirme ve temperleme sonrası 1900 MPa'lık bir akma dayanımı seviyesi elde edilebilir. Bu alaşımlar aynı zamanda, iyi süneklik ve tokluk özelliğine de sahiptirler. Uygulanan ısı işleme bağlı olarak sertlik değerleri 150 HB'den 600 HB'ye kadar değişebilir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin temel oda sıcaklığı özellikleri Tablo 3.11'de görülmektedir.

Tablo 3.11. Martenzitik paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı mekanik özellikleri [68].

Tipi	Uygulanan işlem	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik
403	Sertleştirilmiş	485	275	20	88 HRB
410	Sertleştirilmiş	485	205	20	95 HRB
410 S	Sertleştirilmiş	415	205	22	88 HRB
414	Temperlenmiş	795	620	15	-
416	Temperlenmiş	485	275	20	-
418	Temperlenmiş	965	760	15	-
420	Temperlenmiş	720	1480	20	52 HRC
422	Temperlenmiş	825	585	17	-
431	Sertleştirilmiş	795	620	15	-
440	Sertleştirilmiş	725	415	20	95HRB
440	Temperlenmiş	1790	1650	5	51 HRC

(K)

Martenzitik paslanmaz çeliklerde çekme özellikleri ısıt işlemlerle bir miktar kontrol edilmektedir. Bu tür alaşımlar yüksek karbon içerdiklerinden martenzit oluşturmak için havada soğutma ve sonra temperleme gerekmektedir [57,59]. Martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12. Martenzitik paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [57,58].

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

3.2.2.5.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Martenzitik paslanmaz çelikler %11-18 Cr, %1.2'ye kadar C ve düşük miktarlarda Mn ve Ni içerirler. Bu çelikler tavlansız olarak östenit oluştururlar ve oluşan östenitin soğutma sırasında martenzite dönüştürülmesiyle sertleştirilebilirler. Bu grupta 403, 410, 414, 416, 420, 422, 431 ve 440 türü malzemeler vardır. Soğutma sırasında sert ve kırılgan martenzitik yapı oluştuğunda kaynak dikişinde çatlama eğilimi görülür. Seçilen dolgu metalinin krom ve karbon içeriğinin ana malzemeninkine yakın olmasında yarar vardır. 410 türü dolgu malzemeleri örtülü elektrot, dolu tel ve özlü tel olarak üretilirler ve 402, 410, 414 ve 420 türü çeliklerin kaynağında kullanılabilirler. 420 türü çeliklerin içerdiği karbon oranını

yakalamak eğer teknik açıdan yararlı görülüyorsa, dolu tel veya özlü tel olarak 420 kalite dolgu malzemelerinin kullanılmasında yarar vardır. 308, 309 ve 310 türü östenitik dolgu malzemeleri martenzitik paslanmaz çeliklerin birbirleriyle veya diğer çeliklerle olan kaynaklı birleştirmelerinde, dikişin kaynak edildikten sonraki şartlarda yüksek tokluğa sahip olması gereken durumlarda kullanılır.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin çoğunda ön tav sıcaklığının ve pasolar arası sıcaklığın 205-315 °C arasında tutulması önerilir. % 0.2' nin üzerinde karbon içeren martenzitik paslanmaz çeliklere kaynak dikişinin sünekliğini ve tokluğunu arttırmak amacıyla kaynak sonrasında genellikle ısıtıl işlem uygulanmalıdır [52].

3.3. Islah Çelikleri

Islah çelikleri, kimyasal bileşimleri özellikle karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımsız ve alaşımlı makine imalat çelikleridir.

Islah işlemi, sonuçta çelik parçaya yüksek tokluk özelliğinin kazandırılacağı önce bir sertleştirme ve arkasından menevişleme işlemlerinin bütünü olarak tarif edilir. Islah çelikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı, çeşitli makine ve motor parçalar, dövme parçalar; çeşitli civata, somun ve saplamalar, krank milleri, akslar, kumanda ve tahrik parçaları, piston kolları, çeşitli miller, dişliler gibi parçaların imalinde olmak üzere geniş bir alanda kullanılır. Bu sebepten, ıslah çelikleri inşaat ve alaşımsız çeliklerden sonra, en yüksek oranda üretilen ve kullanılan çelik türüdür.

Uygun ıslah çeliğinin seçimi ve doğru ıslah işleminin uygulanması çok dikkat ve tecrübeyi gerektirir. Islah işleminin iyi sonuç vermesi (istenilen tokluk veya sertlik değerine ulaşılması), kullanılan çeliğin içyapı temizliği ile yakından ilgilidir. İçyapı temizliği, sıvı çeliğin bünyesinde erimiş halde bulunan gazlardan (hidrojen, oksijen ve azot) arındırılması ve oksit, sülfür inklüzyonlarından temizlenmesi işlemidir. Bu grup çeliklerin alaşımsız, düşük alaşımlı ve alaşımlı cinsleri vardır. Alaşımsız olanları piyasa da imalat çeliği olarak da ifade edilir.

Bu çelikler makine-imalat çeliklerinin en önemli bölümünü oluştururlar. Genel olarak bu tür çelikler bağlantı elemanları, aks milleri, şaft ve dişli imalatında kullanılırlar [69].

Yaklaşık 350 °C işletme sıcaklığına kadar yararlanılan bu malzemelerin sayıca çokluğu, aşağıdaki teknik ve ekonomik nedenlerden dolayıdır;

Islah edilmiş makine parçalarından öncelikle, tüm kesitte homojen mekanik özelliklere sahip olmaları beklenir. Bunun için parçanın tüm kesitte su almış veya en azından “temperlenebilir” bir içyapıya kavuşmuş olması gerekir. Dolayısıyla parça kalınlığı arttıkça, daha fazla alaşımlı çelik seçilerek kritik soğuma hızının düşürülmesi zorunludur.

Dayanım ve tokluk değerlerini optimize edebilmek için genellikle 500 °C’ın üzerinde temperleme yapıldığından, temper kararlılığı zayıf olan alaşımsız ıslah çeliklerinde dayanım değerleri oldukça sınırlıdır. Bu açıdan ince etli parçalarda dahi yüksek akma sınırı, ancak temper kararlılığı gösteren yani fazla yumuşamayan alaşımlı çelikler ile elde edilir.

Karmaşık biçimli parçalar, suda su verilirken değişik bölgelerde ortaya çıkan büyük sıcaklık farklılıklarından ötürü çarpılma veya çatlamaya uğrayabilir. Hızlı soğutma zorunluluğunu ortadan kaldırmak üzere, bu tür makine elemanlarında et kalınlıkları az olsa bile, kritik soğuma hızları düşük olan (yağda soğutulabilen) alaşımlı ıslah çeliklerinin kullanılması daha güvenlidir.

Islah çeliklerinde alaşım elementi karbürlerinin östenitleme sırasında çözünmesi, takım çeliklerindeki kadar yavaş değildir. Dolayısıyla aşırı ısınma halinde tane irileşmesine eğilimli olan bu çeliklerin su verme sıcaklığı dar bir aralıkta tutulmalıdır. Bu olgu ısıtma işlemi teknik ve ekonomik bakımdan güçleştirir. Ancak çeliğe katılan vanadyum (örneğin 30 CrMoV9, 50 CrV 4) tane irileşmesi molibden de (örneğin 30 CrNiMo 8) temper gevrekliği olasılığını azaltır.

Islah çelikleri çoğunlukla yumuşatılmış veya normalleştirilmiş durumda piyasaya sunulduğundan, tasarımcının seçtiği özellikleri sağlayacak ıslah işlemi, ilgili diyagramlardan yararlanılarak imalatçı tarafından gerçekleştirilir. Ayrıca alev, indüksiyon ve nitrürasyonla yüzey sertleştirme yapılabilir.

Görüldüğü gibi çeşitli kullanım alanları ve metalürjik özelliklere ilişkin beklentiler, çok sayıda ıslah çeliğinin geliştirilmesini zorunlu kılmış ve böylece aşağıdaki alt gruplar ortaya çıkmıştır:

Alaşımsız çelikler: sertleştirme derinliği, dayanım ve tokluk değerleri oldukça düşük, Örneğin C 22, C 35, C 45.

Mangan çelikleri: sertleştirme derinliği biraz arttırılmış, örneğin 28 Mn 6, 40 Mn 4.

Krom çelikleri: mangan çeliklerine göre tokluk daha yüksek, örneğin 48 Cr 2, 37 Cr (S) 4.

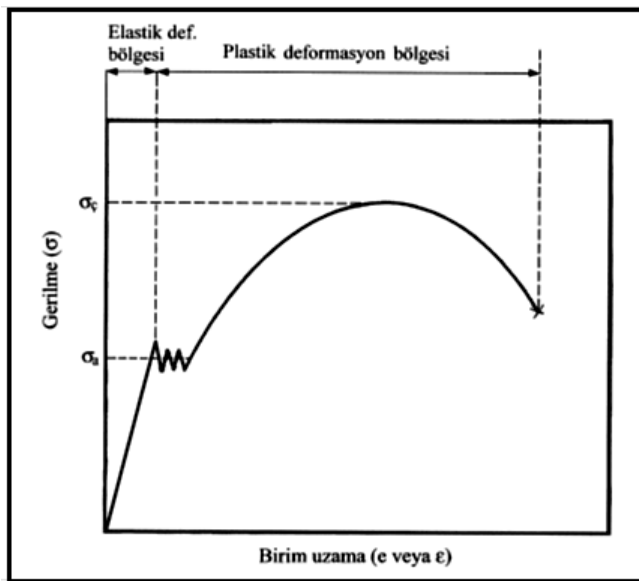
Krom- molibden ve krom- nikel- molibden çelikleri: yüksek çekme dayanımları yanında tokluk özellikleri de iyi, örneğin 25 CrMo 4, 32 CrMo 12, 50 CrMo 4, 34 CrNiMo 6, 30 CrNiMo 8 [70].

3.4. Malzemelere Uygulanan Mekanik Testler

3.4.1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması amacı ile yapılır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılır. Bu yüzden çekme deneyi en yaygın olarak kullanılan tahribatlı malzeme muayene yöntemlerinden birini oluşturur.

Çekme deneyi, ilgili standartlara göre hazırlanan deney numunelerinin tek eksen ve sabit bir hızla koparılmaya kadar çekilmesi işlemidir. Bunun için, önce incelenmesi istenen malzemeden talaşlı işlemlerle standartlara uygun numuneler hazırlanır. Hazırlanan numune çekme makinasının çenelerine takılarak deney yapılır. Deney sırasında çekme numunesine sürekli olarak artan çekme kuvveti uygulanır ve numunede kırılma anına kadar meydana gelen uzama kaydedilir. Şekil 3.36'da düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı gösterilmiştir [71].



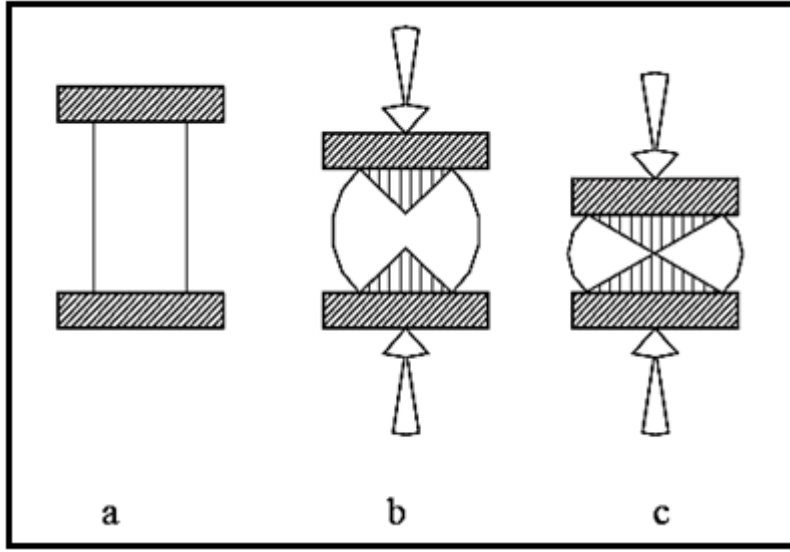
Şekil 3.36. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı [72].

Çekme deneyinden; orantı sınırı, elastiklik sınırı, akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması, kopma büzülmesi, rezilyans, tokluk gibi veriler elde edilir [71].

3.4.2. Basma Deneyi

Basma deneyi çekme deneyinin tersi olarak kabul edilebilir ve genelde çekme-basma makinalarında basma kuvveti uygulamak suretiyle yapılır. Basma kuvvetinin etkin olduğu uygulamalarda kullanılan gevrek malzemelerin mukavemet değerleri genelde basma değerleri ile belirlenir. Bu nedenle basma deneyinden elde edilen sonuçlar gevrek malzemelerden üretilen parçaların tasarımında doğrudan kullanılabilir. Genelde yatak malzemeleri, dökme demir, beton, tuğla, seramik ve odun gibi malzemeler basma deneyine tabi tutulurlar. Basma deneyinde genellikle silindirik veya daire kesitli numuneler kullanılır. Ancak bazı durumlarda kare ya da dikdörtgen kesitli numuneler de kullanılabilir. Basma deneyinde kullanılan numunelerin ilgili standartlara uygun biçimde hazırlanması gerekir.

Basma makinasında, basma plakaları aracılığı ile örneğe yük uygulanır. Yük uygulanan plakaların alt ve üst yüzeyleri numunenin düşey eksenine dik ve birbirine paralel olmalıdır. Basma deneyinde, numune kesit alanı sürekli arttığından çekme deneyinde görülen boyun verme olayı meydana gelmez. Basma deneyine tabi tutulan sünek malzemelerde fiçilaşma olarak adlandırılan şişme olayı meydana gelir. Bu durum numune uçları ile basma plakaları arasında meydana gelen sürtünme kuvvetinden kaynaklanır. Şekil 3.37’de basma deneyi uygulanan sünek bir malzemede oluşan fiçilaşma olayı görülmektedir [71].



Şekil 3.37. Basma deneyi uygulanan sünek bir malzemede oluşan fiçılama,

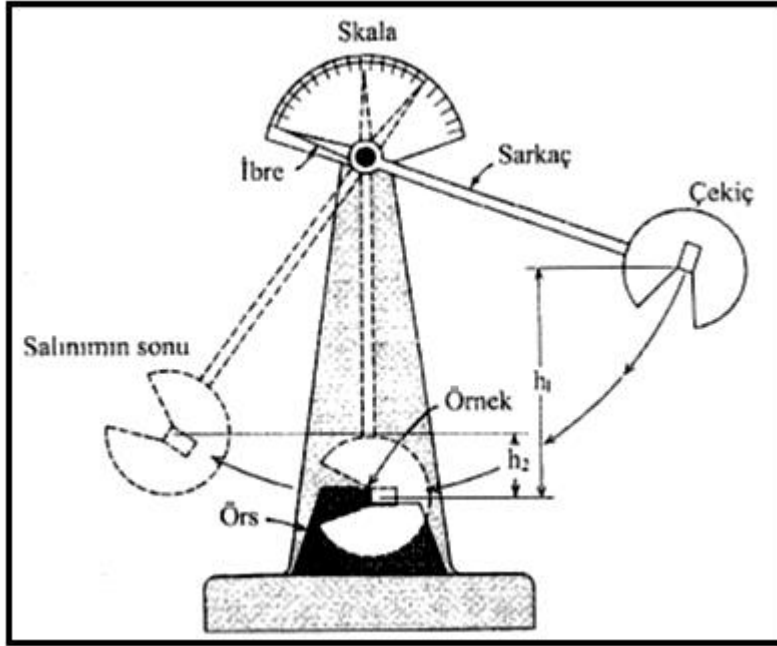
- a) Basma kuvveti yok,
- b) Uygulanan kuvvetin etkisiyle fiçılamanın ilk aşaması,
- c) Fiçılamanın tamamlanması [73]

3.4.3. Darbe Deneyi

Bazı makine parçaları veya yapı elamanları darbeli yüklere maruz kalırlar. Bu elamanların çarpma dayanımları, yavaş yükleme durumundaki statik mukavemet değerlerinden çok daha düşüktür. Darbe deneyleri malzemelerin çarpma dayanımlarını veya kırılma enerjilerini ölçmek için yapılır bu deneylerden elde edilen sonuçlar çentik tokluğunun bir ölçüsü olup, malzemelerin sınıflandırılması için kullanılır. Bir başka deyişe darbe deneyinden elde edilen sonuçlar tasarıma yönelik mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılamazlar.

Darbe deneyinde, standart çentik içeren bir numunenin darbe etkisi ile kırılması için gereken enerji ölçülür. Genelde Joule cinsinden ölçülen bu enerji değeri malzemelerin darbe direnci ya da darbe dayanımı olarak tanımlanır. Uygulamada yaygın olan iki çeşit darbe deneyi vardır. Bunlardan biri Charpy, diğeri de Izod darbe deneyidir. Charpy deneyinde iki mesnede yatay olarak yaslanan basit bir kiriş durumundaki numunenin çentik tabanına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapıp, çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmenin etkisi ile söz konusu numunenin kırılması için harcanan enerji ölçülür. Izod darbe deneyinde ise, kavrama çenesine dikey olarak tespit edilen numunenin yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikteki bir noktadan bir sarkacın ucundaki

Çekiçle darbe uygulanarak kırılması için harcanan enerji ölçülür [71]. Şekil 3.38’de darbe deney makinasının şematik resmi verilmiştir.



Şekil 3.38. Darbe deney makinasının şematik resmi [74].

3.4.4. Yorulma Deneyi

Bazı makine parçaları ve yapı elamanları tekrarlı yükler altında çalışırlar. Statik mukavemet değerlerinden daha düşük seviyelerdeki tekrarlı gerilmelere maruz kalan parçalarda zamanla çatlama ve kırılma şeklinde hasarlar meydana gelir. Genel anlamda, tekrarlı yüklere maruz kalan malzemelerde zamanla meydana gelen hasara veya hasar meydana gelmesi olayına yorulma denir. Yorulma, uygulamalarda çok sık rastlanan bir hasar mekanizmasıdır. Nitekim makine elamanlarında meydana gelen hasarların yaklaşık yüzde sekseni (% 80) yorulmadan kaynaklanır. Yorulma olayına neden olan tekrarlı yük veya gerilmeler aksenal, kayma, eğilme ve burulma yüklerinden birinin veya birasının birlikte etkimesi ile oluşabilir. Miller, yataklar, civatalar, yaylar, dişliler trbın kanatları, motor parçaları ve raylı sistem tekerlekleri tekrarlı gerilmeler altında çalışırlar. Bu nedenle bu elamanların tasarımında dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biri de yorulmadır.

Yorulma deneylerinde numunelere frklı büyüklükte tekrarlı gerilmeler uygulanır ve kırılmaları için gerekli çevrim sayısı ölçülür. Uygulanan tekrarlı gerilmeler zaman göre sinüzoidal değişim gösterir [71].

3.4.5. Sürünme Deneyi

Sabit sıcaklıkta, sabit yük veya sabit gerilme altında tutulan malzemelerin zamanla kalıcı şekil değişimine uğraması olayına sürünme denir. Sürünme, metallerde mutlak ergime sıcaklığının yaklaşık %30'unun, seramiklerde ise mutlak ergime sıcaklığının % 40'ının üzerindeki sıcaklıklarda meydana gelir. Bu nedenle, sürünme deneyi bir yüksek sıcaklık deneyi olarak kabul edilir ve bu deney standartlarına uygun olarak hazırlanan numunelere sürünme makinalarında sabit sıcaklıkta ve sabit yük ya da gerilme uygulamak suretiyle gerçekleştirilir. Sabit sıcaklık ve sabit yük altında yapılan deneylerde numunenin boyunda meydana gelen uzama miktarı bir uzama ölçer yardımıyla sürekli olarak ölçülür. Sürünme deneylerinde ölçülen yüzde uzama veya birim uzamanın zamana göre değişimini gösteren eğriler çizilir ve bu eğrilere sürünme eğrileri adı verilir [71].

3.4.6. Burulma Deneyi

Basit mukavemet hallerinden biri olan burulma halinde; kesitte yalnızca moment vektörünün kesit normali doğrultusunda bileşeni bulunmaktadır. Bu vektör, çubuk kesitini çubuk eksenini etrafında döndürmeye çalışır ve sonuçta çubuk burulur. Burulma, uygulamada sık karşılaşılan mukavemet hallerinden biridir. Burulmanın basit mukavemet hali olarak tipik örneği güç nakleden millerdir; bu miller buhar türbinlerinde, elektrik jeneratörlerinde, arabalarda (motordan arka tekerleğe güç naklinde) gemilerde (pervaneye güç naklinde) gücü bir noktadan diğer noktaya nakletmede kullanılır. Ayrıca sık sargılı helisel yayların yay katsayılarının teorik olarak hesaplanmasının ilk yaklaşımı burulma hali ile yapılır.

Burulma halinin genel olarak incelenmesi elementer yöntemler ile mümkün olmamaktadır. Daireden farklı kesitler, burulmada, düzlem kalmayıp çarpılmaktadırlar. Bu nedenle; daireden farklı kesitlerde elementer yöntemler doğru sonuçlar vermemektedir [75].

Burulma deneyinin çekme deneyi gibi çok geniş bir kullanma alanı yoktur. Aynı zamanda çekme deneyi gibi tamamen standartlaştırılmamıştır. Metalik malzemelerin mekanik özelliklerinin kontrolünde çok seyrek olarak yapılması şart koşulur. Bununla beraber plastik deformasyonla ilgili teorik çalışmalarda (örneğin metallerin dövülebilme

özelliklerinin tespiti gibi) ve birçok mühendislik uygulamalarında faydalı olan bir deneydir.

Burulma deneyi yuvarlak kesitli numunelerle yapılabildiği gibi aynı zamanda kullanıldığı yerlerde burma momentine tabi olan mamul parçalar üzerinde de (şaftlar, dingiller, matkaplar gibi) doğrudan doğruya yapılabilir. Burulma deneyi bilhassa gevrek malzemelerin (takım çelikleri gibi) dövülebilme özelliğinin tayini için yüksek sıcaklıklarda yapılır.

Burulma deneyi metalik malzemelerin kayma elastiklik modülü (G), kayma akma gerilmesi ve kırılma modülü gibi özelliklerini tayin etmek amacı ile yapılır [76].

3.4.6.1. Deney Cihazı

Burulma deney cihazı genel olarak, iki ucundan sıkıştırılmış deney numunesine, bir ucu sabit kalacak şekilde diğer ucundan burulma momenti uygulayan bir cihazdır. Cihazda, uygulanan burulma momenti bir göstergeden okunur. Burulma cihazında ayrıca burulma açısını kaydeden bir kaydedici veya bir gösterge mevcuttur [76].

3.4.6.2. Numuneler

Burulma numuneleri, gerilmelerin hesaplanmasında en basit bir şekil olan yuvarlak kesitli numunelerdir. Burulma deneyinde uygulanan burulma momenti tesiriyle numunede kayma gerilmeleri oluşur. Kayma gerilmeleri numunelerin merkezinden yüzeyine doğru doğrusal olarak artar, kayma gerilmeleri numunenin merkezinde sıfır, yüzeyde ise maksimum değerdedir. Bu sebeple burulma deneyinin ince et kalınlığı olan boru şeklindeki numunelerle yapılması tavsiye edilir. Boru şeklindeki numunelerle, numune kesiti boyunca uniform kayma gerilmeleri elde edilir.

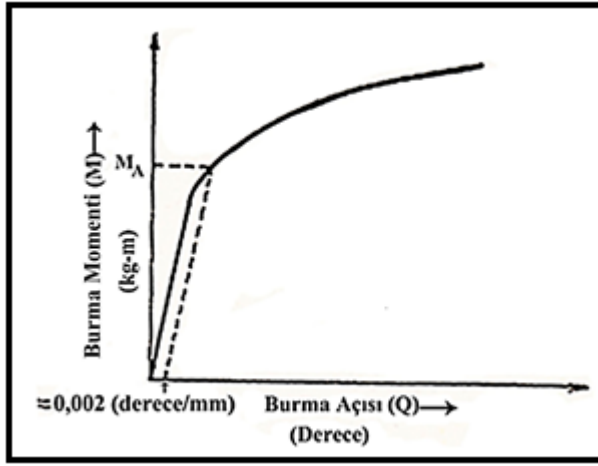
Boru şeklindeki burulma deneyi numunelerinde et kalınlığının az olması istenir, fakat numunenin et kalınlığı çok az olursa numune burulamaz, kopmadan şekli bozulur. Kayma akma gerilmesi ile kayma elastiklik modülünün (G) tayininde kullanılan boru şeklindeki numunelerde, ölçü uzunluğunun (L) numunenin dış çapına (D) oranı, $L/D \approx 10$ olmalıdır. Ayrıca numune çapının (D), et kalınlığına (t) oranı ise $D/t \approx 8-10$ olmalıdır. Kırılma modülünün tayininde kullanılan boru şeklindeki numunelerde ise ölçü uzunluğu kısa olup,

$L/D \approx 0,5$ olmalıdır. Aynı zamanda numune çapı ile et kalınlığı arasında oran ise, $D/t \approx 10-12$ olmalıdır.

Burulma deneyi numuneleri, kullanılan deney cihazının tipine uygun boyutlarda seçilir [76].

3.4.6.3. Burulma Diyagramı

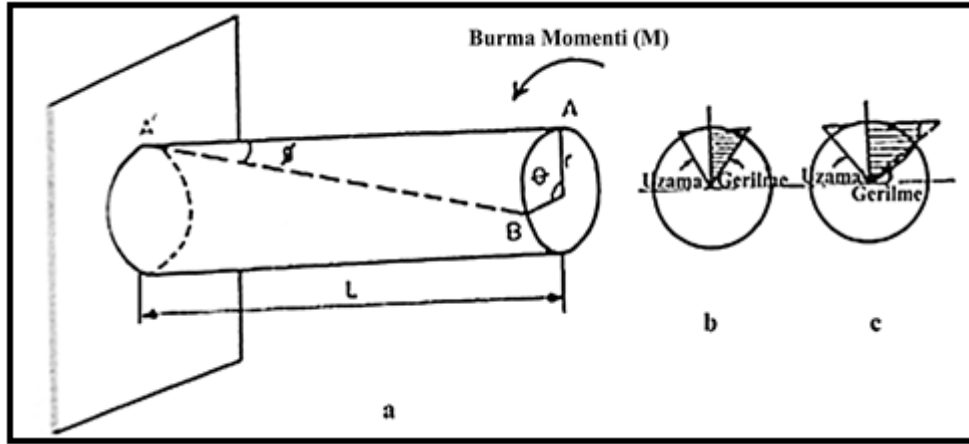
Burulma deneyi sırasında burulma momenti (M) ve burulma açısı (θ) kaydedilir. Böylece burulma diyagramı olarak, (burulma momenti-burulma açısı) diyagramı elde edilir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Burulma momenti- burulma açısı diyagramı [76]

3.4.6.4. Kayma Uzaması (γ)

Burulma deneyinde, kırılmaya kadar yapılan burulma sayısı malzemenin deformasyon kabiliyeti hakkında bir fikir verir. Fakat burulma sayısı, numunenin boyutlarına bağlıdır. Boyutlar arttıkça kırılmaya kadar tatbik edilen burulma sayısı da artacaktır. Bu sebeple burulma sayısı yerine kopmaya kadar olan kayma uzaması kullanılır. Burulma deneyinde deformasyon numune üzerindeki aynı yatay doğrultudaki bir noktanın (A), sabit uçtaki noktadan (A') moment etkisi ile açılmal olarak yer değiştirdiği miktardan (AB) hesaplanır (Şekil 3.40. a).



Şekil 3.40. a) Yuvarlak bir çubuğun burulmasının şematik gösterilişi;
b) Elastik deformasyon sırasında numune kesitindeki (gerilme-uzama durumu);
c) Plastik deformasyon sırasında numune kesitindeki (gerilme-uzama durumu) [76].

Burulma deneyinde uygulanan burulma momenti etkisiyle numunede kayma gerilmeleri oluşur ve kayma gerilmeleri tesiriyle de numune kayma uzaması şeklinde deformasyona uğrar.

Kayma uzaması (γ) aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\text{Kayma uzaması } (\gamma) = \tan \phi = r \theta / L$$

Burada; r = numunenin yarıçapı;

θ = burulma açısı;

L = numunenin boyu [76].

3.4.6.5. Kayma Gerilmesi (τ)

Burulma deneyinde, numunede meydana gelen kayma gerilmeleri (τ) aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$\tau = \frac{16 M}{\pi D^3} \text{ (yuvarlak numune ise)}$$

$$\tau = \frac{16 M D_1}{\pi (D_1^4 - D_2^4)} \text{ (boru şeklindeki numune ise)}$$

Burada; τ = kayma gerilmesi;

M = numuneye uygulanan moment;

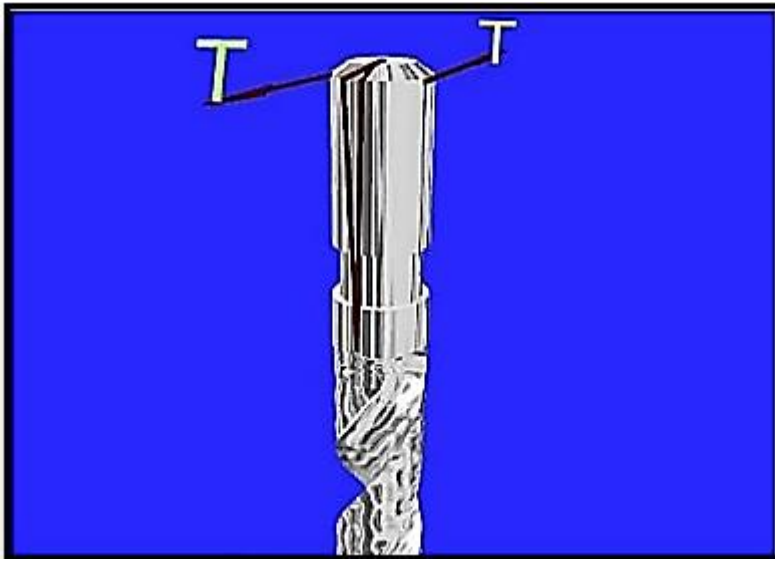
D = yuvarlak numunenin çapı;

D_1 = boru şeklindeki numunenin dış çapı;

D_2 = boru şeklindeki numunenin iç çapı.

Yukarıdaki formüllerle hesaplanan burulma gerilmeleri, numunede meydana gelen maksimum gerilmelerdir. Daha öncede belirtildiği gibi, yuvarlak numunelerde kayma gerilmeleri numunenin merkezinde sıfır, yüzeyde ise maksimum değerdedir, dolayısıyla bu formüllerle hesaplanan gerilmeler yüzeyde meydana gelen maksimum kayma gerilmeleridir (Şekil 3.40.b ve c).

Burulma deneyi ile hesaplanan akma gerilmesi, *kayma akma gerilmesidir*. Kayma akma gerilmesi, burulma diyagramının lineer kısmından veya bariz şekilde akma göstermeyen malzemelerde burulma diyagramı üzerinden $\theta \approx 0.002$ derece /mm burma açısına tekabül eden burulma momentinden (M_A) hesaplanabilir (Şekil 3.39) [76].



Şekil 3.41. Burulmaya maruz kalan bir malzemede kayma gerilmelerinin gösterimi [77].

Kırılma modülü, burulma diyagramındaki maksimum burulma momentinden hesaplanan maksimum kayma gerilmesidir. Şekil 3.41’de burulmaya maruz kalan bir malzemede kayma gerilmeleri gösterilmiştir [76].

3.4.6.6. Kayma Elastiklik Modülü (G)

Kayma elastiklik modülü (G), burulma diyagramının lineer kısmından (elastik bölgesinden) hesaplanır. Burulma diyagramının elastik bölgesinde kayma gerilmesi, kayma uzamasıyla orantılı olarak artar. Elastik bölgede, kayma gerilmesinin kayma uzamasına oranından kayma elastiklik modülü (G) hesaplanır. Yani;

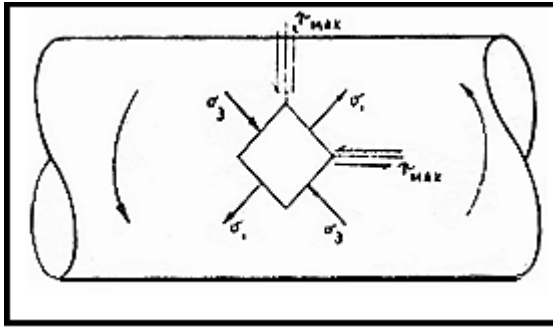
$$G = \tau / \gamma \text{ dir.}$$

Burada; G = kayma elastiklik modülü;

τ = elastik bölgede herhangi bir noktadaki kayma gerilmesi;
 γ = elastik bölgede aynı noktadaki kayma uzaması [76].

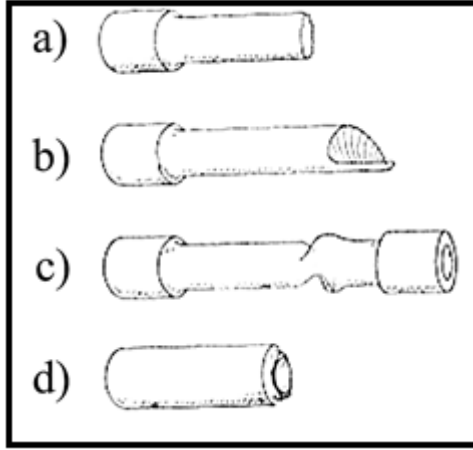
3.4.6.7. Burulmada Kırılma Şekilleri

Burulma deneyinde numune yüzeyindeki herhangi bir noktadaki gerilme durumu Şekil 3.42’de gösterilmiştir. Maksimum kayma gerilmeleri numunenin yatay ve düşey eksenleri boyunca meydana gelir. Çekme (σ_1) ve basma (σ_2) gerilmeleri ise numunenin eksenleri ile 45° lik açı yapan düzlemler boyunca meydana gelir.



Şekil 3.42. Burulma deneyinde numunede meydana gelen gerilme durumu [76].

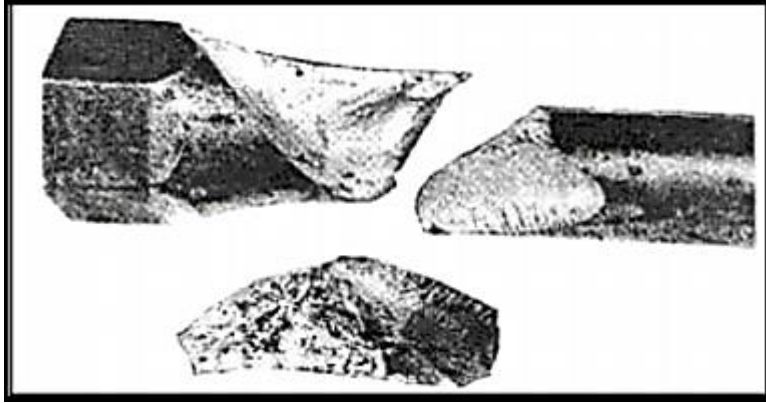
Burulma deneyinde çeşitli malzemelerin kırılma şekilleri Şekil 3.43’de gösterilmiştir. Burulma deneyinde sünek bir malzemenin kırılması, maksimum kayma gerilmeleri yönünde, genellikle numunenin düşey eksenini boyunca olur (Şekil 3.43.a). Gevrek bir malzemenin kırılması ise, maksimum çekme gerilmesi doğrultusuna dik bir düzlem boyunca olur (Şekil 3.43.b). Boru şeklindeki sünek bir malzemenin kırılması ise, numunenin boyu uzun ise numunenin bükülmesi sonucunda şeklinin bozulması (Şekil 3.43.c) şeklinde, eğer numunenin boyu kısa ise yine maksimum kayma gerilmesi yönünde (Şekil 3.43.d) olur.



Şekil 3.43. Burulmada kırılma şekilleri;

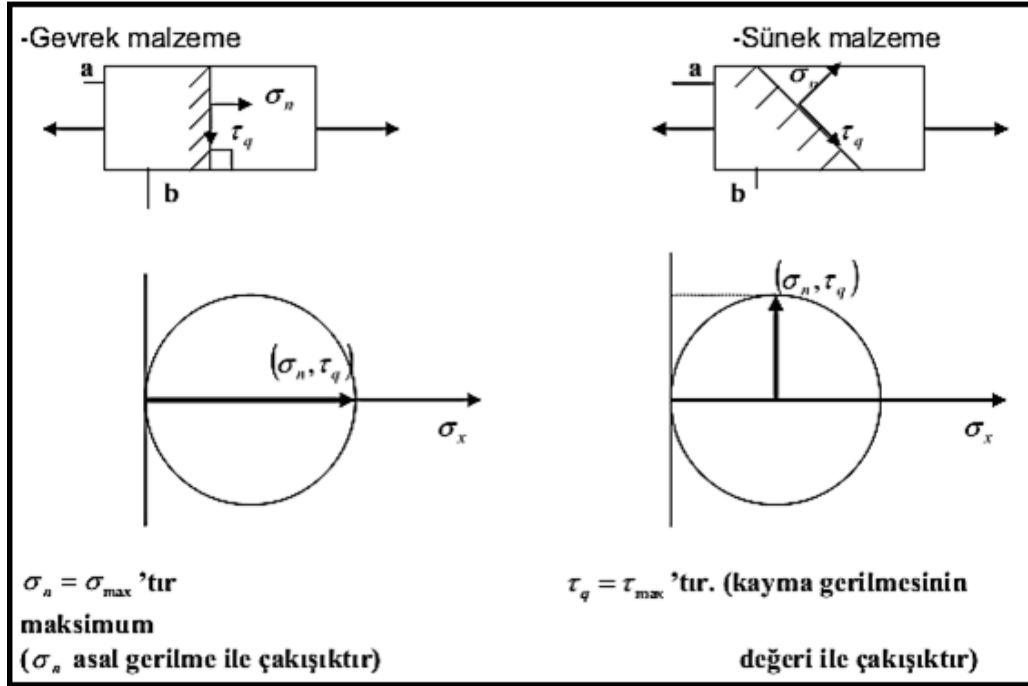
- a) Yuvarlak numunenin sünek kırılma şekli,
- b) Yuvarlak numunenin gevrek kırılma şekli,
- c) Sünek bir malzemenin boru şeklindeki, uzun numunesinin burulması,
- d) Sünek bir malzemenin boru şeklindeki kısa numunesinin kopma şekli [76].

Şekil 3.44’de burulma sonucunda kırılan gevrek bir malzemenin kırılma şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.44. Burulma sonucunda kırılan gevrek bir malzemenin kırılma biçiminin görünümü [77].

Burulma halinde gevrek malzeme 45^0 ‘lık bir açı ile sünek malzeme ise 90^0 ‘lık bir açıyla kopar (Şekil 3.45).



Şekil 3.45. Sünek ve gevrek malzemelerin burulmalarının karşılaştırılması [78].

3.4.6.8. Burulmada Bauschinger Etkisi

Metalik malzemeler plastik deformasyona uğradıklarında pekleşme, anizotropi ve Bauschinger etkisi gibi fiziksel etkiler oluşur. Bunları önlemek için birleşik yüklemeli burulma testleri geliştirilmiştir. Bu testlerde burulma açısı $0-90^0$ arasında değişir.

Bauschinger etkisinin mikroyapı üzerindeki etkisini tayin etmek ve Bauschinger etkisiyle çalışma sertleşmesinin ilişkisini ortaya koymak için yumuşak çeliklerde çeki-bası ve ters burulma deneyleri yapılmıştır. Tavlanmış çelik bir axis üzerinde dönen ferrit ve perlit tabakalarından ibarettir. Bu perlitler su verme sırasında ferrit matrixinin içinde dağılır ve küreselleşir. İkinci faz partiküllerinin dağılmasının bauschinger efekti üzerindeki etkileri tavlanmış ve küreselleşmiş çeliğin ters yükleme eğrilerinden bulunur. Tavlanmış çelikte bauschinger efektin geçici yumuşama etkisi çeki basıya göre ters yönlü burulmada daha büyüktür. Diğer taraftan küresel çeliklerde bauschinger etkisi yaklaşık olarak her iki tarafta aynıdır. Bundan dolayı ferrit şerit yapısının bauschinger efektinin gelişiminde etkisi vardır. Küresel çeliklerin çalışma sertleşmesi (pekleşme) dağılmış sementitlere bağlıdır. Bauschinger efektinin pekleşmeye uyduğu, karşılıklı geliştiği gözlenmiştir.

Özet olarak yüklemelerin sürekli olarak yön değiştirdiği durumlarda ortaya çıkan bu bauschinger etkisi akma sınırını düşürerek istenmeyen durum yaratır. Tavlanmış çeliklerde

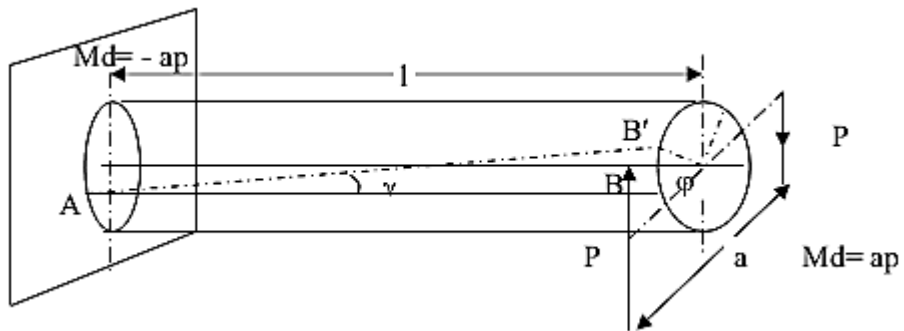
burulmadaki bu etkisi çeki basıya göre daha fazladır. Isıl işlemlerle bunun önüne geçilebilir. Şekil 3.46’da burulmaya maruz kalan bir numune resmi görülmektedir [78].



Şekil 3.46. Burulmaya maruz kalan bir numune [77].

3.4.6.9. Dairesel Kesitli Millerin Burulması

Şekil 3.47’deki milin sol ucu ankastre mesnetlendirilmiş olup sağ ucu ap kuvvet çifti ile döndürülmektedir. Yani, M_d burulma momenti ile burulmaktadır. Bu burulma neticesinde eksene paralel AB doğrusu AB' helisi haline gelir.



Şekil 3.47. Ankastre mesnetlendirilen mil

Eksene dik düzlem kesit içindeki gerilmeler kayma gerilmeleridir. Bu iç kuvvetlerin 0 noktasına göre momentleri toplamı M_d ‘ye eşit olmalıdır. Kaymalar şekilde görüldüğü

gibi 0 noktasından uzaklaştıkça orantılı olarak arttığından gerilmelerde 0 noktasından uzaklaştıkça orantılı olarak büyür.

$\tau = \tau_0 \times \rho$ olur. τ_0 merkezden birim uzaklıktaki bir noktada meydana gelen kayma gerilmesidir.

$$M_d = \int \tau_0 \rho \, dF \quad \rho = \tau_0 \int \rho^2 \, dF$$

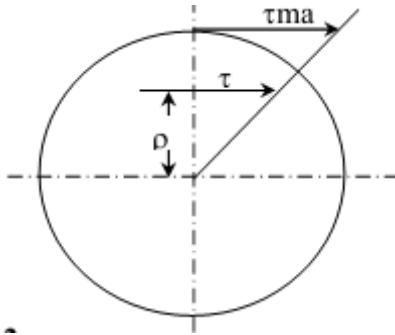
$I_p = \int \rho^2 \, dF$ Santrifüj atalet momenti (polar atalet momenti) dir.

$$M_d = \tau_0 \times I_p$$

$$\tau_0 = \frac{M_d}{I_p}$$

$$\tau_{max} = \tau_0 \times \rho$$

$\tau = \frac{M_d}{I_p} \times \rho$ kesitin merkezinden ρ uzaklığındaki bir noktadaki kayma gerilmesidir (Şekil 3.48).



Şekil 3.48. Kesitteki kayma gerilmesi

Çevredeki gerilme

$$\tau_{max} = \frac{M_d}{I_p} r = \frac{M_d}{\frac{I_p}{d/2}} \quad \text{“r” milin yarıçapı, “d” milin çapıdır.}$$

$\frac{I_p}{d/2} = W_p$ ye “kesitin polar mukavemeti” denir.

$$\tau_{max} = \frac{M_d}{W_p} \leq \tau_{em} \text{ olmalıdır.}$$

$$M_d \text{ [kgcm]}$$

$$W_p \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\tau_{max} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

dolu daire kesit için

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} \quad W_p = \frac{I_p}{\frac{d}{2}} = \frac{\frac{\pi d^4}{32}}{\frac{d}{2}} = \frac{\pi d^3}{16}$$

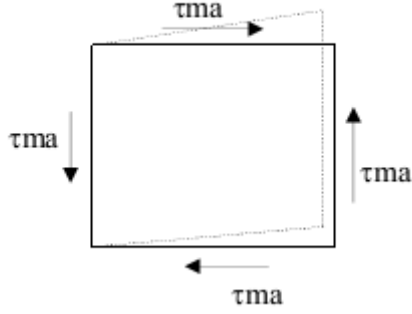
$$\tau_0 = \frac{M_d}{\frac{\pi d^4}{32}} \text{ [kg/cm}^2\text{/cm]}$$

$$\tau_{max} = \frac{M_d}{\frac{\pi d^4}{32}} \rho$$

$$\tau_{max} = \frac{M_d}{W_p} = \frac{M_d}{\frac{\pi d^3}{16}} = \frac{16M_d}{\pi d^3} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Burulma açısının hesabı :

AB doğrusu ile AB' helisi arasındaki açıkayma açısıdır. Çünkü milin dış yüzeyinden alınan kare disk burulma sonunda Şekil 3.49'daki gibi eşkenar dörtgen haline gelmiştir. Diskin yüzeylerine τ_{max} kayma



Şekil 3.49. Burulma sonunda kare disk

gerilmesi tesir ettiğine göre kayma açısı

$$\gamma = \frac{\tau_{max}}{G} \text{ olur.}$$

$$BB' = \gamma \times l = r \times \varphi \quad r = \frac{d}{2}$$

$$\varphi = \frac{\gamma \times l}{G} \text{ milin bütün boyunda meydana gelen burulma açısıdır.}$$

$$\varphi = \frac{\tau_{max}}{G} \times \frac{l}{r} \text{ olur.}$$

$$\theta = \frac{\varphi}{l} \text{ birim boydaki burulma açısıdır.}$$

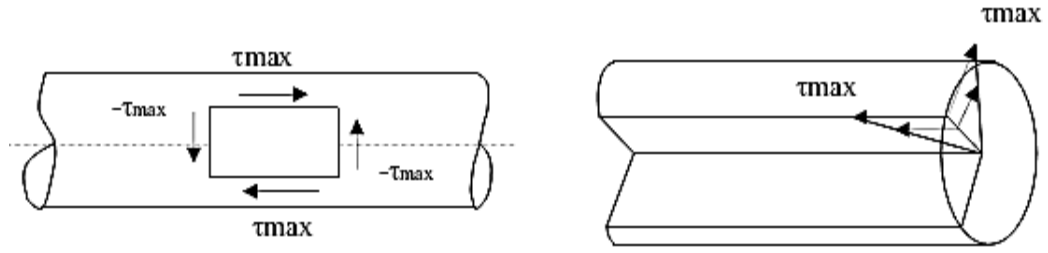
$$\gamma = r \times \theta \text{ olduğundan}$$

$$\tau_{max} = G \times \theta \times r, \quad \tau_0 = G \times \theta$$

$$\varphi = \frac{M_d \times l}{G \times I_p} \text{ [radyan]} \quad \varphi^0 = \frac{180}{\pi} \times \frac{M_d \times l}{G \times I_p}$$

$$\theta = \frac{M_d}{G \times I_p} \text{ [radyan/cm] olur [79].}$$

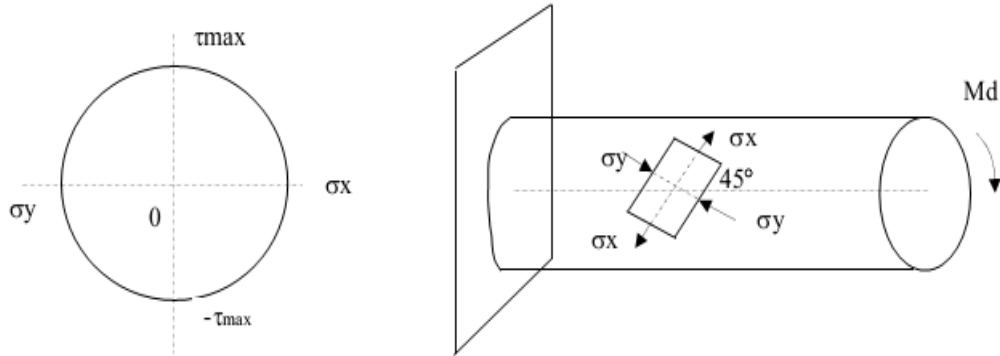
3.4.6.10. Burulmaya Zorlanan Çubuklarda Meydana Gelen Normal Gerilmeler



Şekil 3.50. Mil üzerinde alınan disk

Cismin bir kesitinde kayma gerilmesi mevcutsa, kayma gerilmesinin doğrultusuna dik bir diğer kesitte aynı şiddette farklı işaretle kayma gerilmesi olacağından mil üzerinde alınan diskin yüzeylerinde $-\tau_{\max}$, $+\tau_{\max}$ kayma gerilmeleri vardır (Şekik 3.50). Bu diske ait Mohr gerilmesi dairesi 0 merkezli $\tau_{\max}$ yarı çaplı dairedir.

Normal gerilmeye kayma gerilmesinden daha az mukavemetli olan malzemelerden yapılmış miller 45° açı yapan helis boyunca çatlaklar (Şekil 3.51) [79].

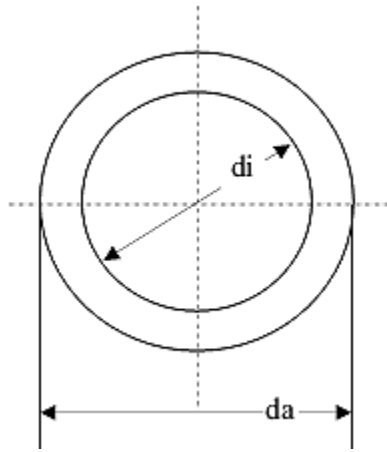


Şekil 3.51. Normal gerilmeye daha az mukavemetli olan mil

3.4.6.10.1. İçi Boş Millerin Burulması

Dolu bir milde, milin dış yüzeyindeki malzeme emniyet gerilmesine kadar zorlanırken iç kısımdaki malzeme daha küçük gerilmeler çalışmaktadır. Ağırlığın azaltılması önemli olan hallerde mesala uçakların pervane millerinde olduğu gibi içi boş miller daha elverişlidir.

$\tau_{\max} = \frac{M_d}{I_p/r}$ bulunmuştu [79].



Şekil 3.52. İçi boş mil

Şekil 3.52'deki içi boş milde $I_p = \frac{d_a^4 - d_i^4}{32}$

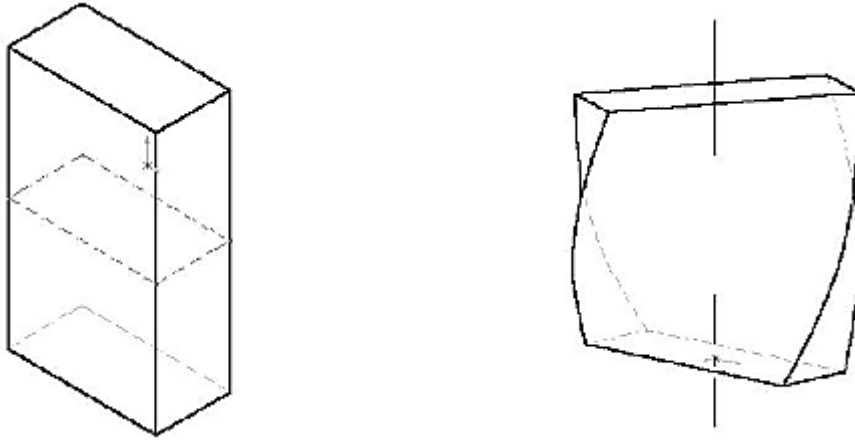
Buna göre $\tau_{max} = \frac{M_d}{\frac{\pi(d_a^4 - d_i^4) \times 2}{32 d_a}}$

$$\tau_{max} = \frac{16 M_d}{\pi d_a^3 \left(1 - \frac{d_i^4}{d_a^4}\right)} \quad \theta = \frac{\tau_{max}}{G I_p}$$

$$\theta = \frac{M_d}{\frac{\pi}{32}(d_a^4 - d_i^4)G} \quad \theta = \frac{\tau_{max}}{G \frac{d_a}{2}} [79].$$

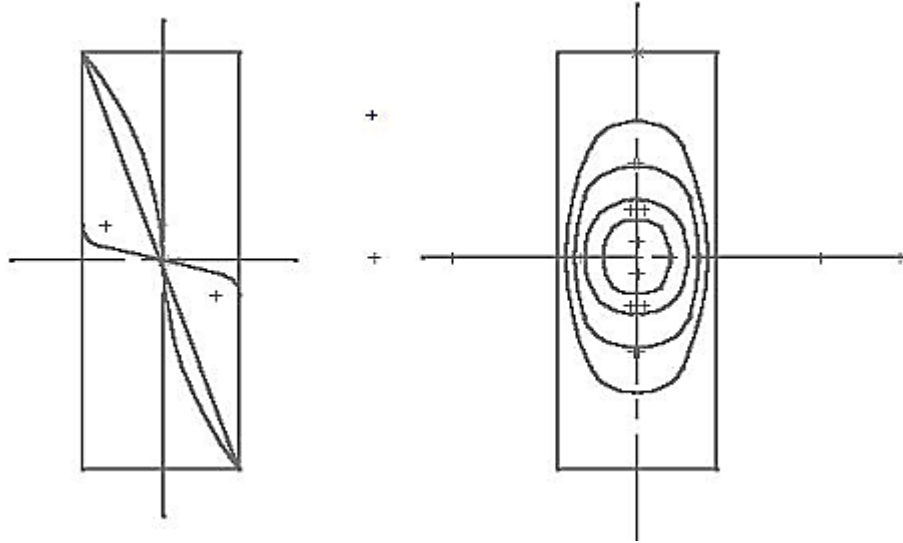
3.4.6.10.2. Daire Kesitli Olmayan Millerin Burulması

Kesiti dolu daire veya içi boş daire olmayan millerin burulmasında eksene dik kesitler düzlem olarak kalmazlar. Eğrisel bir yüzey haline gelirler. Bu durum Şekil 3.53' de olduğu gibi dikdörtgenler prizması şeklindeki bir lastik silginin burulmaya zorlandığı zaman, aldığı şekil görülmektedir. Burulmadan evvel dikdörtgen olan yüzeyi burulduğu zaman düzlemlikten çıkmaktadır. Dikdörtgen kesitte gerilmelerin dağılışı kuvvet çizgilerinin durumu Şekil 3.54'de görülmektedir. Köşe noktalarda gerilme sıfırdır [79].



Şekil 3.53. Dikdörtgenler prizmasının burulması [79].

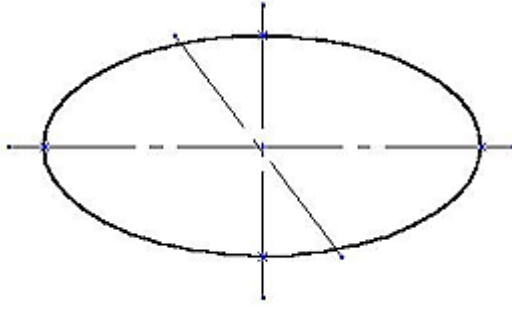
En büyük kayma gerilmesi uzun kenarların orta noktasındadır. En büyük kayma gerilmesinin miktarını bulmak için mile tesir eden burulma momenti kesitin mukavemet momentine bölünür.



Şekil 3.54. Dikdörtgen kesitte gerilmelerin dağılışı [79].

- **Elips kesitli mil;**

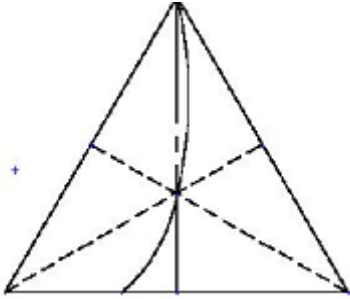
En büyük kayma gerilmesi elipsin küçük ekseninin uçlarında meydana gelir. Kuvvet çizgileri elips kesitte çevresine benzer şekildedir (Şekil 3.55).



Şekil 3.55. Elipsin burulması [79].

- **Eşkenar üçgen mil;**

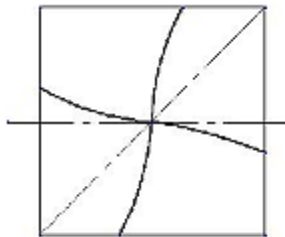
En büyük kayma gerilmesi kenarların orta noktasında meydana gelir. Köşelerde kayma gerilmesi sıfırdır. Gerilmenin dağılışı Şekil 3.56’da görülmektedir.



Şekil 3.56. Eşkenar üçgenin burulması [79].

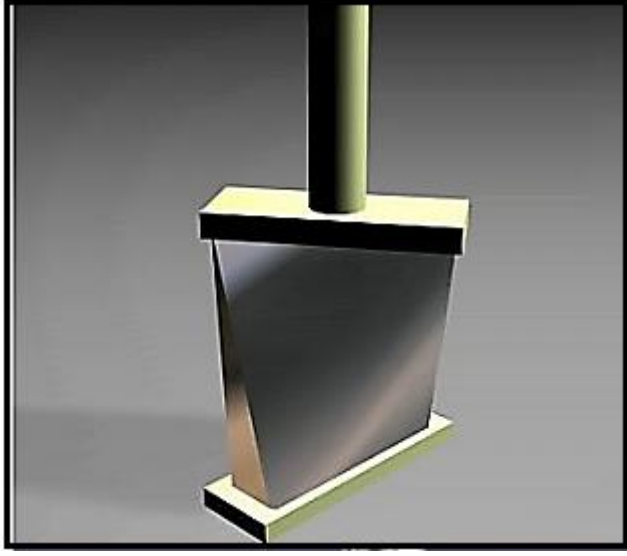
- **Kare kesitli mil;**

En büyük kayma gerilmesi karenin kenarlarının ortasında meydana gelir. Köşelerde kayma gerilmeleri sıfırdır (Şekil 3.57).



Şekil 3.57. Karenin burulması [79].

Daire kesitli olmayan bir profilin burulma animasyonu görülmektedir (Şekil 3.58).



Şekil 3.58. Daire kesitli olmayan bir profilin burulma animasyonu [77].

3.4.6.11. Burulmada Şekil Değiştirme Enerjisi

Burulma esnasında momentin yapmış olduğu iş milde depo edilir. Miktarı moment burulma açısı diyagramına bakılarak, aşağıdaki gibi yazılır. Diyagramın altında kalan dik üçgenin alanı bu enerjiyi vermektedir.

$A = \frac{1}{2} M_d \varphi$ Bu miktarı şu düşünce ile yazmak mümkündür. M_d momenti ile mile sıfırdan itibaren artarak tesir etmiş ve milde neticede φ açısı kadar burulma meydana getirmiştir. O halde ortalama moment miktarı $\frac{M_d}{2}$ olduğundan, bu momentin yapmış olduğu iş $A = \frac{M_d}{2} \varphi$ kadardır. Milin boyu l , kesitin atalet momenti I_p , malzemesinin kayma modülü G olduğuna göre momentin milde meydana getirdiği burulma açısı $\varphi = \frac{M_d l}{G I_p}$ olduğuna göre: Milin bütün boyunda biriken şekil değiştirme enerjisi

$$A = \frac{\varphi^2 G I_p}{2l} \quad A = \frac{1}{2} \frac{M_d^2}{G I_p} l \text{ olur [79].}$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışmanın Amacı

Çağımız endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çeliklerin her geçen gün kullanım alanlarının artmasının temel nedeni, korozyon ortamlarda, mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleridir. Her türde ve her biçimde bulunabilen ve kolaylıkla şekillendirilebilen bu çeliklerin geliştirilmiş kaynak yöntemleri ile başarılı bir biçimde kaynak edilebilmeleri, uygulama alanlarını daha da genişletmektedir.

Bu çalışmanın amacı, piyasada yaygın kullanım alanına sahip AISI 4340 ıslah çeliği ile ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi güç olan AISI 420 martenzitik paslanmaz çelikleri farklı devir sayılarında sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirmektir. Birleşme sonrası arakesitte oluşan yapıların metalografik değerlendirilmesi yapılacak, çekme ve burulma gibi testler ile mekanik davranışları belirlenecektir. Yapılan çalışmalar sonucunda optimum bir devir sayısının belirlenmesi ve bu devir sayısındaki en iyi burulma dayanımının tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

4.2. Kaynak Öncesi İşlemler

4.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneyler sırasında kullanılan AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik Teknik Metal Endüstri Malzemeleri Ticaret ve Sanayi A.Ş.'den, AISI 4340 ıslah çeliği ise Kanat Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den Ø25X6000 mm'lik çubuklar şeklinde ticari olarak temin edilmişlerdir. Bu çelik çiftlerine ait kimyasal kompozisyonlar Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1. AISI 420 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

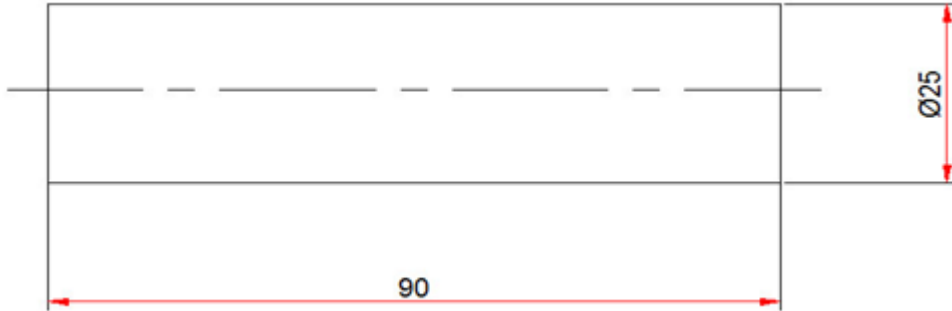
AISI 420	C	Mn	Si	P	S	Cr
	0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	14.0

Tablo 4.2. AISI 4340 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

AISI 4340	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
	0.4	0.8	0.3	0.035	0.040	0.9	0.3	2.00

4.2.2. Sürtünme Kaynak Numunelerinin Hazırlanması

Piyasadan Ø25X6000 mm’lik ölçülerde temin edilen çubuklar şerit testerede kesilerek çapı 25 mm ve boyu 90 mm olan numuneler hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Sürtünme kaynak numunesi

4.2.3. Sürtünme Kaynak Tezgahı

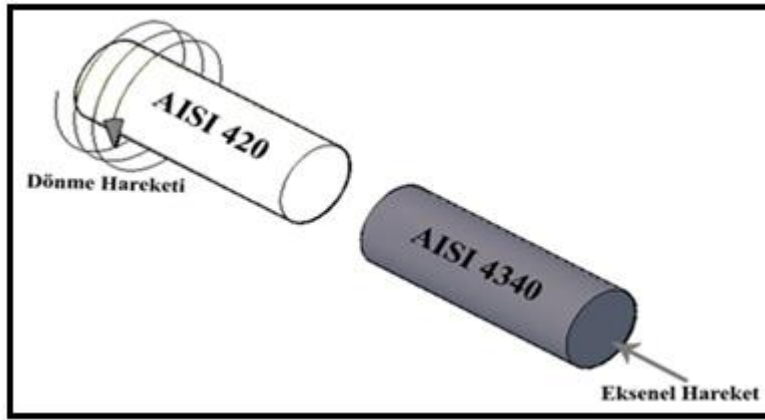
Kaynak işlemi için hazırlanan numuneler Konya’da bulunan Devmak Makine Sanayi adlı firmada PLC kontrollü sürtünme kaynak makinesinde yapılmıştır. Bu makine 200 ile 1600 devir aralığında kaynak yapabilme ve Ø20 mm ile Ø60 mm aralığındaki numuneleri kaynak yapabilme özelliğine sahiptir.

Sürtünme kaynak işlemlerinin yapıldığı kaynak makinesi Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. PLC kontrollü sürtünme kaynak makinesi

Deneyler sırasında, farklı malzeme çiftinin kullanıldığı C grubu numunelerde AISI 420 çeliği dönen aynaya, AISI 4340 çeliği ise sabit ayna tarafına bağlanmıştır. Numunelerin tezgaha bağlanma düzenleri Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Malzeme çiftinin aynalara bağlanma düzenini gösteren şematik resim

4.2.4. Sürtünme Kaynak Parametreleri

Yapılan literatür çalışmalarından sonra, cihazın kapasitesi ve teknik özellikleri dikkate alınarak birtakım ön denemeler yapılmıştır. Bu ön denemelerden sonra, ilk olarak AISI 420 - AISI 420 nartenzik paslanmaz çelik çifti, sonra AISI 4340 – AISI 4340 ıslah çelik çifti son olarak ise AISI 420 paslanmaz çelik ile AISI 4340 ıslah çelik çifti birleştirilmiştir. Sürtünme kaynağı sırasında sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi, yığma basıncı gibi parametreler sabit tutulup, devir sayısı değişken olarak seçilmiş

ve üç farklı devir kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir, değişken parametre olarak devir sayısının seçilmesinin nedeni, devir sayısının bağlantı kalitesini belirleyen en önemli parametre olmasıdır. Kaynak parametreleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Sürtünme kaynağında kullanılan parametreler

Numuneler	Devir Sayısı (dev/dk)	Sürtünme Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığma Basıncı (MPa)	Yığma Süresi (sn)
AISI 420-AISI 420 (A1)	700	10	50	60	6
AISI 420-AISI420 (A2)	1000	10	50	60	6
AISI 420-AISI420 (A3)	1300	10	50	60	6
AISI4340-AISI4340 (B1)	700	10	50	60	6
AISI4340-AISI4340 (B2)	1000	10	50	60	6
AISI4340-AISI4340 (B3)	1300	10	50	60	6
AISI420-AISI4340 (C1)	700	10	50	60	6
AISI420-AISI4340 (C2)	1000	10	50	60	6
AISI420-AISI4340 (C3)	1300	10	50	60	6

4.3. Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler

4.3.1. Metalografik İncelemeler

Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş numuneleri makroskobik olarak incelemek için Fujifilm Finepix J 38 marka fotoğraf makinası ile makroskobik fotoğraflar çekilmiştir.

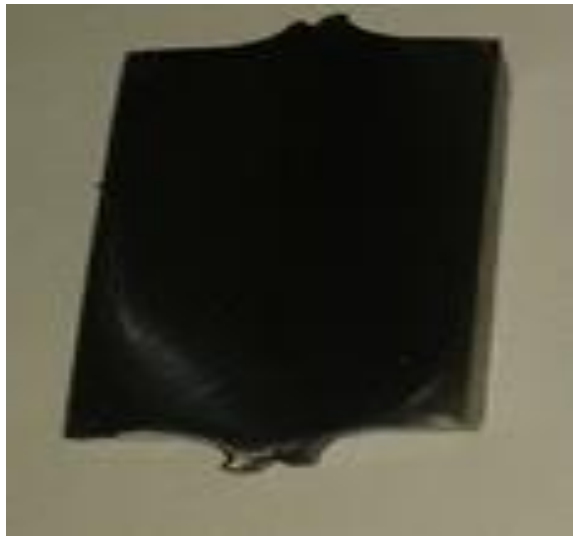
Kaynak işleminden sonra, metalografik incelemelerden önce numune Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Metalografik incelemeler öncesi C grubu numunesi

Numuneler kaynak işleminden sonra, birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi amacı ile, birleşme arayüzüne dik doğrultuda ve 25 mm boyunda, soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiştir. Daha sonra ana yapıya ulaşmak amacı ile numuneler orta eksenlerine kadar METKON SERVOCUT hassas kesme cihazında kesilmiştir. Numune boyutlarının büyük olması sebebiyle merkezden başlayarak 7 mm derinliğinde numuneler elde etmek için ikinci bir kesme işlemi uygulanmıştır ve böylelikle daha küçük ve düzgün numuneler elde edilmiştir.

Birleşme bölgesinin incelenmesi ve meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi için, sırasıyla 80,120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh’lik zımpara ile zımparalandıktan sonra 3 μm ’ lik elmas pasta ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için kullanılan numunenin son hali Şekil 4.5’ de görülmektedir.



Şekil 4.5. Metalografik incelemelerde kullanılan numune

Dağlama işleminde AISI 4340 çeliği için % 2 nital, martenzitik paslanmaz çelik için ise, 3 birim HCl ve 1 birim HNO₃ asitlerinden oluşan çözeltiler kullanılmıştır.

Dağlama işlemi gerçekleştirildikten sonra, kaynak bölgesi ve kaynağa yakın bölgelerde meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin gözlemlenmesi için numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Bu incelemeler, Fırat Üniversitesi Fizik bölümü laboratuvarlarında bulunan JEOL marka JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, aynı cihaz yardımı ile kaynak bölgesinde ve kaynağa yakın bölgelerde oluşan fazların kimyasal içerikleri Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) analizleri ile tespit edilmiştir.

Sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği numunelerin bağlantı bölgelerinde meydana gelen fazların tespiti için, Fırat Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliğinde bulunan X-Ray cihazı kullanılmıştır.

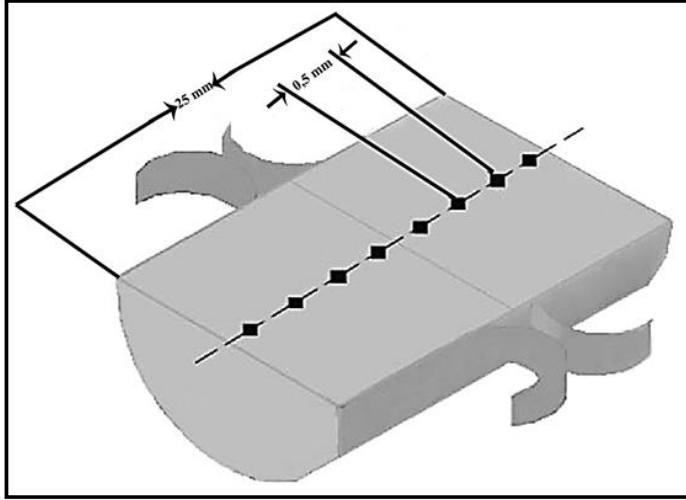
4.3.2. Mikrosertlik Analizi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin sertlik değişimlerini incelemek amacı ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri yapılmadan önce numuneler metalografik olarak hazırlanıp dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin mikrosertlik ölçümleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında bulunan EMCOTEST DuraScan marka mikrosertlik cihazı ile 1 N yük uygulanarak, numunelerin tam orta ekseninden ve kaynak kesitine dik olacak şekilde bir hat üzerinden 0.5 mm aralıklarla ve 10 sn'lik yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümünün gerçekleştirildiği cihaz Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Mikrosertlik cihazı

Ölçümlerde 136° tabanı kare olan piramit uç kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

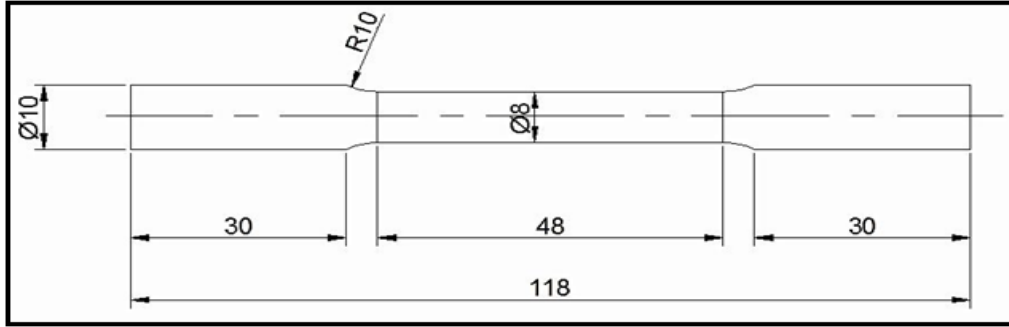


Şekil 4.7. Mikrosertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi

4.3.3. Çekme Deneyi

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelere çekme testi uygulamak amacı ile kaynak yapılmış numuneler universal torna tezgâhında soğutma sıvısı kullanılarak hassas bir şekilde işlenmiş ve TS 138’e uygun ölçülere getirilmiştir. Numuneler 10 mm çapında ve

118 mm boyunda silindirik olarak hazırlanmıştır. Deney numunelerine ait ölçüler Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Çekme deney numunelerine ait ölçüler

Numuneler çekme testine tabi tutulmadan önce Şekil 4.9’da görüldüğü üzere çizik ve çentiklerden tamamen temizlenmiş ve pürüzsüz hale getirilmiştir.



Şekil 4.9. Çekme deney numunesi

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan *SHIMADZU AG-X 50 KN* marka çekme cihazı ile 50.000 N yük altında ve 1mm/dk çekme hızında standartlara uygun olarak yapılmıştır. Deney sonucunda kırılma yerleri not alınmış, değerlendirme esnasında kullanılmak üzere kırık numunelerin ve kırık yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir. Tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı çekme cihazı Şekil 4.10’da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Çekme deney cihazı

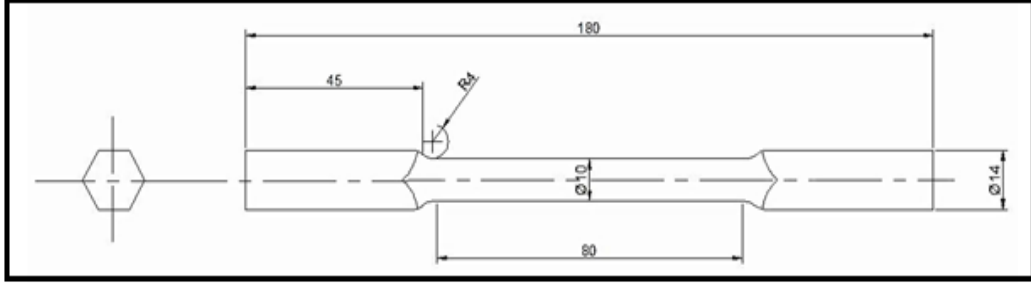
4.3.4. Burulma Deneyi

Burulma deneyi, malzemelerin kayma modülü (G) ve kayma akma gerilmesi (t_A), kırılma modülü gibi özelliklerinin belirlenmesi amacı ile uygulanır. Burulma deneyi, dairesel bir çubuğun, dik kesitinin orta noktasından dışarı doğru çıkan eksen etrafında, uygulanan bir moment tarafından zorlanmasıdır. İki ucundan sıkıştırılmış numuneye, bir ucu sabit olmak şartıyla diğer ucundan burulma momenti uygulanarak yapılır. Burulma momenti etkisiyle numunede kayma gerilmeleri oluşur. Deney sırasında oluşan burulma momenti (T) – burulma açısı (F) diyagramı elde edilir.

Burulma deneyi, burulma deneyine en uygun geometride olan yuvarlak kesitli numunelere uygulanır. Burulma deneyinde uygulanan burulma momenti etkisiyle numunede kayma gerilmeleri oluşur. Kayma gerilmeleri numunenin merkezinden yüzeyine doğru doğrusal olarak artar.

Sürtünme kaynağı yapılmış olan numunelerin burulma dayanımlarının incelenmesi için, numuneler burulma deneyi sırasında kullanılan cihazın özelliklerine uygun olacak

şekilde, üniversal torna tezgâhında soğutma sıvısı kullanılarak hassas bir şekilde işlenmiş ve Şekil 4.11’de verilen ölçülerde burulma deneyine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.11. Burulma deney numunelerine ait ölçüler

Numuneler burulma deneyine tabi tutulmadan önce Şekil 4.12’de görüldüğü üzere tamamen temizlenerek pürüzsüz bir hale getirilmiştir.



Şekil 4.12. Burulma deney numunesi

Şekil 4.13’de AISI 420-AISI 420, AISI 4340-AISI 4340, ve AISI 420-AISI 4340 çelik gruplarının burulma deneyi için hazırlanmış numune resimleri verilmiştir.



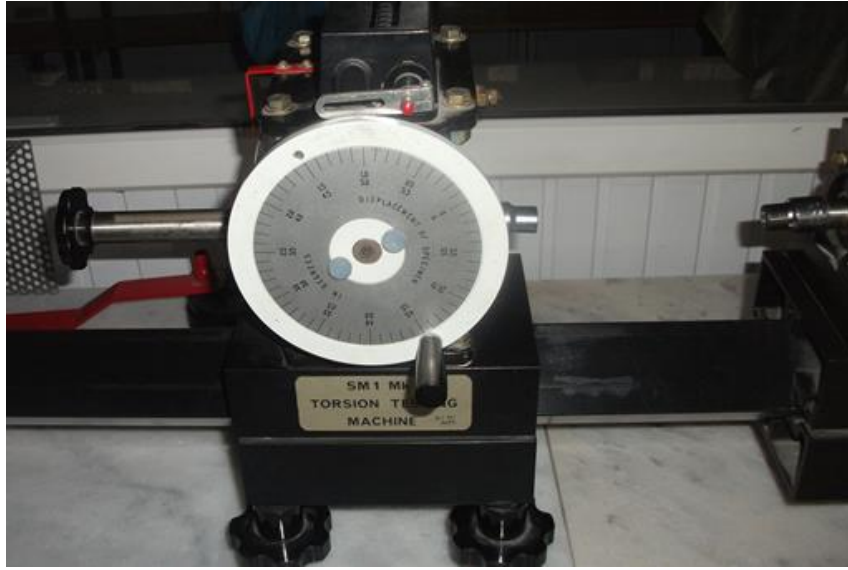
Şekil 4.13. A, B ve C gruplarına ait burulma deney numuneleri

Burulma deneyleri Osman Gazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü'nde SM 1 Mk II marka Şekilde gösterilen burulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Burulma cihazı iki ucu sıkıştırılmış deney numunesine bir ucu sabit kalacak şekilde diğer ucundan burulma momenti uygulayan bir cihazdır. Cihazda uygulanan devir sayısının artırımını manuel olarak yapılmaktadır. Her bir devir sayısı 6 dereceye tekabül etmektedir. Uygulanan burulma momenti bir göstergeden okunmakta, her bir devir sayısına tekabül eden moment değeri ayrı ayrı kaydedilmekte, cihazda ayrıca burma açısını gösteren bir gösterge bulunmaktadır. Cihazın ayrıntıları Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Burulma deney cihazı

Burulma deneyine başlamadan önce deney cihazı kalibre edilmiştir. Kalibrasyon kolu takılarak cihaz üzerindeki göstergenin 0 derece olduğundan emin olunmuş ve gerekli ayarlar yapıldıktan sonra numunenin ilk boyu ve ilk çapı ölçülerek numune cihaza bağlanmıştır. Numune cihaza bağlandıktan sonra manuel olarak Şekil 4.15’deki devir kolu yardımı ile devir arttırılmış ve her bir devirdeki moment değeri göstergeden okunarak kaydedilmiş ve hesaplamalar kaydedilen bu değerler yardımı ile yapılmıştır. Bu işlem Tablo 4.4’de A1 numunesi için örneklendirilmiştir.



Şekil 4.15. Burulma deney cihazına ait devir kolu

Tablo 4.4. A1 no'lu numunede devir sayısındaki artış ile aç ı ve burulma momentinde meydana gelen değişim

Devir Sayısı	Açı (Derece)	Burulma Momenti (Nm)	Devir Sayısı	Açı (Derece)	Burulma Momenti (Nm)
2	12	0,03	110	660	8,43
4	24	2,41	115	690	8,48
6	36	4,52	120	720	8,46
8	48	5,14	125	750	8,43
10	60	5,46	130	780	8,37
12	72	5,86	135	810	8,34
14	84	6,07	140	840	8,34
16	96	6,35	145	870	8,32
18	108	6,52	150	900	8,26
20	120	6,68	155	930	8,40
25	150	7,13	160	960	8,43
30	180	7,45	165	990	8,49
35	210	7,72	170	1020	8,55
40	240	8,00	175	1050	8,59
45	270	8,09	180	1080	8,57
50	300	8,14	185	1110	8,54
55	330	8,19	190	1140	8,49
60	360	8,24	195	1170	8,44
65	390	8,15	200	1200	8,44
70	420	8,14	210	1260	8,44
75	450	8,13	220	1320	8,52
80	480	8,13	230	1380	8,60
85	510	8,14	240	1440	8,62
90	540	8,16	250	1500	8,58
95	570	8,25	260	1560	8,11
100	600	8,32	264	1584	0,55
105	630	8,38			

Her bir numune için tablo deki gibi tablolar oluşturulmuştur. Daha sonra bu tablolar yardımı ile Burulma Momenti (Nm) - Burulma Açısı (radyan) grafikleri her numune için ayrı ayrı çizilmiştir. Yine tablodaki değerler kullanılarak

$$\tau = \frac{16 M}{\pi D^3}$$

formülü yardımı ile her bir devirdeki kayma gerilmeleri bütün numuneler için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Burada; τ : Kayma gerilmesi,

M: Numuneye uygulanan moment,

D: Numunenin çapıdır.

$$\gamma = \tan \theta = r \theta / L$$

formülü ile de kayma uzamaları hesaplanmıştır.

Burada; r : Numunenin yarıçapı,

θ : Burulma açısı (radyan)

L: Numunenin boyudur.

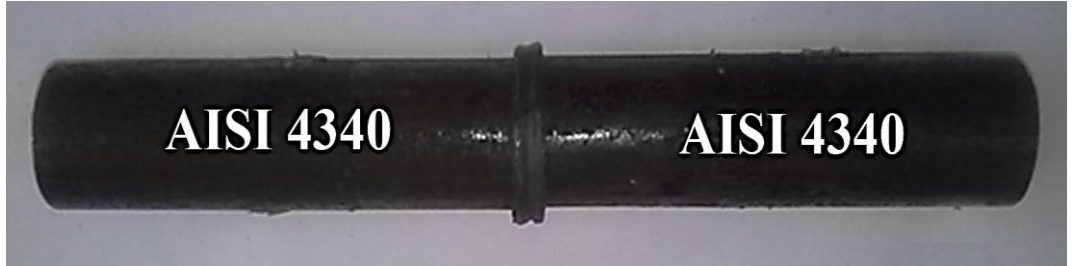
5. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLANMASI

5.1. Kaynaklı Numunelerin Makroskobik Değerlendirilmesi

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği numunelerde kaynaktan sonra, kaynak ara yüzeyinden malzeme taşmakta ve bu dışarı taşan malzeme bir flanş oluşturmaktadır. Bunun sonucu olarak malzemelerin boyunda kısaltmalar meydana gelmektedir. Kaynaklı bağlantılardaki flanş oluşumu Şekil 5.1’de A grubu, Şekil 5.2’ de B grubu, Şekil 5.3’de C grubu için gösterilmiştir.



Şekil 5.1. A1 no’lu numuneye ait yüzey fotoğrafı



Şekil 5.2. B1 no’lu numuneye ait yüzey fotoğrafı



Şekil 5.3. C1 no’lu numuneye ait yüzey fotoğrafı

Numunelerin sürtünme kaynağı yapılmadan önceki boyları ve sürtünme kaynak sonrası boyları ölçülmüş, dışarı taşan malzeme miktarı ve malzemelerdeki boyca kısalma

belirlenmiştir. Malzemelerde meydana gelen boyca kısalma miktarları Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. A, B ve C grubu numunelerindeki boyca kısalma miktarları

Numune	Malzeme	Devir (Dev/dk)	Sürtünme Süresi (Sn)	Sürtünme Basıncı (Mpa)	Yığılma Basıncı (Mpa)	Yığılma Süresi (Sn)	İlk Boy(mm)	Son Boy (mm)	Fark (mm)
A1	AISI 420	700	10	50	60	6	90	88,1	1,9
	AISI 420						90	88,3	1,7
A2	AISI 420	1000	10	50	60	6	90	87,9	2,1
	AISI 420						90	87,6	2,4
A3	AISI 420	1300	10	50	60	6	90	87	3
	AISI 420						90	87,1	2,9
B1	AISI 4340	700	10	50	60	6	90	87,3	2,7
	AISI 4340						90	87,5	2,5
B2	AISI 4340	1000	10	50	60	6	90	86,8	3,2
	AISI 4340						90	86,5	3,5
B3	AISI 4340	1300	10	50	60	6	90	86,2	3,8
	AISI 4340						90	86,4	3,6
C1	AISI 420	700	10	50	60	6	90	88,4	1,6
	AISI 4340						90	87,7	2,3
C2	AISI 420	1000	10	50	60	6	90	88	2
	AISI 4340						90	87,6	2,4
C3	AISI 420	1300	10	50	60	6	90	87,5	2,5
	AISI 4340						90	87,1	2,9

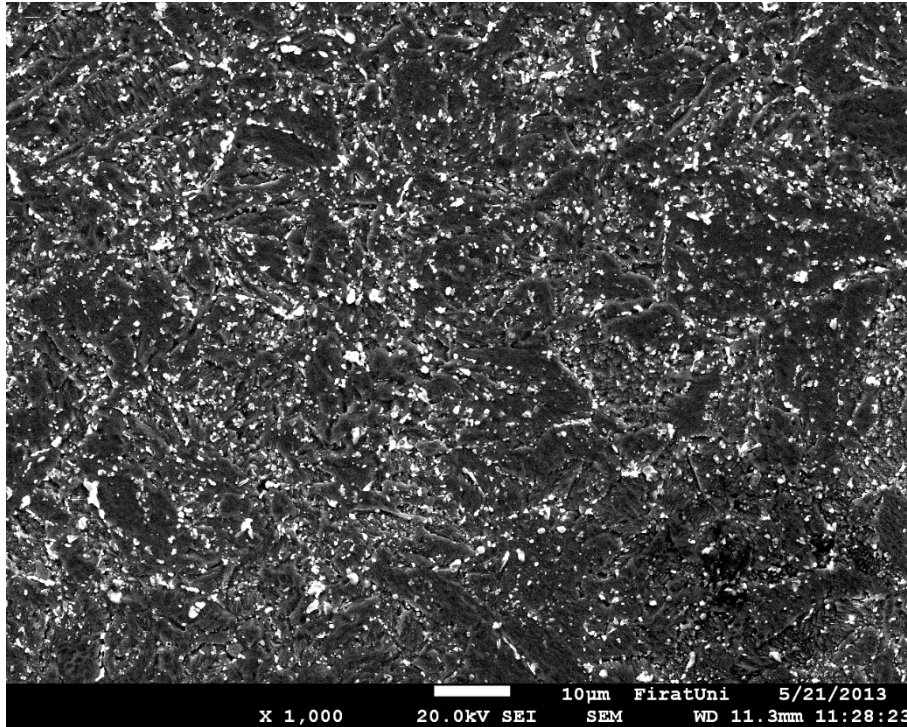
Devir sayısının artması ile birlikte ara yüzeydeki plastik deformasyon miktarı da artmış ve bu durumda daha fazla malzeme dışarı atılmıştır. Kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesi incelendiğinde flanş bölgelerinin profillerinin birbirine benzediği ve miktar olarak da çok büyük farklılıklar göstermediği tespit edilmiştir.

Artan devir sayısına bağlı olarak boyca kısalma miktarı en az % 2 ve en fazla % 4 olarak Tablo 5.1’deki değerlerden hesaplanmıştır.

Tablo 5.1’den görüldüğü gibi boyca kısalma en fazla AISI 4340 tarafında meydana gelmiştir. AISI 420 çeliğine göre daha sert olmasından dolayı AISI 4340 çelik tarafında daha az kısalma olması beklenirken bunun tam tersi bir durum görülmüştür, yani daha sert olan malzeme tarafındaki boyca kısalma miktarı daha fazladır. Bu durum malzemelerin ısı iletim kapasitelerinin farklı olması ile açıklanabilir. AISI 4340 çeliğinin ısı iletim katsayısı 44.5 W/mK iken, AISI 420 çeliğinin ısı iletim katsayısı 24.9 W/mK dir. AISI 4340 çeliği ısıyı AISI 420 çeliğinin yaklaşık iki katı daha hızlı iletir. Bu nedenle AISI 4340 tarafında sürtünmeden dolayı oluşan ısı, daha hızlı iletilmiş ve daha fazla miktarda malzeme viskoz hale gelmiştir.

Kaynaklı yüzeylerin arayüzey makro fotoğrafları incelendiğinde herhangi bir boşluğa ve çatlığa rastlanmamıştır. Dışarı taşan malzeme şeklinin literatüre uygun olduğu tespit edilmiş ve boyca kısalmanın fazla olduğu tarafta flanş hacminin daha büyük olduğu görülmüştür.

5.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirmesi

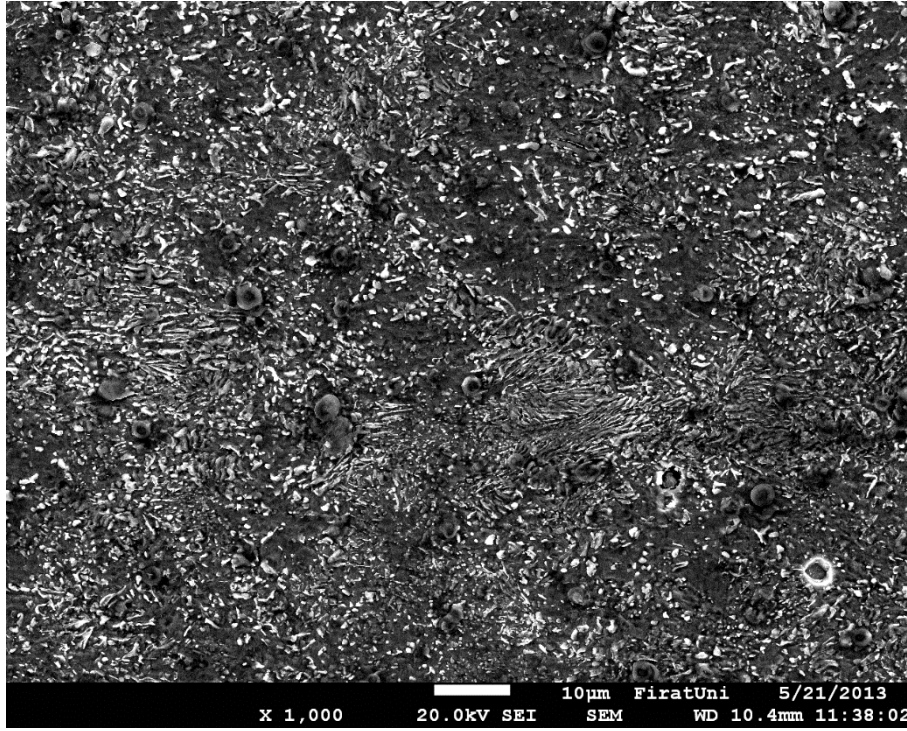


Şekil 5.4. AISI 420 çelik malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı

Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik kafes yapının östenitin hızlı soğutma sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit

yapıya dönüşümü ile elde edilir. Östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950 -1050 °C arasındadır. Bu sıcaklıklara çıkarılan çeliğe su verildiğinde martenzitik iç yapı elde edilir. Çeliğin içerdiği karbon miktarı su verme ve temperleme sonrası mekanik özellikleri belirler.

Şekil 5.4’de görülen AISI 420 çeliğinde matris temperlenmiş martenzittir, hem matriste hem de tane sınırlarında ikincil karbürler çökelmiştir.

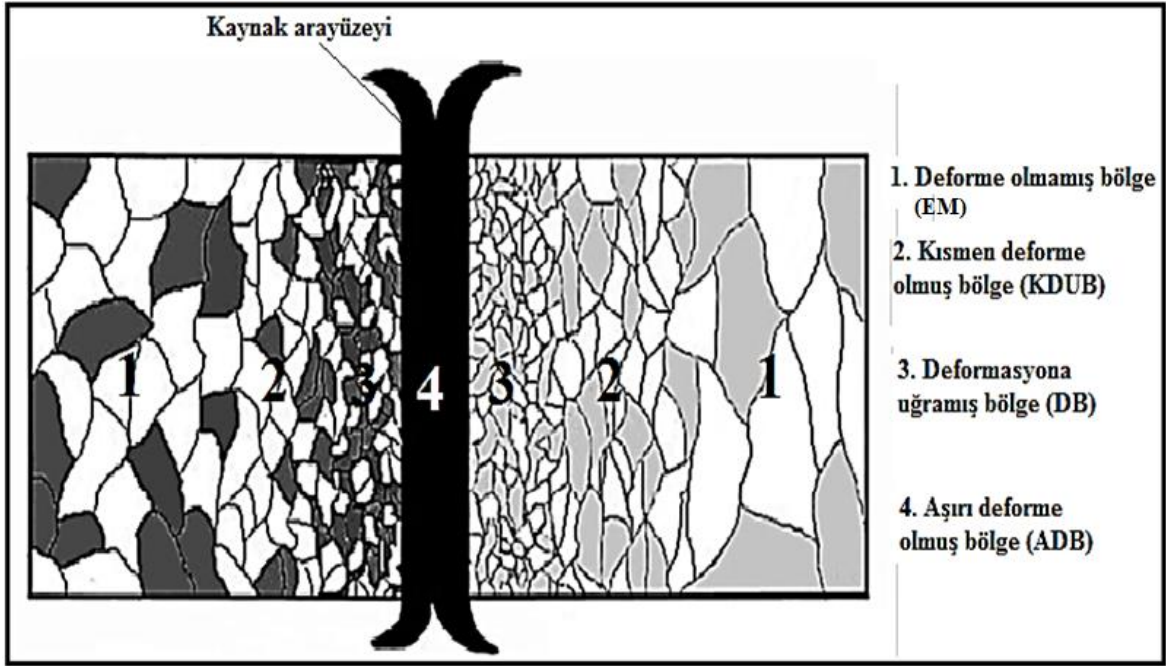


Şekil 5.5. AISI 4340 çelik malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı

Martenzitik paslanmaz çeliklerde östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950 -1050 °C arasındadır. Bu sıcaklıklara çıkarılan çeliğe su verildiğinde martenzitik iç yapı elde edilir. Martenzitik paslanmaz çelikler tavlanmış veya ıslah edilmiş durumda kullanılırlar. Tavlanmış olarak alınan martenzitik paslanmaz çelikler, şekil verildikten sonra ıslah işlemine (su verme + temperleme) tabi tutulduğunda ıslah çelikleri elde edilir. AISI 4340 çeliği bu şekilde elde edilen ve içeriğinde Ni ve Mo bulunan bir ıslah çeliğidir.

Şekil 5.5’de görülen AISI 4340 çeliğinde yapı temperlenmiş martenzittir yer yer bainitik yapı mevcuttur. Aynı zamanda matriste ikincil çökelmiş karbürler de görülmektedir.

Sürtünme kaynak yönteminde, kaynak sonrası birleşme arayüzeyinde meydana gelen yapısal değişim bazı araştırmacılar tarafından üç farklı bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Bu bölgeler Şekil 5.6’da gösterildiği gibi; esas malzeme (EM), deformasyon bölgesi (DB), kısmen dönüşüme uğramış bölge (KDUB), olarak isimlendirilmektedir. Bununla birlikte deformasyon bölgesi (DB), içinde kalan, ancak yapısal olarak farklılık gösteren aşırı deforme olmuş bölgenin (ADB) varlığı yapılan detaylı SEM çalışması ile belirlenmiştir. Aşırı deforme olmuş bölgenin deformasyon bölgesinin dışında, ilave bir bölge olarak kabul edilmesi ile yapı dört farklı bölüm olarak belirlenmiş ve incelenmiştir. Tanımlanan bu dört bölgenin boyutlarının, işlem parametrelerine bağlı olarak değişim gösterdiği literatürde vurgulanmaktadır [13, 80].

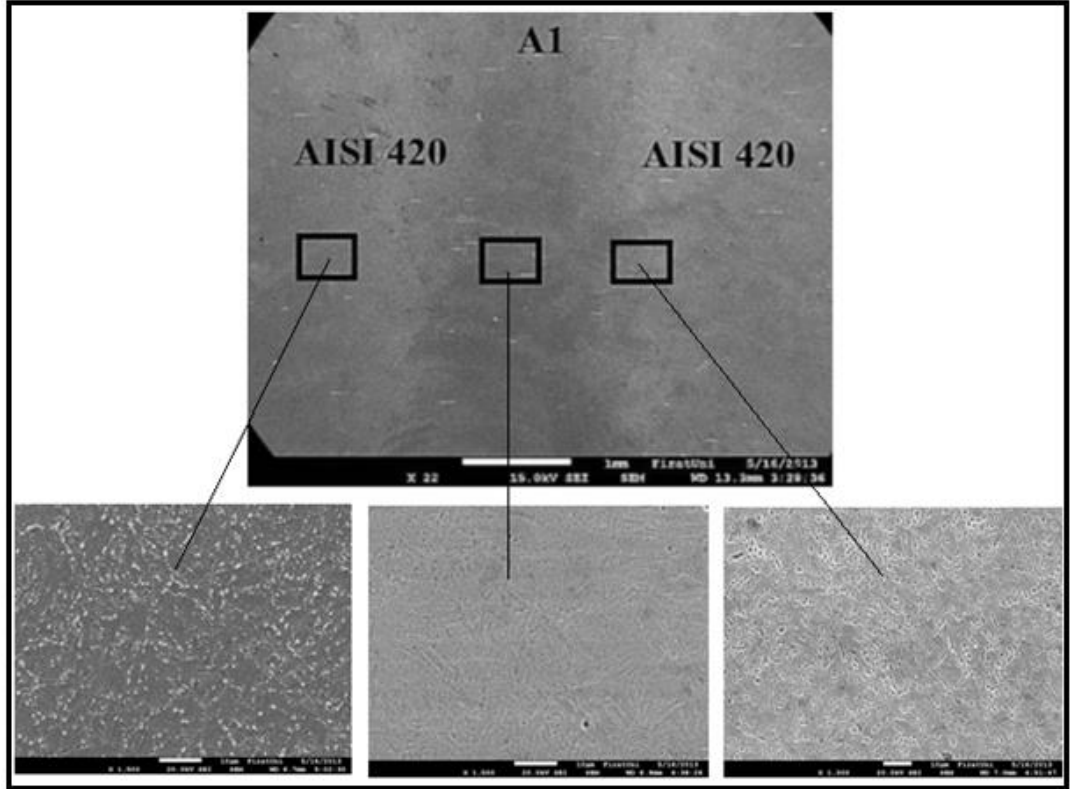


Şekil 5.6. Sürtünme kaynaklı numunelerin mikroyapı değişimi

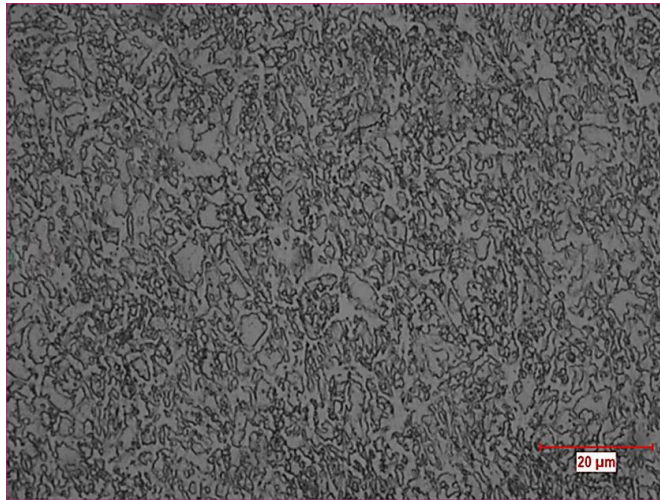
Üç farklı devir sayısı kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilen A, B ve C grubu numunelerinin birleşme arayüzeyi SEM fotoğrafları çekilerek incelenmiş ve inceleme sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir. İncelemelerde ADB, DB, KDUB ve EM bölgeleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

5.2.1. AISI 420/ AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çelik Çiftlerinin (A Grubu) SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri

5.2.1.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A1 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



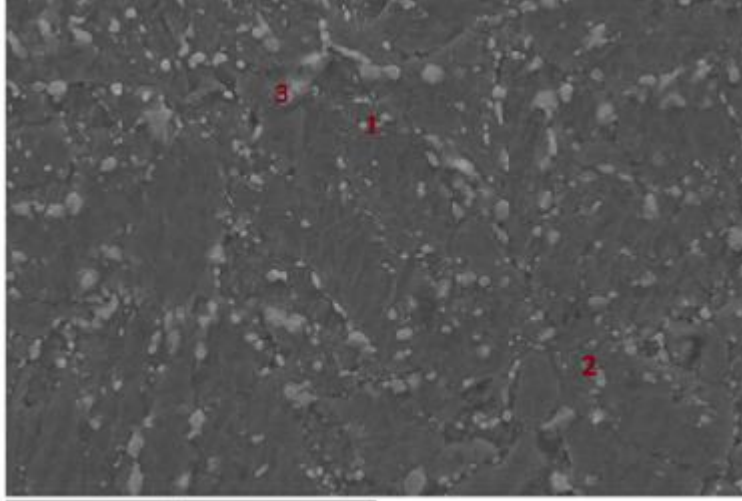
Şekil 5.7. A1 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri



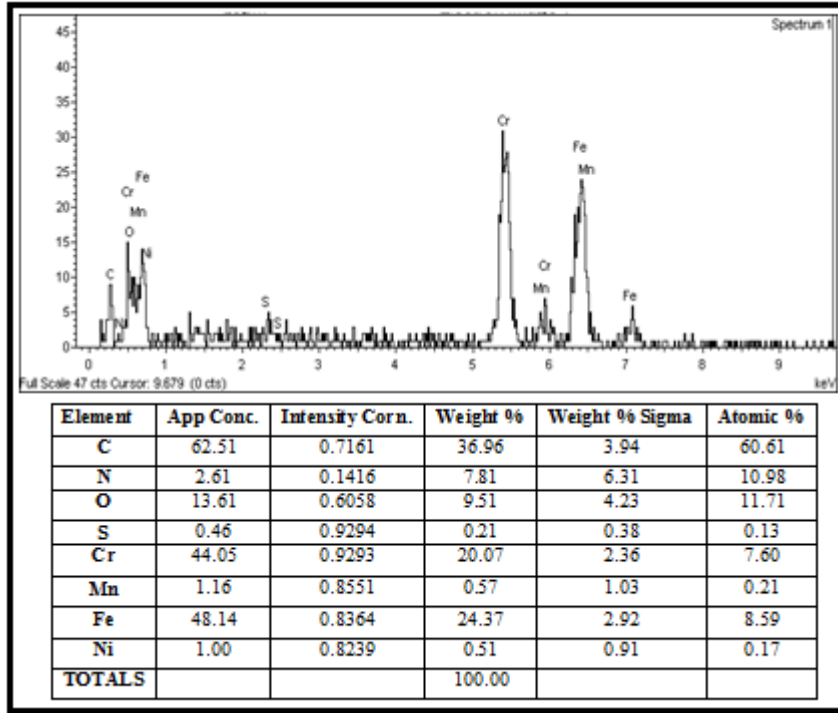
Şekil 5.8. A1 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.7’de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deforme olmuş bölgelerden (KDUB) fotoğraflar alınmıştır.

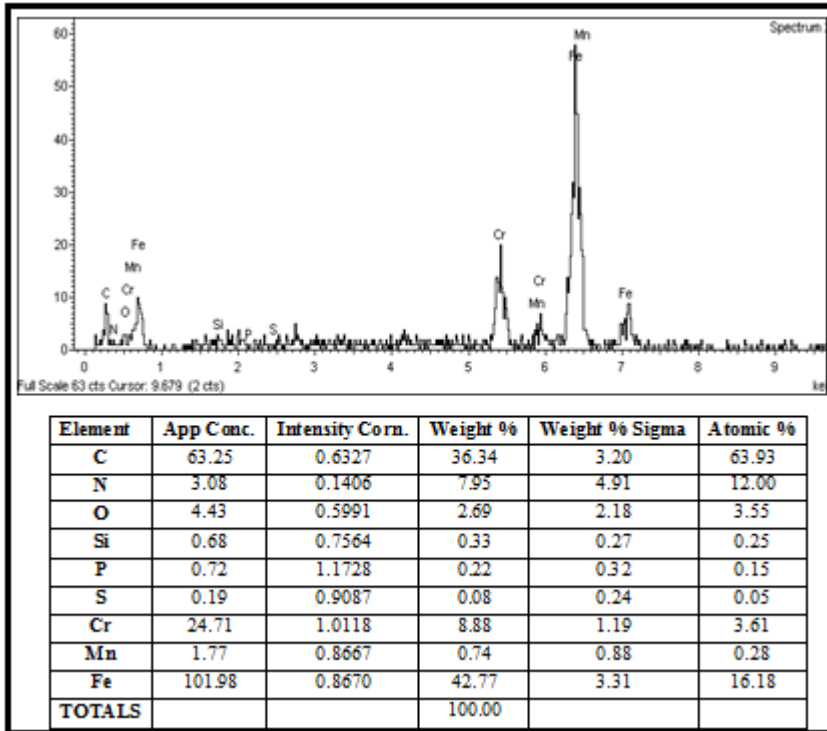
700 dev/ dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde, çatlğa ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır. Bağlantı bölgesinde deformasyona uğramış bir bölge (DB) ve bu bölgenin bitişiğinde basıncın etkisiyle dövülmüş tanelerden oluşan bir bölgenin olduğu görülmektedir. Kısmen deformasyona uğramış bölgede de mikroyapının orijinal içyapıya benzer bir yapı sergilediği sonucuna varılmıştır. Kaynak bölgesinden alınan optik mikroskopi resminden bu bölgede homojen dağılımlı bir yapı oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.8).



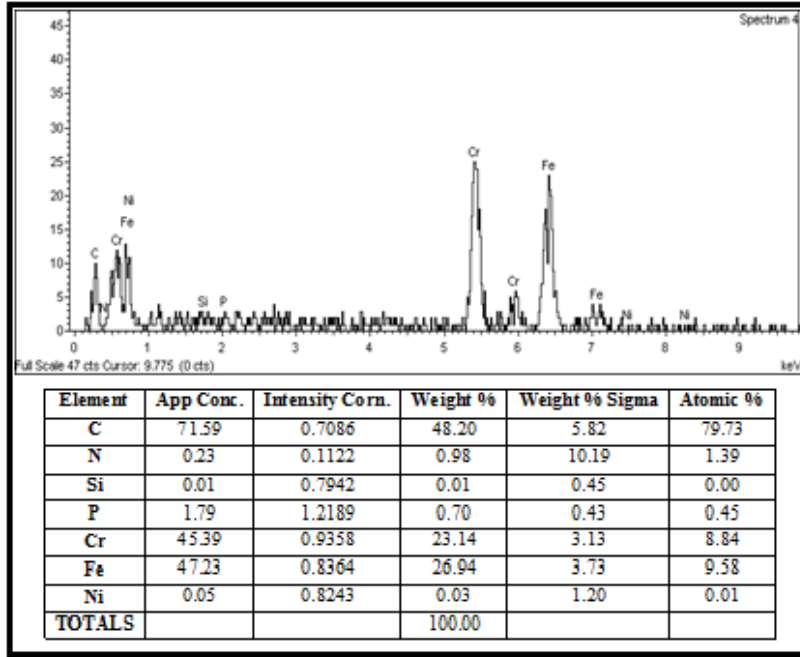
Şekil 5.9. A1 no’lu numunede EDS analizi yapılan noktalar



Şekil 5.10. A1 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi

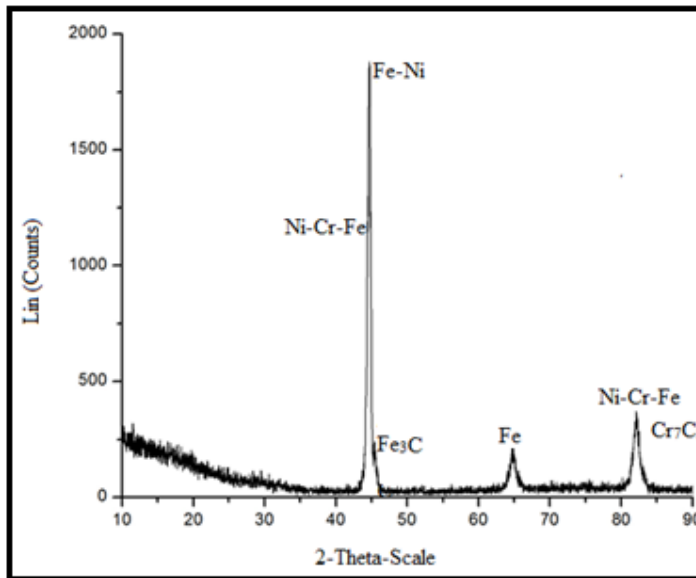


Şekil 5.11. A1 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.12. A1 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi

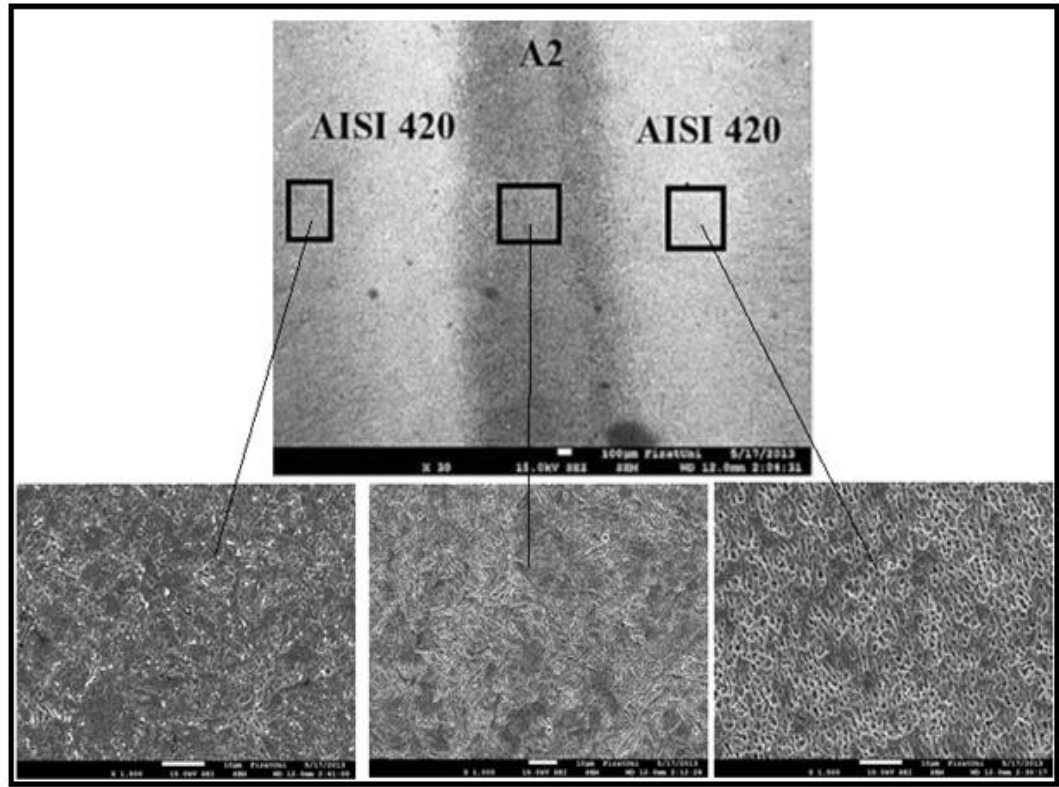
700 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen A1 numunesinde ADB' de üç farklı noktada EDS analizi yapılmıştır (Şekil 5.9). Birinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.10'da, ikinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.11'de ve üçüncü noktaya ait analiz sonuçları ise Şekil 5.12'de verilmiştir. Bu noktasal analizler incelendiğinde her üç noktada da C ve Cr değerleri yüksek çıkmıştır. Bu değerlerin yüksek çıkması ile bu noktalarda krom karbürlerin olduğu düşünülmüştür ve bu düşünce X- Ray analizi sonuçları ile desteklenmiştir.



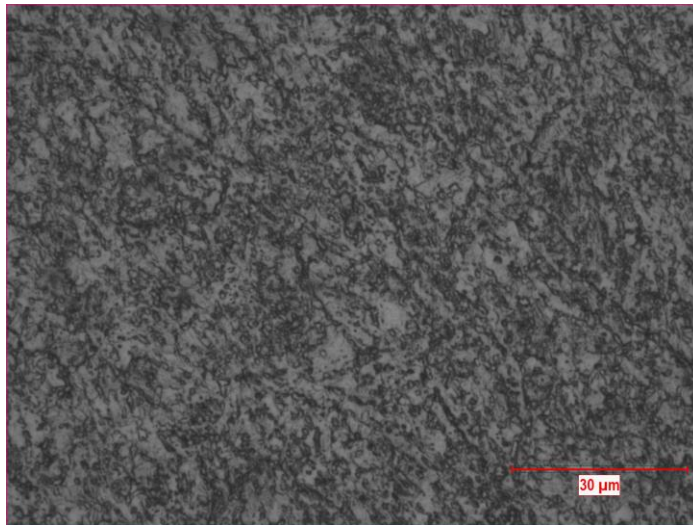
Şekil 5.13. A1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

700 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği A1 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.13’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, A1 numunesinin kaynak arayüzeyinde Fe₃C ve Cr₇C₃ fazları tespit edilmiştir.

5.2.1.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A2 No’lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



Şekil 5.14. A2 no’lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri

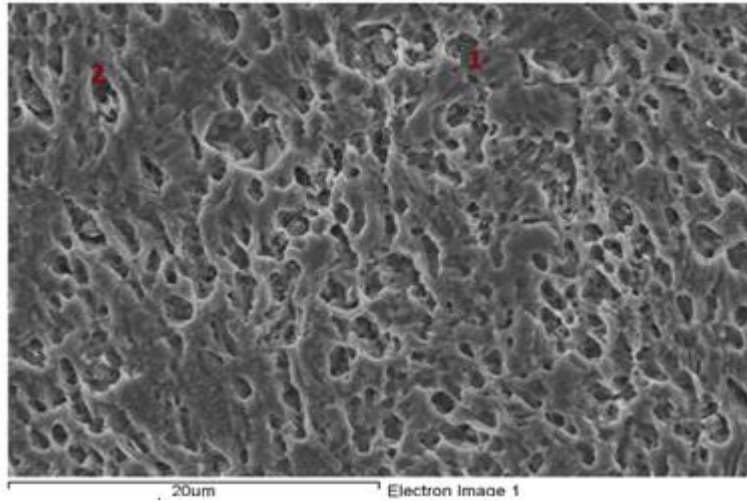


Şekil 5.15. A2 no’lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü

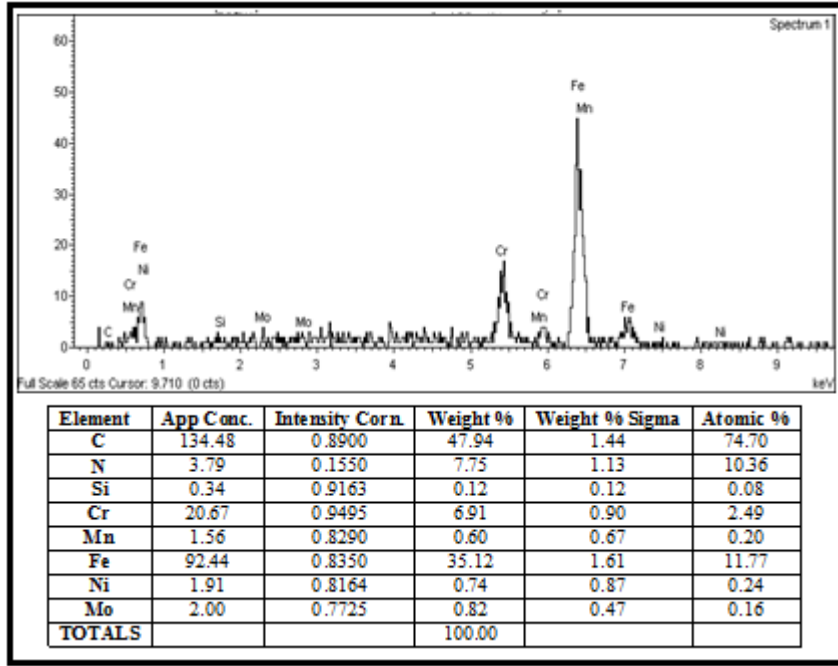
1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığılma basıncı ve 6 sn yığılma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.14’de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) ve esas malzeme (EM) den fotoğraflar alınmıştır.

1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde boşluğa ve çatlağa rastlanmamıştır. Yapılan SEM incelemelerinde aşırı deformasyon bölgesi (ADB) çok net olarak görülmektedir. ADB’deki tanelerin uygulanan basıncın etkisiyle kaynak arayüzeyine paralel doğrultuda yönlendiği tespit edilmiştir. ADB bölgesindeki tane yönelmesi KDUB ve DB’deki mikroyapı resimlerinde görülmektedir.

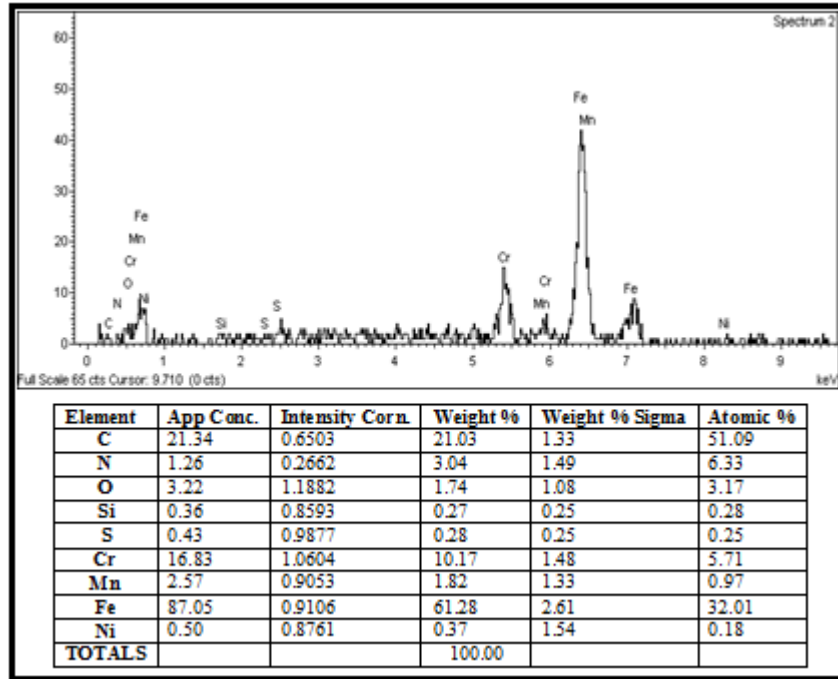
Kaynak bölgesinden alınan optik mikroskopi resmi incelendiğinde A1 numunesine benzer şekilde A2 numunesinde de bu bölgede homojen dağılımlı bir yapı olduğu görülmektedir (Şekil 5.15). A1 numunesi ile A2 numunesi mukayese edildiğinde bu bölgedeki tanelerin artan devir sayısına paralel olarak deformasyona uğrama miktarlarının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.16. A2 no’lu numunede EDS analizi yapılan noktalar



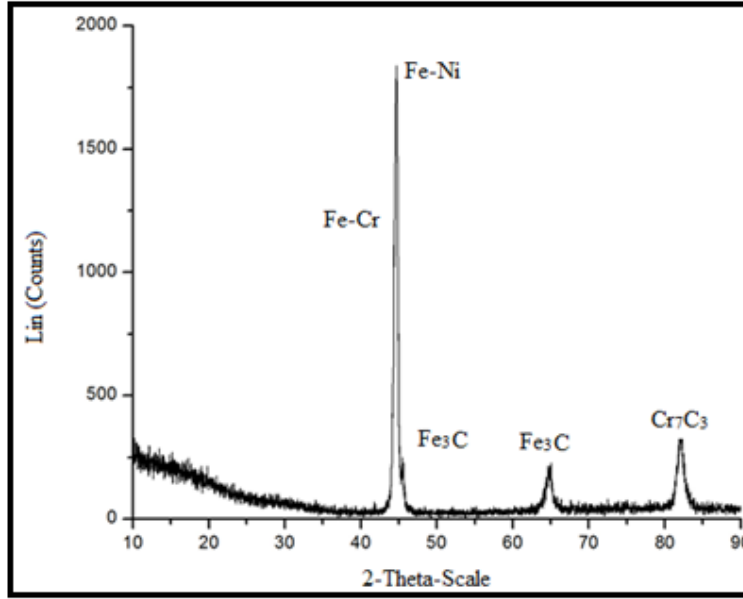
Şekil 5.17. A2 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.18. A2 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi

1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen A2 numunesinde ADB' deki 2 farklı noktada EDS analizi yapılmıştır (Şekil 5.16). Birinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.17'de, ikinci noktaya ait analiz sonuçları ise Şekil 5.18'de verilmiştir. Her iki noktada yapılan analizlerin sonucunda, A1 numunesine benzer şekilde, C ve Cr oranları yüksek çıktığından,

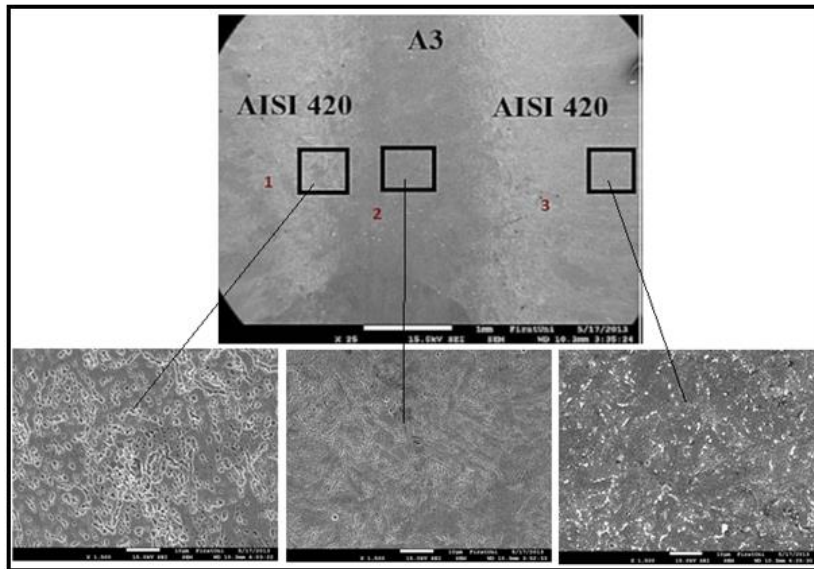
yine bu noktalarda da krom karbürlerin oluştuğu düşünülmüş ve bu sonuçlar X-Ray analizi ile desteklenmiştir.



Şekil 5.19. A2 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

1000 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği A2 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde Fe_3C ve Cr_7C_3 fazları tespit edilmiştir.

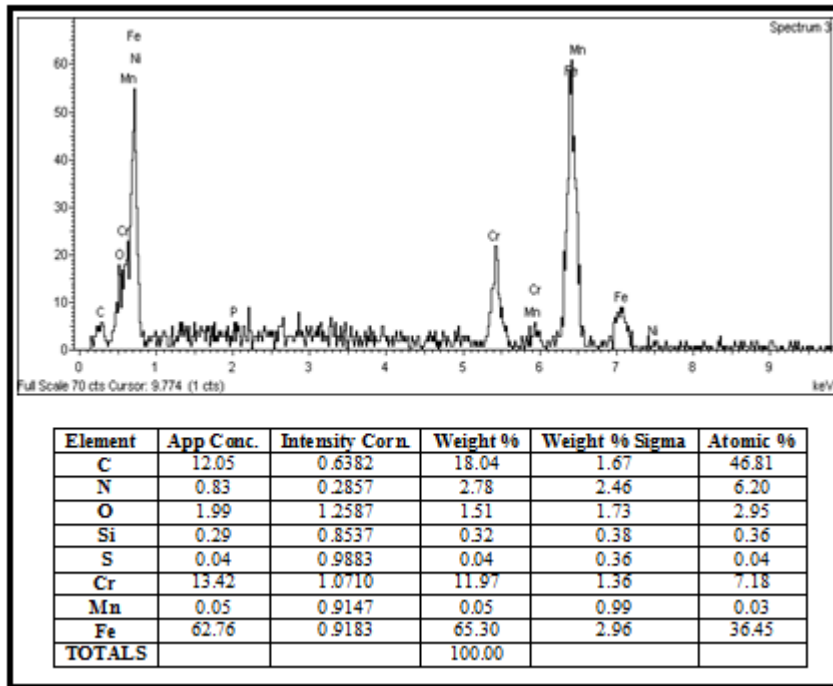
5.2.1.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A3 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



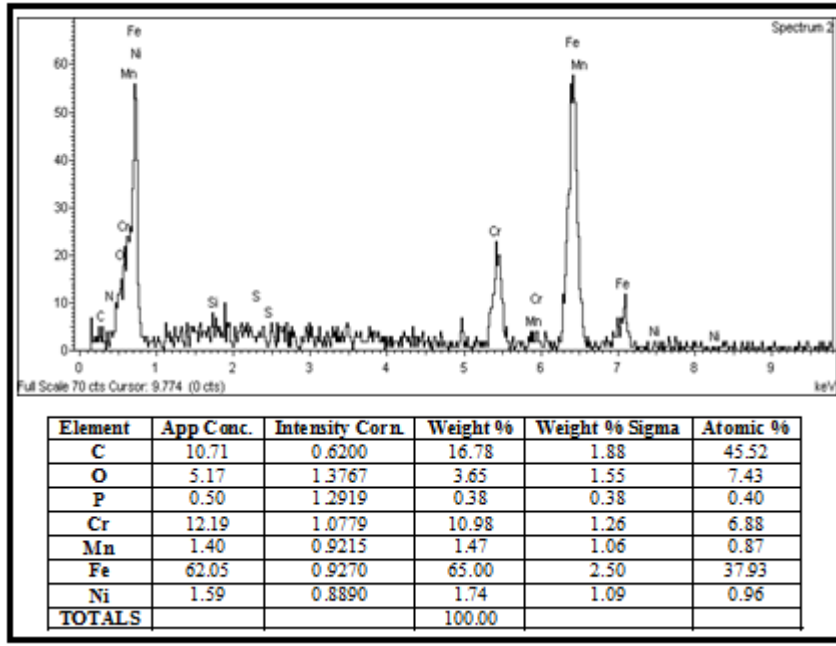
Şekil 5.20. A3 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığılma basıncı ve 6 sn yığılma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.20’de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB) ve deformasyona uğramış bölge (DB) ve esas malzeme (EM)’den fotoğraflar alınmıştır.

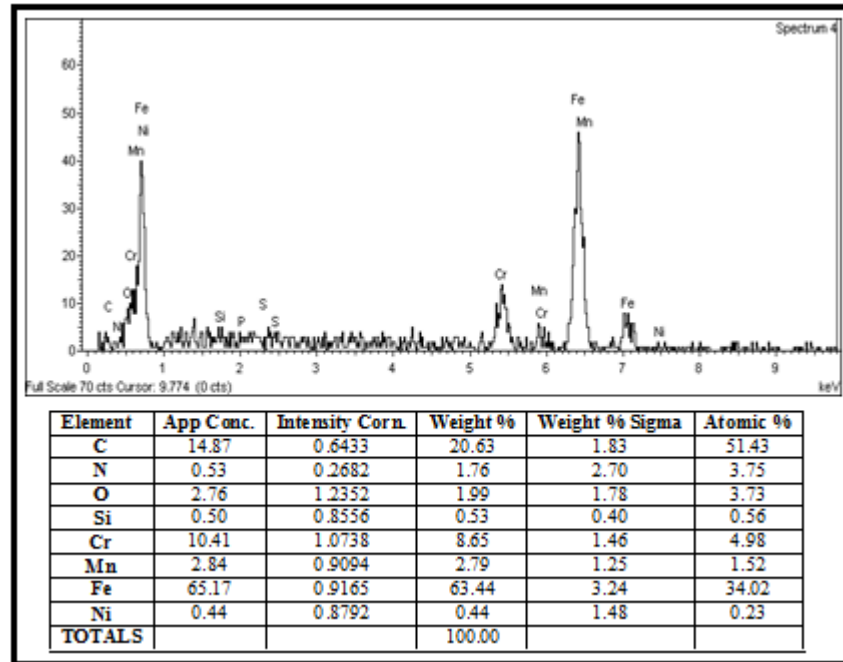
1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır. A3 numunesinin aşırı deformasyon bölgesinin A1 ve A2 numunelerinin aşırı deformasyon bölgelerinden daha geniş olduğu mikroyapı SEM fotoğraflarından açıkça görülmektedir. KDUB’deki tanelerin basıncın etkisiyle kaynak arayüzeyine paralel doğrultuda yönlendikleri ve esas malzemeden alınan mikroyapı fotoğrafında yapının orijinal içyapıdan oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.21. A3 no’lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi



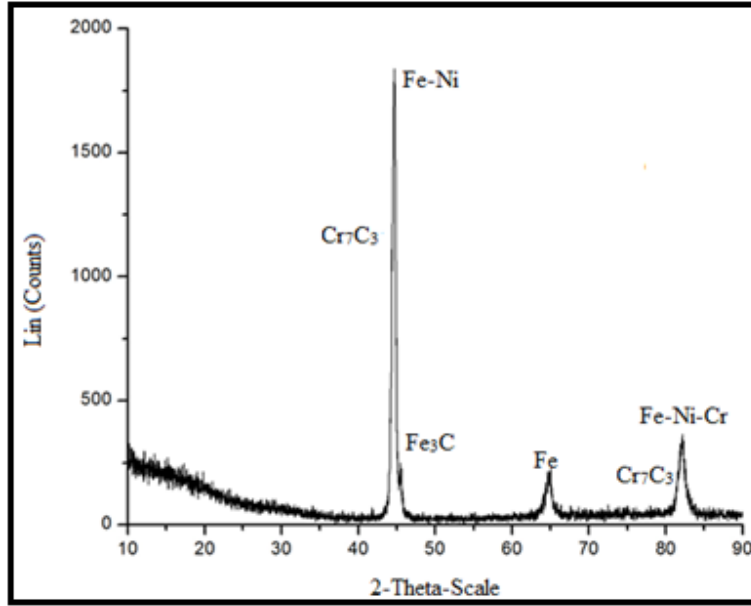
Şekil 5.22. A3 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.23. A3 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi

1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen A3 numunesinde A1 ve A2 numunelerinden farklı olarak KDUB, ADB ve DB'de birer noktada EDS analizi yapılmıştır. Birinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.21'de, ikinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.22'de ve üçüncü noktaya ait analiz sonuçları ise Şekil 5.23'de gösterilmiştir. Bu analizler incelendiğinde, A1 ve A2 numunelerine benzer şekilde yine C ve Cr oranlarının yüksek

çıkması, bu bölgelerde de krom karbürlerin oluştuğunu düşündürmüştür ve bu sonuçlar X-Ray analizi ile de desteklenmiştir.



Şekil 5.24. A3 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

1300 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği A3 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.24'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde Fe_3C ve Cr_7C_3 fazları tespit edilmiştir.

700-1000-1300 dev/dk devir sayıları ile sürtünme kaynağının yapıldığı AISI 420/AISI 420 numune grubunun mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde her üç numunede de birleşme arayüzeyinde çatlağa, boşluğa ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır. Numunelerde, artan devir sayısına paralel olarak deformasyona uğramış bölgenin genişlediği gözlenmiştir. A1, A2 ve A3 no'lu numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapı değişimi ve plastik deformasyon oluşumu üzerinde devir sayısının önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.

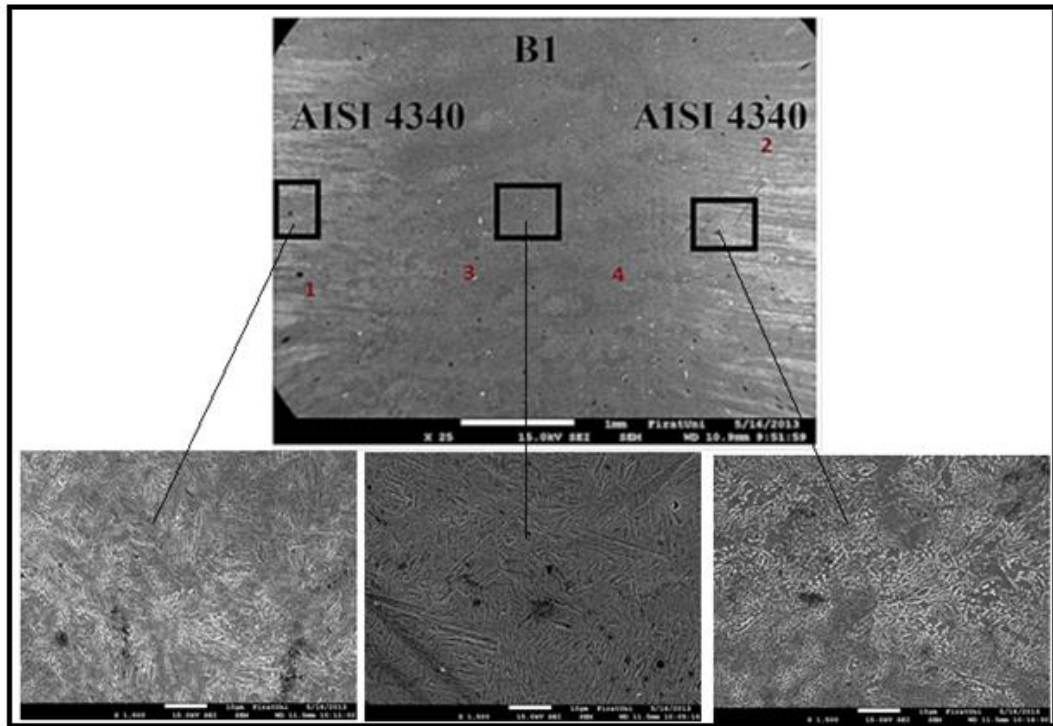
Artan devir sayısına bağlı olarak aşırı deformasyon bölgesinin genişlediği ve kısmen deformasyona uğramış bölgenin ise daraldığı gözlenmiştir. Bu durum artan devir sayısındaki artışla malzemenin aynı sürede daha fazla sürtünmesine ve ısı girdisinin artmasına bağlanabilir.

Her üç numunede de kısmen deformasyona uğramış bölgenin bitişindeki deformasyona uğramamış bölgede yapıların orijinal içyapıdan oluştuğu görülmüştür.

SEM mikroskopi incelemeleri, EDS analizi ve X-Ray analizleri incelemelerinde tüm numunelerin kaynak arayüzeylerinde Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlerin oluştuğu belirlenmiştir.

5.2.2. AISI 4340/ AISI 4340 Islah Çelik Çiftlerinin (B Grubu) SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri

5.2.2.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B1 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri

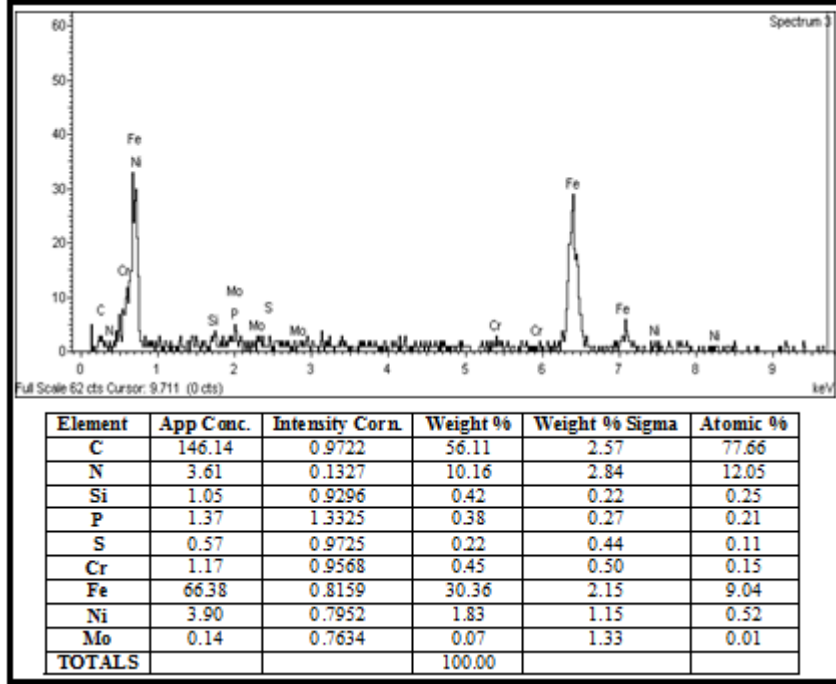


Şekil 5.25. B1 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri

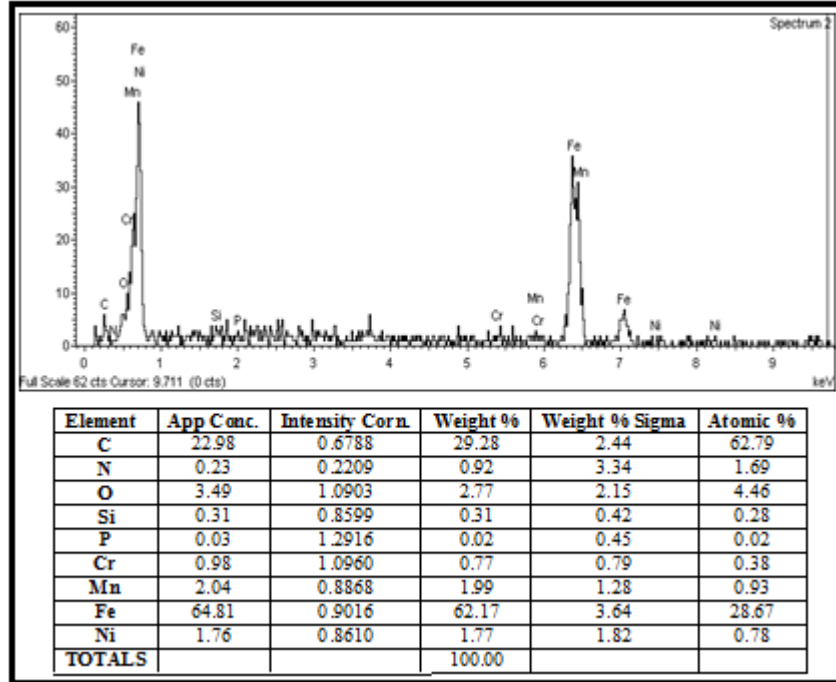
700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.25'de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (ADB) ve kısmen deforme olmuş bölgelerden (KDUB) fotoğraflar alınmıştır.

700 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde

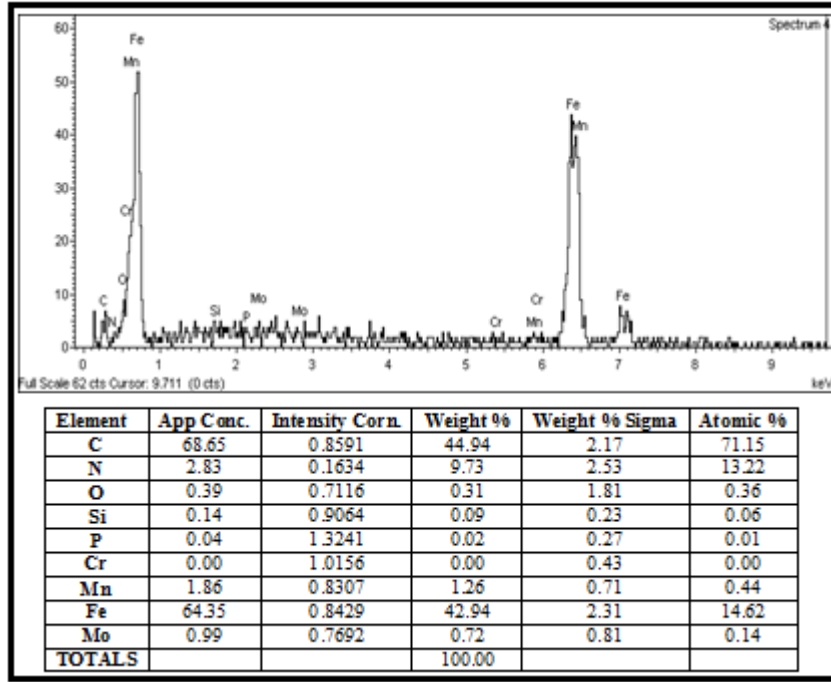
herhangi bir boşluğa, çatlağa ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır. Bağlantı bölgesinde sürtünmenin etkisiyle oluşan ADB ve bu bölgenin bitişiğinde kısmen taneleri yönlenmiş DB mevcuttur. Bu bölgenin yanındaki deformasyona uğramamış bölgede yapı orijinal halini korumuştur.



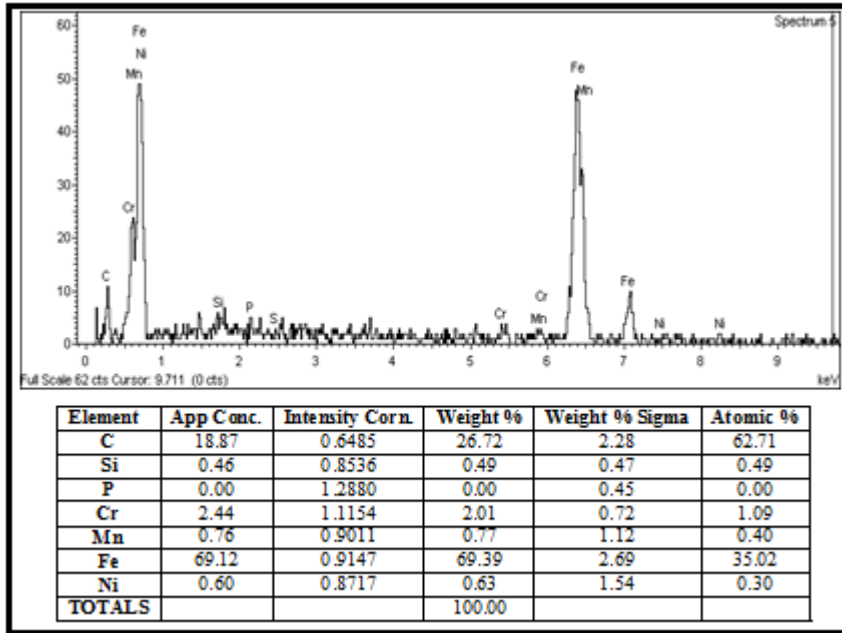
Şekil 5.26.B1 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.27. B1 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi



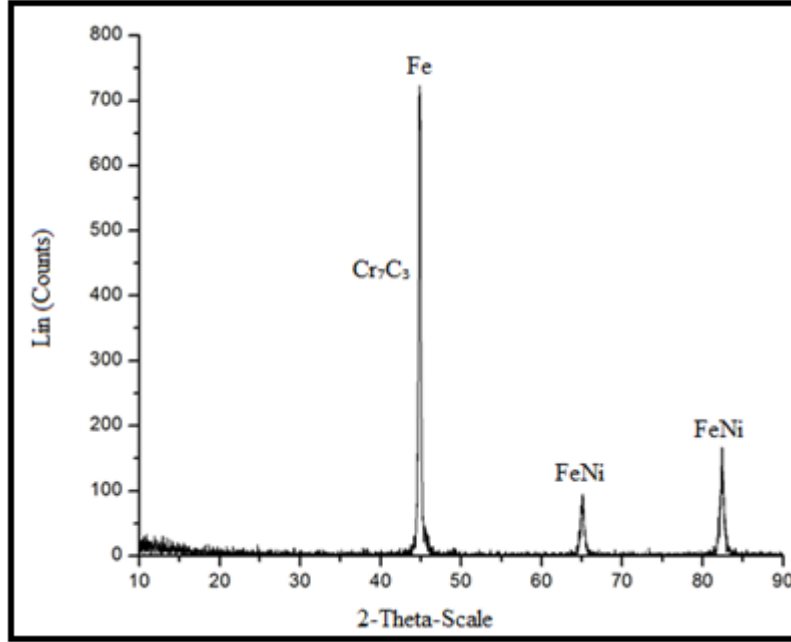
Şekil 5.28. B1 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.29. B1 no'lu numunenin 4 noktasından alınan EDS analizi

700 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen B1 numunesinde ikisi deformasyona uğramış bölgede ikisi de kısmen deformasyona uğramış bölgede olmak üzere dört farklı noktada EDS analizi yapılmıştır. Birinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.26'da, ikinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.27'de, üçüncü noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.28'de ve dördüncü noktaya ait analiz sonuçları ise Şekil 5.29'da verilmiştir. Bu sonuçlar

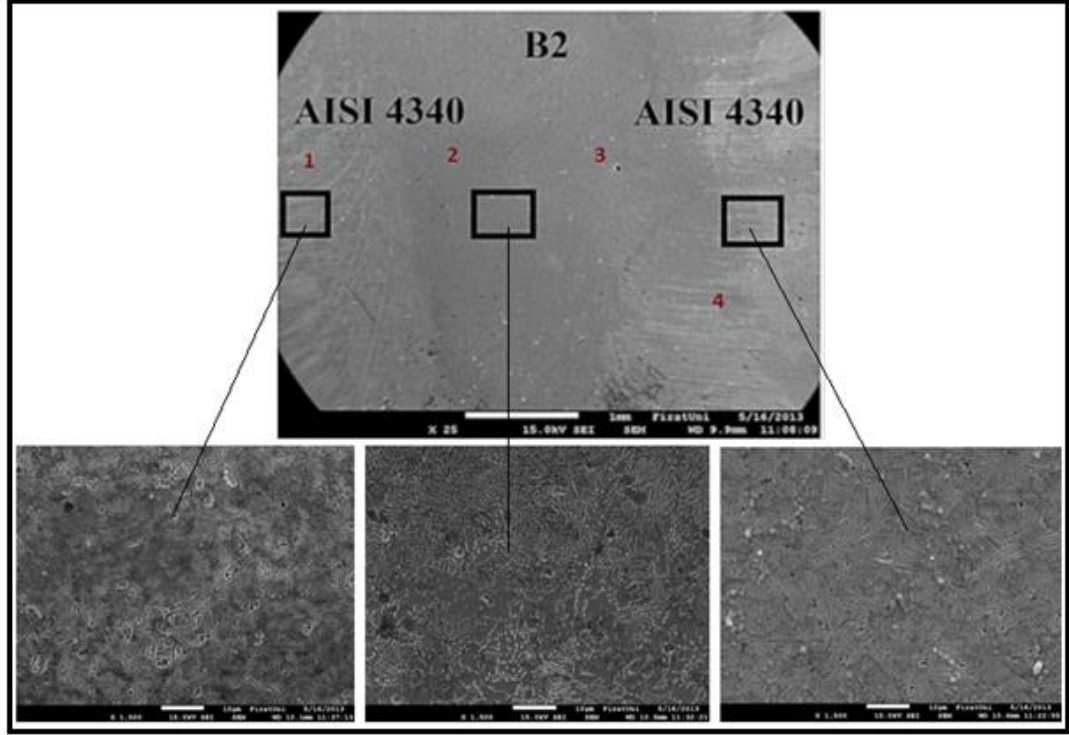
incelendiğinde dört farklı nokta da Fe ve C oranlarının yüksek çıktığı, 1 ve 2 noktalarında ise Ni elementinin yüksek çıktığı görülmüştür. X-Ray analizinde Cr_7C_3 ve FeNi bileşiklerinin tespiti bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 5.30. B1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

700 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği B1 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.30'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, Cr_7C_3 ve FeNi bileşikleri tespit edilmiştir.

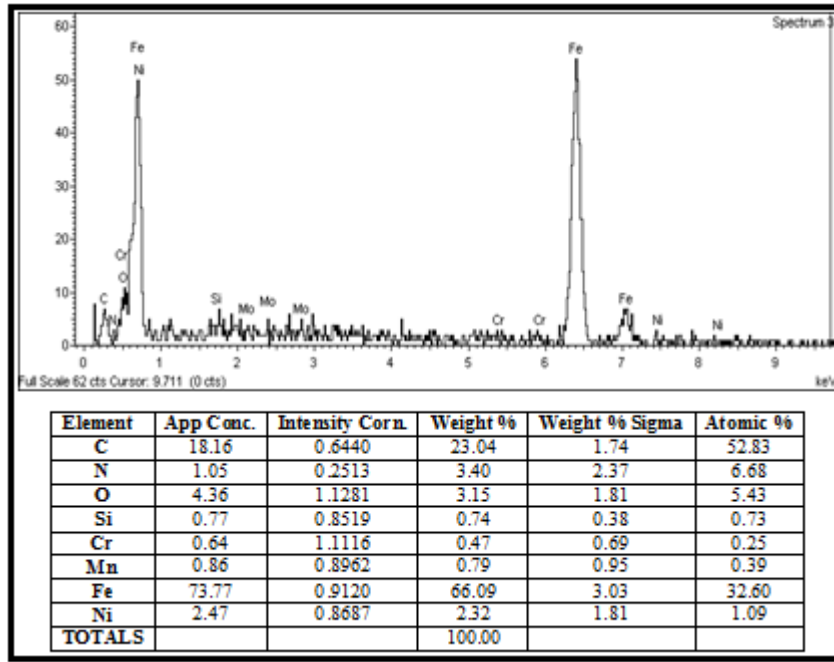
5.2.2.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B2 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



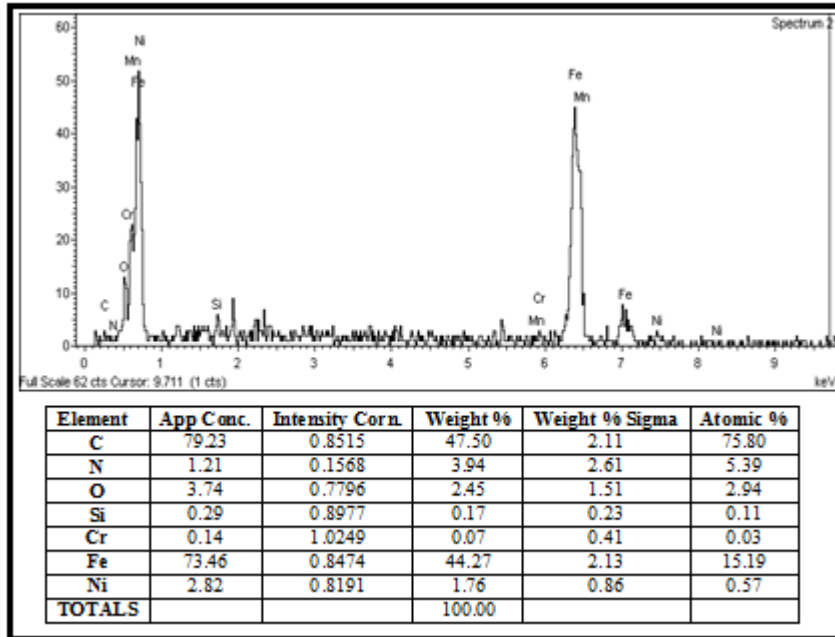
Şekil 5.31. B2 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.31'de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deforme olmuş bölgelerden (KDUB) fotoğraflar alınmıştır.

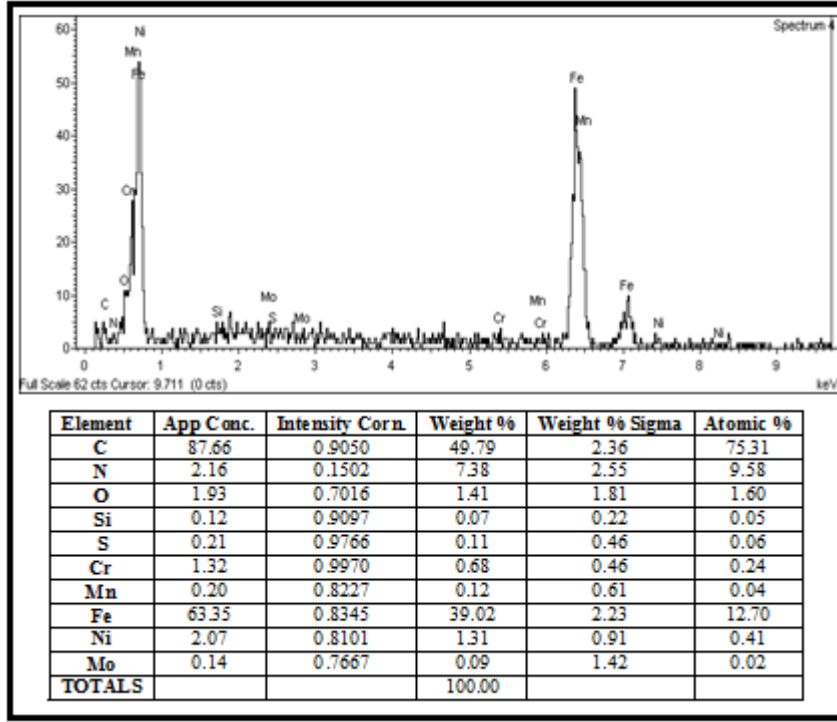
1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde çatlak, boşluk ve bağlantısız bölge görülmemiştir. Bağlantı bölgesinde oldukça geniş bir aşırı deformasyon bölgesine rastlanmıştır. KDUB'de basıncın ve sürtünmenin etkisiyle tanelerin bağlantı doğrultusuna paralel olarak yönlendiği ve bu bölgelerin yanındaki deformasyona uğramamış bölgede orijinal içyapının korunduğu tespit edilmiştir.



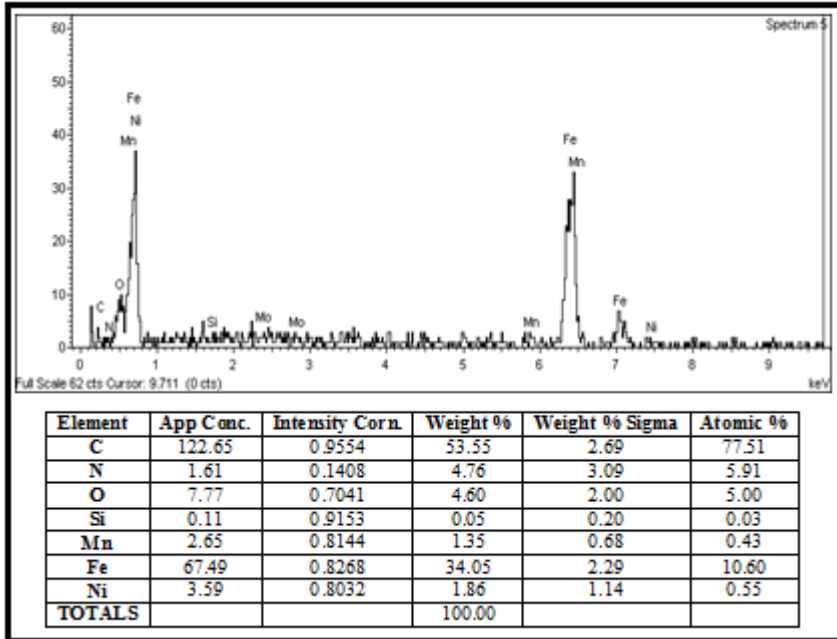
Şekil 5.32. B2 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.33. B2 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi



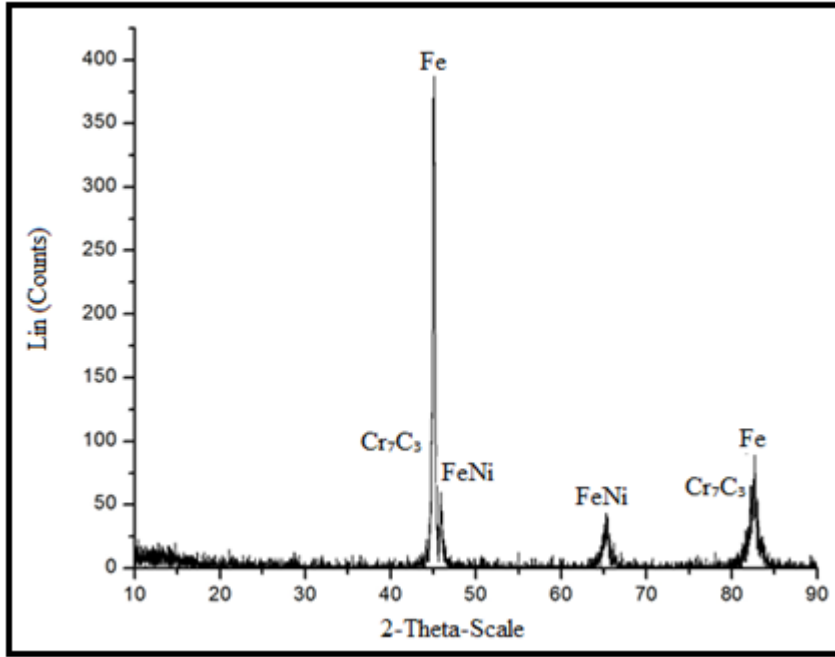
Şekil 5.34. B2 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.35. B2 no'lu numunenin 4 noktasından alınan EDS analizi

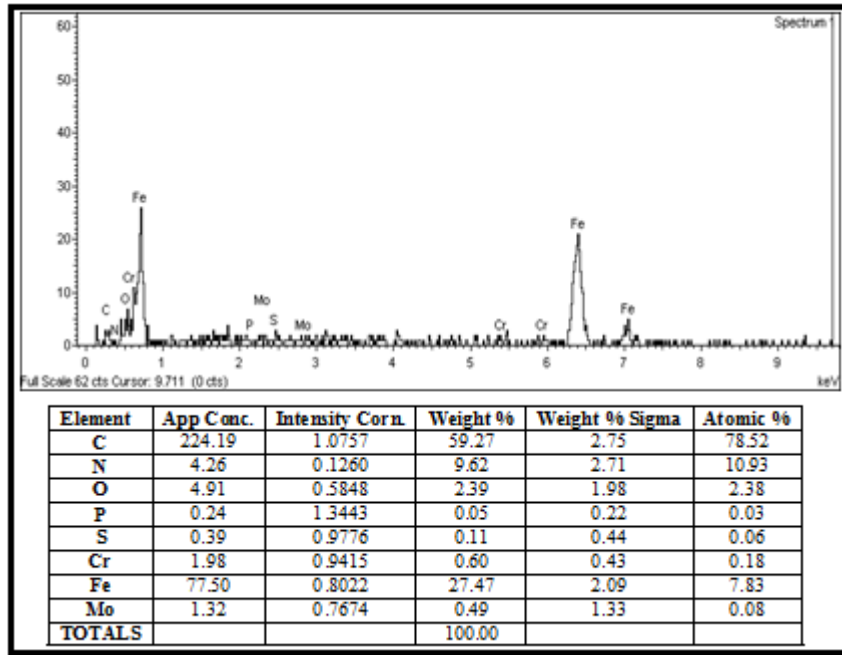
1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen B2 numunesinde ikisi deformasyona uğramış bölge ikisi de kısmen deformasyona uğramış bölge olmak üzere dört farklı

noktada EDS analizi yapılmıştır. Birinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.32’de, ikinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.33’de, üçüncü noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.34’de ve dördüncü noktaya ait analiz sonuçları ise Şekil 5.35’de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde 1, 2 ve 3. noktalarda Fe, C ve Ni elementlerinin oranlarının yüksek çıktığı görülmüştür. X-Ray analizinde de Cr_7C_3 ve FeNi bileşiklerinin oluştuğunun görülmesi bu sonucu desteklemiştir. 4. Noktada ise Fe, C ve Ni elementlerine ilaveten Mn elementinin de yüksek çıktığı görülmüştür.

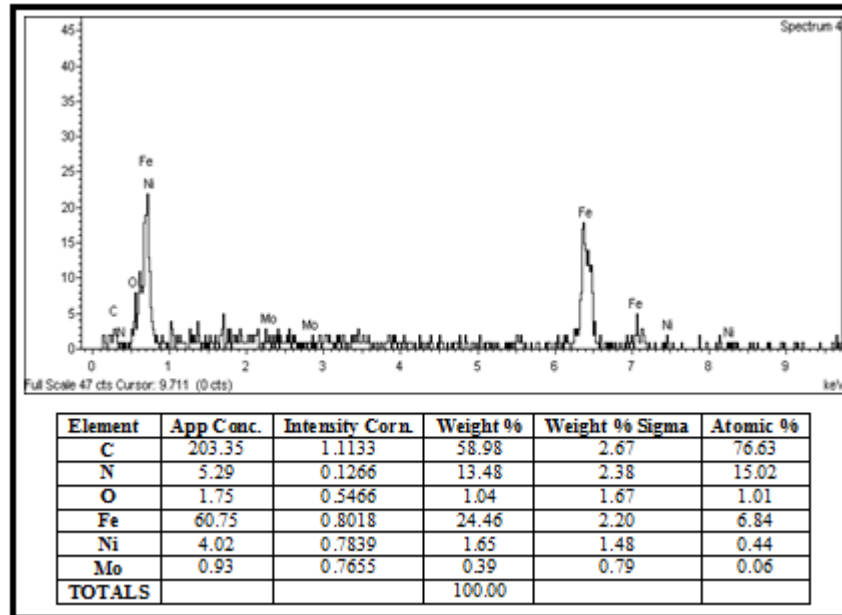


Şekil 5.36. B2 no’lu numunenin X-Işını analiz grafiği

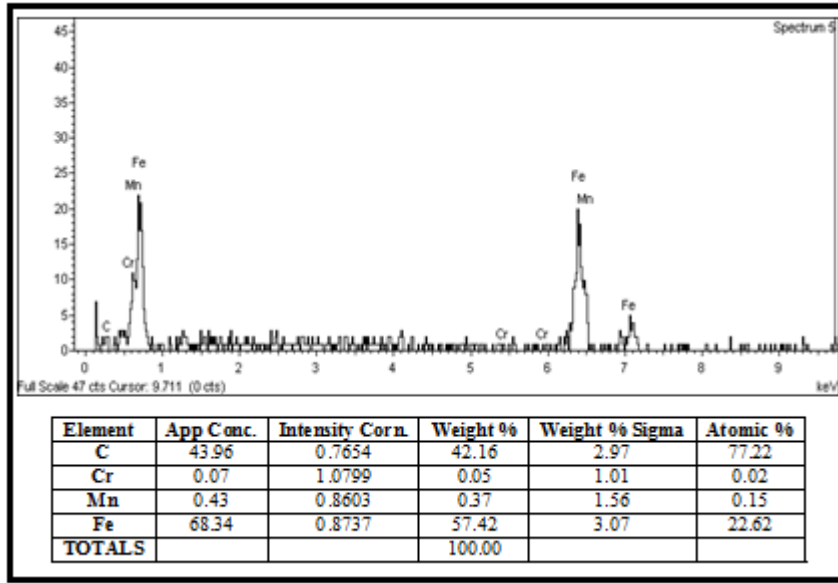
1000 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği B2 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.36’da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, B2 numunesinde B1 numunesinden daha fazla miktarda Cr_7C_3 ve FeNi bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir.



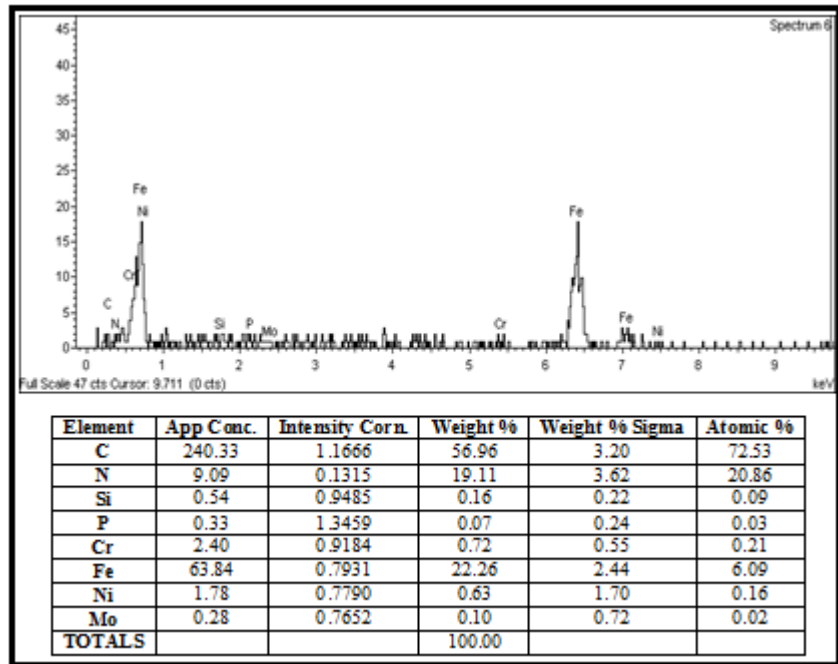
Şekil 5.38. B3 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.39. B3 no'lu numunenin 2 noktasından alınan EDS analizi



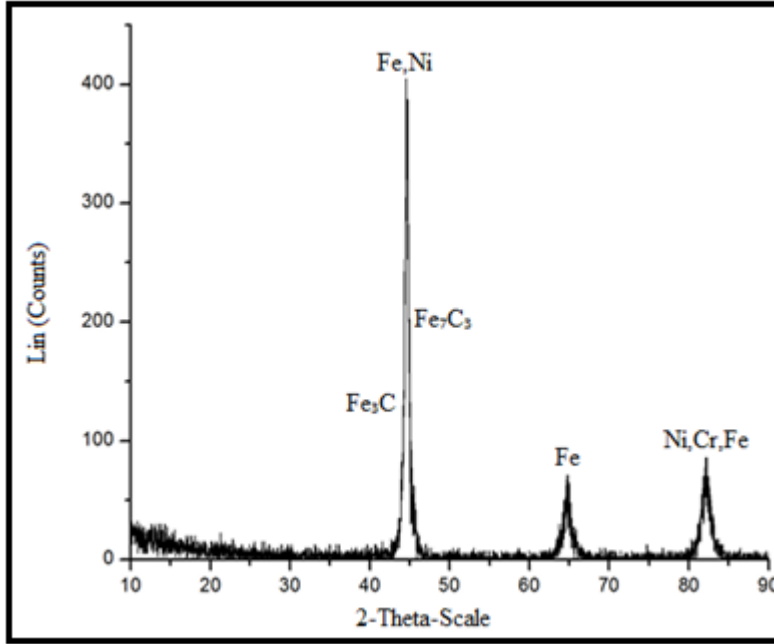
Şekil 5.40. B3 no'lu numunenin 3 noktasından alınan EDS analizi



Şekil 5.41. B3 no'lu numunenin 4 noktasından alınan EDS analizi

1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen B3 numunesinde ADB ve DB' den birer tane KDUB' den ise iki tane olmak üzere dört farklı noktadan EDS analizi yapılmıştır. Birinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.38'de, ikinci noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.39'da, üçüncü noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.40'da ve dördüncü noktaya ait analiz sonuçları ise Şekil 5.41'de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde 1. Noktada Fe ve C; 2. noktada

Fe, C ve Ni; 3. noktada Fe ve C ve 4. noktada ise Fe, C ve N miktarları yüksek çıkmıştır. X-Ray analizinde de Fe_3C ve Fe_7C_3 fazlarının tespit edilmesi, bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 5.42. B3 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

1300 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği B3 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.42'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, Fe_3C ve Fe_7C_3 bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir.

700-1000-1300 dev/dk ile sürtünme kaynağının yapıldığı AISI 4340/ AISI 4340 numunelerinin mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde her üç numunede de birleşme arayüzeyinde çatlağa, boşluğa ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır. Numunelerde, artan devir sayısına paralel olarak ısı ve basınç dağılımının daha homojen olduğu görülmüş, dolayısıyla devir sayısı arttıkça bağlantı kalitesinin de arttığı sonucuna varılmıştır.

B grubu kaynaklı birleştirmelerde aynı malzeme gurubu kullanıldığından birleşme arayüzeyinin her iki tarafında da aynı yapılar ortaya çıkmıştır.

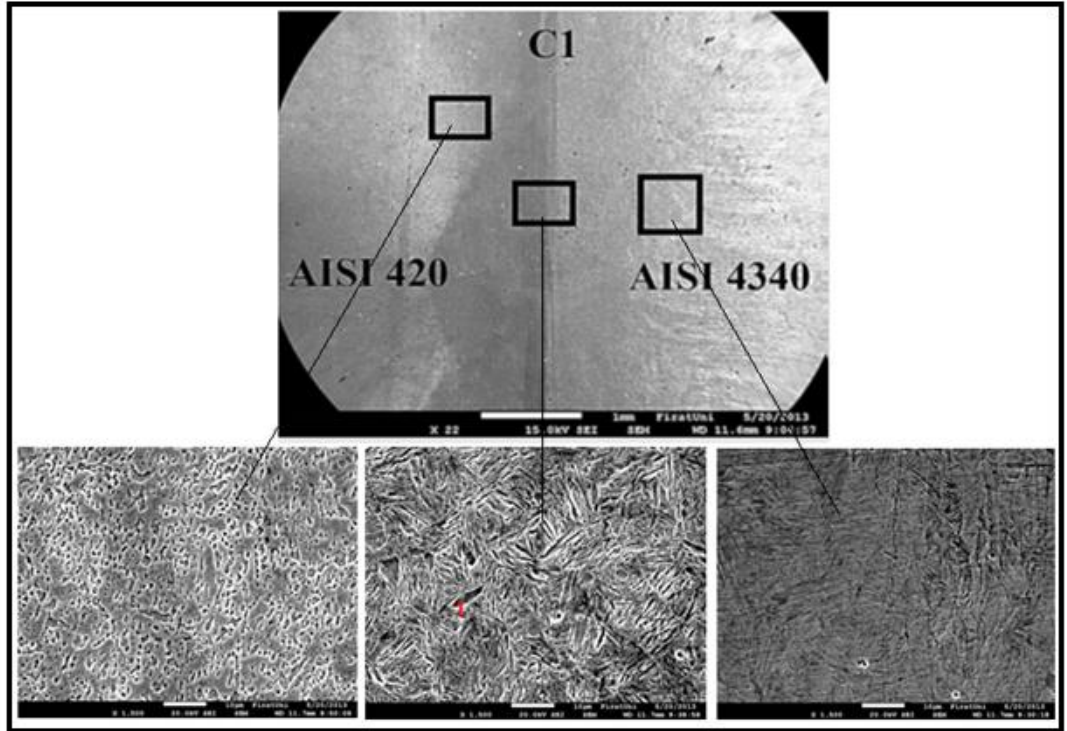
B grubu numunelerde de A grubunda olduğu gibi artan devir sayısı ile birlikte aşırı deformasyon bölgesinin genişlediği görülmüştür. Artan devir sayısı ile birlikte malzemenin aynı sürede daha fazla sürtünmesine ve ısı girdisinin artmasına bağlanabilir. Kısmen deformasyona uğramış bölgede devir sayısı ile beraber daralmıştır.

Her üç numunede de kısmen deformasyona uğramış bölgenin bitişindeki deformasyona uğramamış bölgede yapıların orijinal içyapıdan oluştuğu görülmüştür.

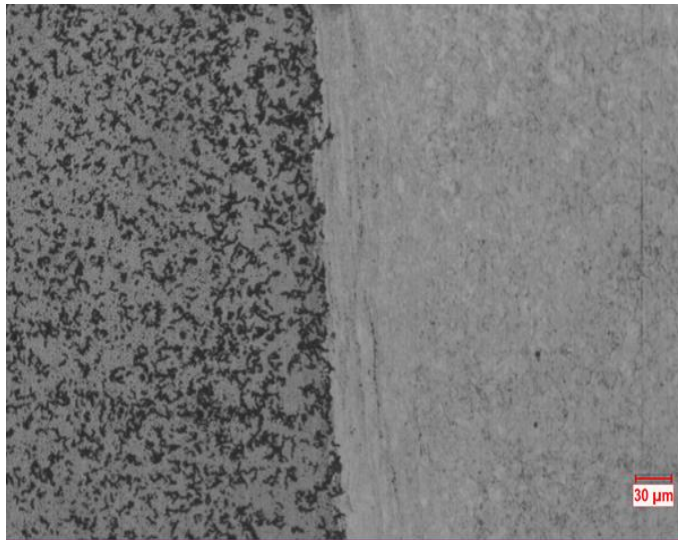
SEM mikroskopi incelemeleri, EDS analizi ve X-Ray analizleri incelemelerinde ITAB'da Fe_3C , Fe_7C_3 , Cr_7C_3 karbürlerinin oluştuğu belirlenmiştir.

5.2.3. AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftlerinin (C Grubu) SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri

5.2.3.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C1 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



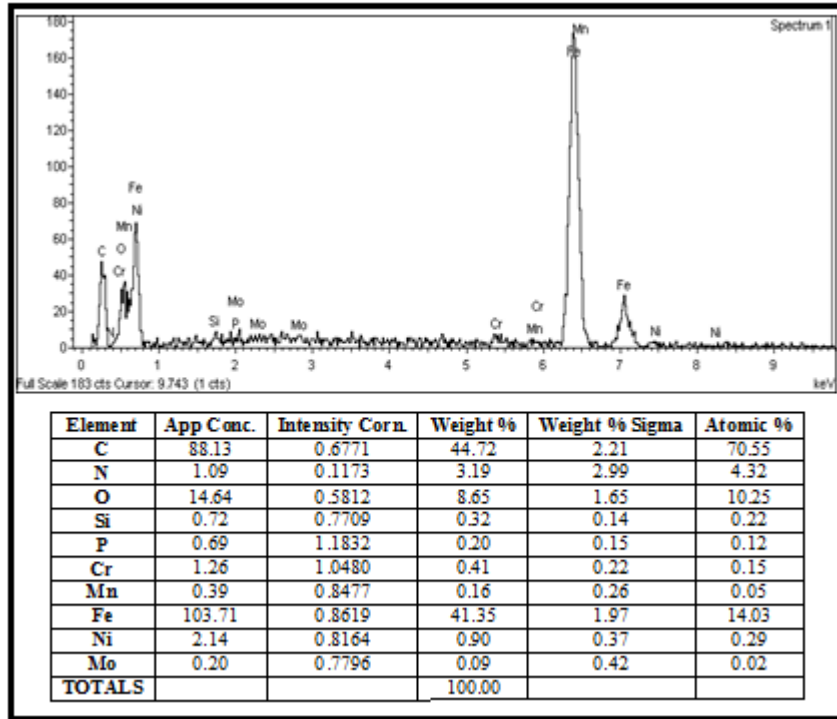
Şekil 5.43. C1 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri



Şekil 5.44. C1 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü

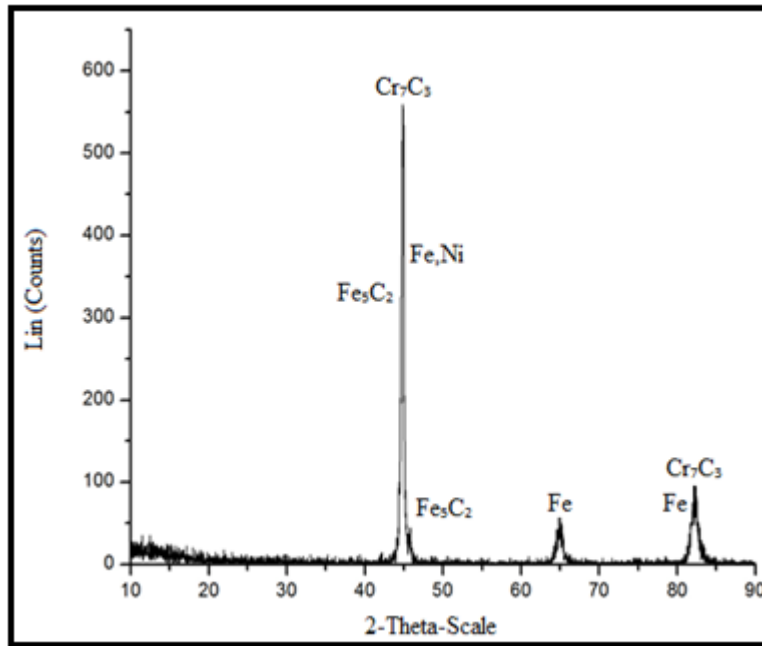
700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.43'de ve optik fotoğrafı ise Şekil 5.44'de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deforme olmuş bölgelerden (KDUB) fotoğraflar alınmıştır.

700 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM ve optik fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde çatlağa ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır. Bağlantı bölgesinde her iki malzemenin karışımından oluşan aşırı deformasyona uğramış bir bölge ve bu bölgenin hemen yanında basıncın etkisiyle taneleri yönlenmiş bir bölge olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantının AISI 4340 tarafında aşırı deformasyon bölgesi incelenmiş ve bu bölgedeki tanelerin kaynaklı bağlantı yönüne paralel doğrultuda yönlendirilerek homojen bir şekilde yayıldığı görülmüştür. Kaynaklı bağlantının AISI 420 tarafına bakıldığında aşırı deformasyon bölgesinin homojen olmayan bir şekilde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Deformasyona uğramamış bölgede hem AISI 4340 tarafında hem de AISI 420 tarafında yapı orijinal halini korumaktadır.



Şekil 5.45. C1 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi

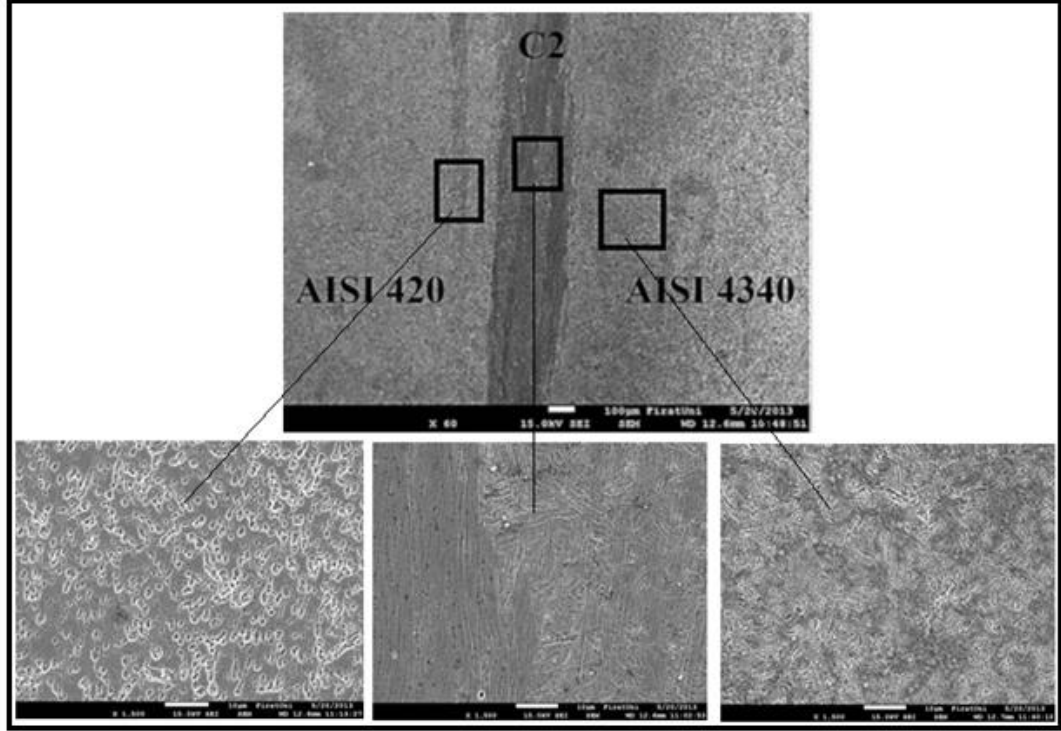
700 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen C1 numunesinde ADB’de bir noktadan EDS analizi yapılmıştır. Bu noktaya ait analiz sonuçları Şekil 5.45’de verilmiştir. Bu sonuç incelendiğinde, bağlantı bölgesinde AISI 420 ve AISI 4340 çeliklerinin her ikisinde de mevcut olan elementler olduğu tespit edilmiştir. AISI 4340 çeliğinde bulunup AISI 420 çeliğinde bulunmayan Ni ve Mo elementlerinin bağlantı bölgesine difüze olduğu görülmüştür. Sürtünmeden dolayı oluşan ısının ve basıncın etkisiyle Ni ve Mo elementlerinin, difüzyonun mekanizması gereği, arakesite doğru difüze olması beklenen bir olaydır.



Şekil 5.46. C1 no’lu numunenin X-Işını analiz grafiği

700 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği C1 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.46’da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, Cr_7C_3 ve Fe_5C_2 fazları tespit edilmiştir.

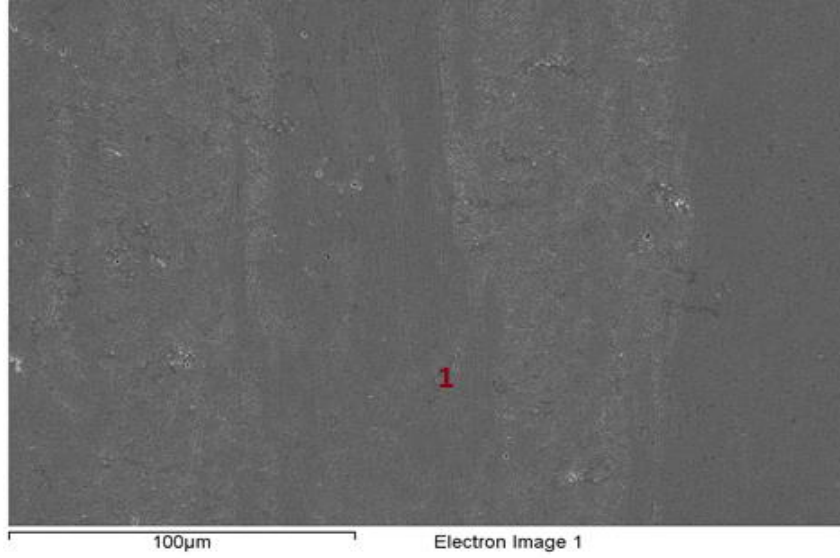
5.2.3.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C2 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



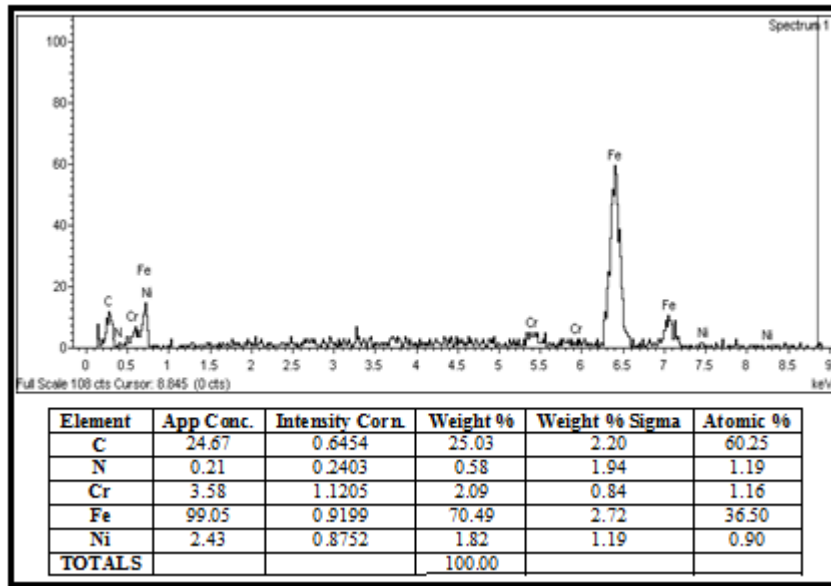
Şekil 5.47. C2 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait ara yüzey SEM fotoğrafı Şekil 5.47'de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deforme olmuş bölgelerden (KDUB) fotoğraflar alınmıştır.

1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantının arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde boşluksuz, çatlaksız fakat homojen dağılım göstermeyen bir arayüzeye rastlanmıştır. Alınan SEM görüntülerinden arayüzeyde yan yana bulunan değişik bir yapı dağılımına rastlanmıştır. AISI 4340 tarafında deformasyona uğramış bölgede uygulanan basıncın etkisiyle kısmi olarak taneler uzamıştır. AISI 420 tarafında deformasyon bölgesinde tanelerin büyük bir kısmı eş eksenli halini korumuştur. Deformasyona uğramamış bölgelerde ise yapılar orijinal halini korumuştur.

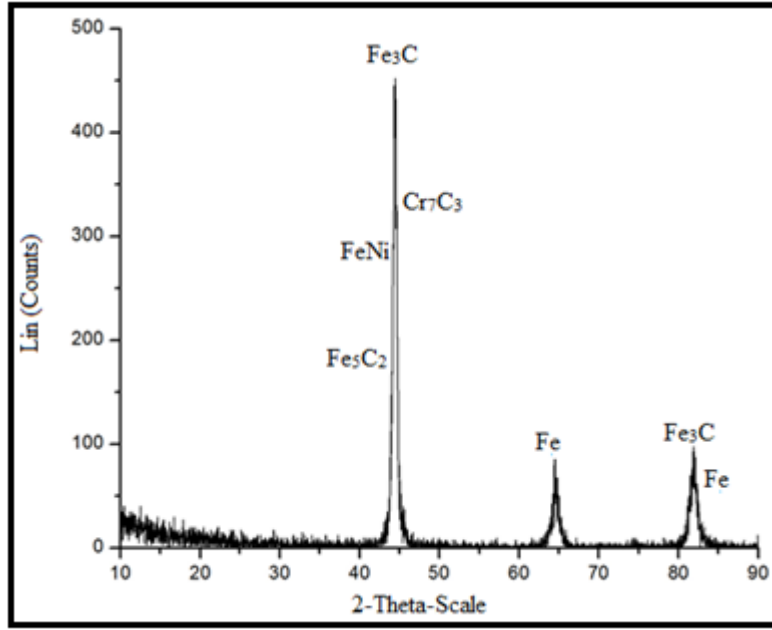


Şekil 5.48. C2 no'lu numunede EDS analizi yapılan nokta



Şekil 5.49. C2 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi

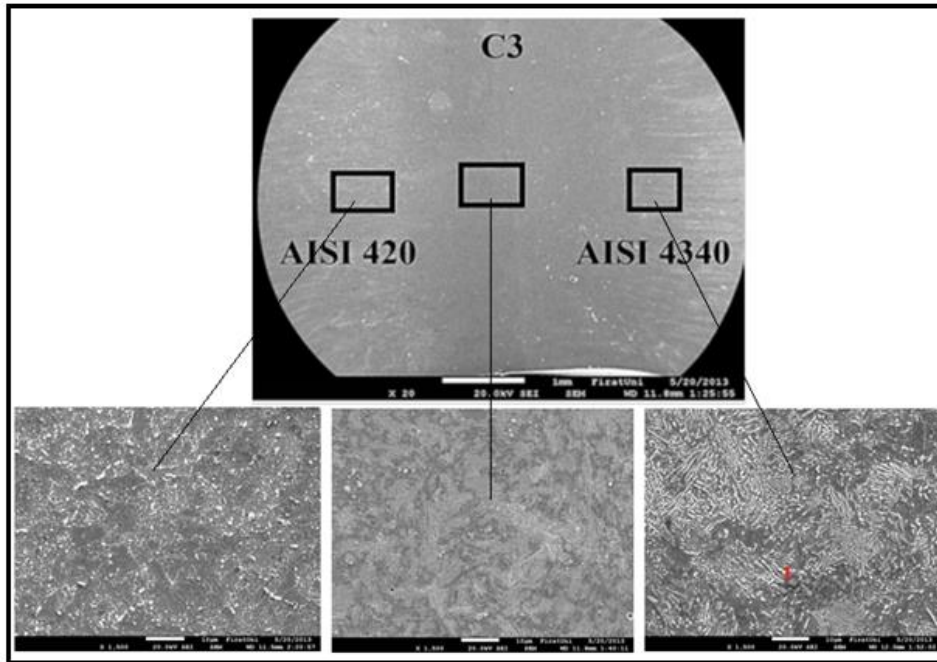
1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen C2 numunesinde ADB' de bir noktadan EDS analizi yapılmıştır (Şekil 5.48). Bu noktaya ait analiz sonucu Şekil 5.49'da verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, C1 numunesinde olduğu gibi bağlantı bölgesinde AISI 420 ve AISI 4340 çeliklerinin her ikisinde de mevcut olan elementler olduğu tespit edilmiştir. AISI 4340 çeliğinde bulunan Ni'in konsantrasyon farkını gidermek için AISI 420 çeliğinde bulunmayan Ni elementinin bağlantı bölgesine difüze olduğu görülmüştür.



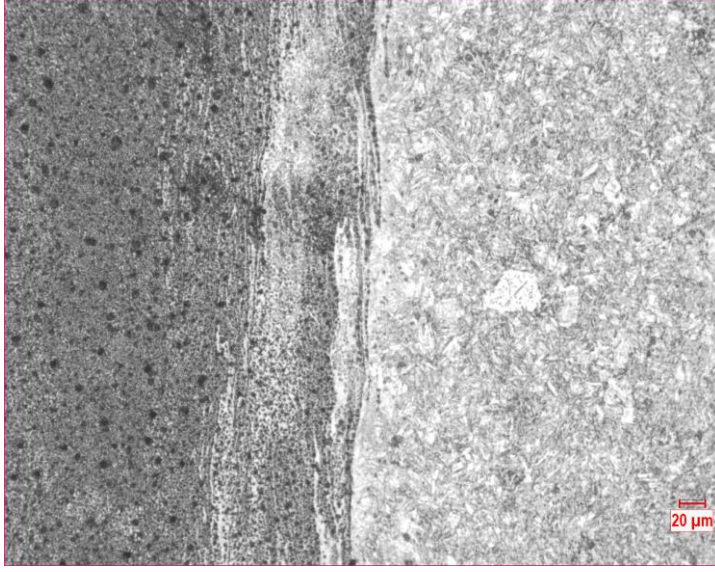
Şekil 5.50. C2 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

1000 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği C2 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.50'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, Fe_3C , Fe_5C_2 , Cr_7C_3 ve FeNi bileşiklerinin olduğu tespit edilmiştir.

5.2.3.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C3 No'lu Numunenin SEM, EDS ve X-Ray Değerlendirmeleri



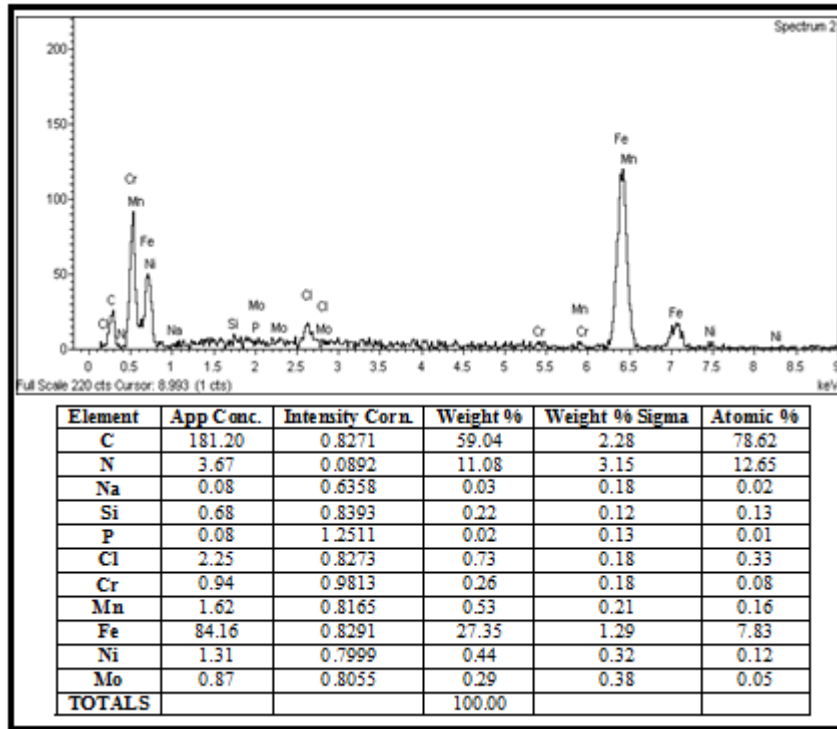
Şekil 5.51. C3 no'lu numunenin arayüzey SEM görüntüleri



Şekil 5.52. C3 no'lu numunenin kaynak arayüzeyinden alınan optik görüntüsü

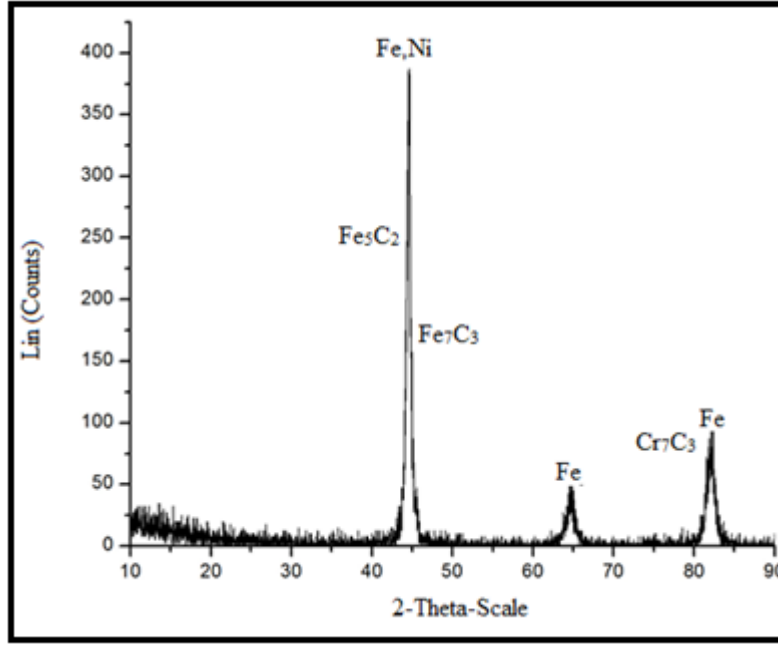
1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresinin kullanıldığı kaynaklı bağlantılara ait ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.51'de ve optik fotoğrafı ise Şekil 5.52'de verilmiştir. Numunenin ilk olarak genel SEM fotoğrafı alınmış, daha sonra ise aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deforme olmuş bölgelerden (KDUB) fotoğraflar alınmıştır.

1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirme işleminin gerçekleştirildiği kaynaklı bağlantıda birleşme arayüzeyi incelenmiş ve homojen dağılım göstermeyen bir arayüzeye rastlanmıştır. Deformasyon bölgesi ve kısmen deformasyona uğramış bölge diğer numunelere göre daha geniş olup bu durum artan devir sayısına bağlanmıştır.



Şekil 5.53. C3 no'lu numunenin 1 noktasından alınan EDS analizi

1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen C3 numunesinde kısmen deformasyona uğramış bölgede bir noktadan EDS analizi yapılmıştır. Bu noktaya ait analiz sonucu Şekil 5.53'de verilmiştir. Bu sonuç incelendiğinde, C1 ve C2 numunelerinde olduğu gibi her iki malzemeden de element geçişleri olmuştur ve aynı zamanda AISI 420 ve AISI 4340 çeliklerinde bulunan elementlerin dışında Na ve Cl elementlerine rastlanmıştır. Bu elementlerin ise dağlama esnasında kullanılan asitlerden kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 5.54. C3 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

1300 dev/dk devir sayısı ile sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirildiği C3 numunesine ait XRD grafiği Şekil 5.54'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, Fe₇C₃, Fe₅C₂, ve Cr₇C₃ bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir.

700-1000-1300 dev/dk ile sürtünme kaynağının yapıldığı AISI 420/ AISI 4340 numunelerinin mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde her üç numunede de birleşme arayüzeyinde çatlağa, boşluğa ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır.

Bu grupta farklı devir sayıları kullanılarak farklı malzeme çiftleri kaynatılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerde farklı malzeme grubu kullanıldığından birleşme arayüzeyinin her iki tarafında farklı mikroyapıların ortaya çıktığı görülmektedir. A ve B grubu numunelerde olduğu gibi artan devir sayısına bağlı olarak aşırı deformasyon bölgesinin genişlediği görülmektedir.

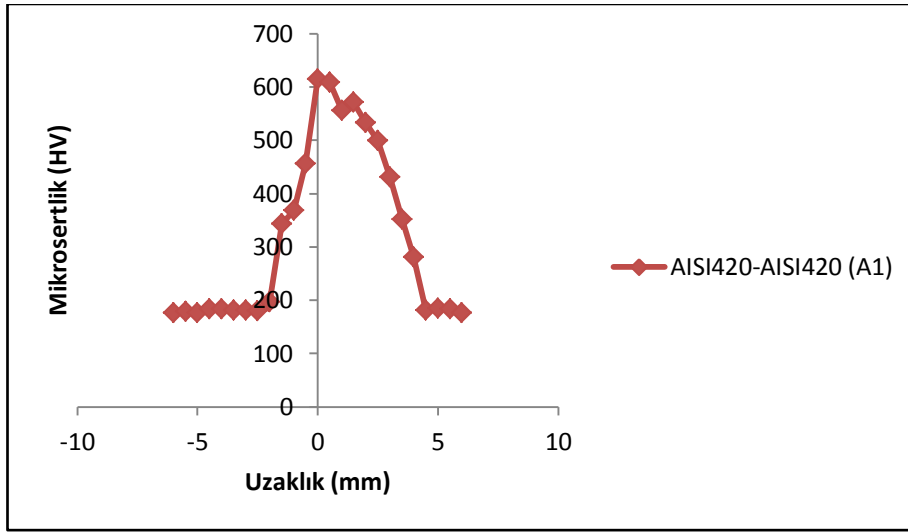
Her üç numunede de kısmen deformasyona uğramış bölgenin bitişiğindeki deformasyona uğramamış bölgede yapıların orijinal içyapıdan oluştuğu görülmüştür.

SEM mikroskopi incelemeleri, EDS analizi ve X-Ray analizleri incelemeleri sonunda ITAB'da karbürlerin oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak arayüzeylerinden alınan EDS analizi sonuçlarına göre kaynak arayüzeyine her iki malzemeden de geçişler olmuştur. Bu element geçişlerinin C3 numunesinde daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum devir sayısının artması ile birlikte sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla daha fazla elementin difüze olmasına bağlanabilir.

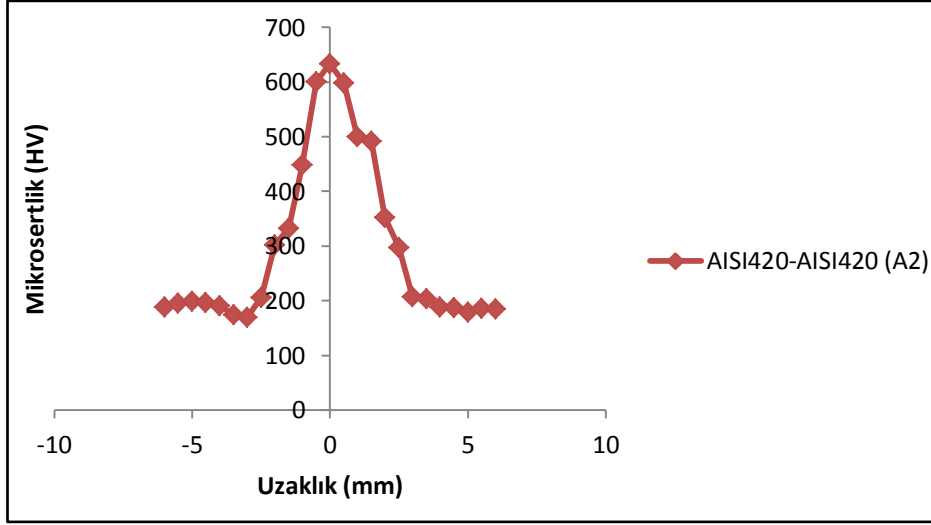
5.3. Mikrosertlik Sonuçları

AISI 420 ve AISI 4340 malzemelerine kaynak işlemi gerçekleştirilmeden önce mikrosertlik analizi yapılmıştır. Bunun için malzemelerin 8 farklı noktasından ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır. Bu analizin sonucunda AISI 420 çeliğinin ortalama sertlik değeri 186 Vickers, AISI 4340 çeliğinin ortalama sertlik değerinin ise 201 Vickers olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin farklı devir sayılarındaki sertlik değişimlerini gözlemlemek amacı ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu sertlik değerleri incelendiğinde tüm numunelerde kaynak bölgesine yaklaştıkça sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiş ve kaynak bölgesinden uzaklaştıkça ana malzemenin sertlik değerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

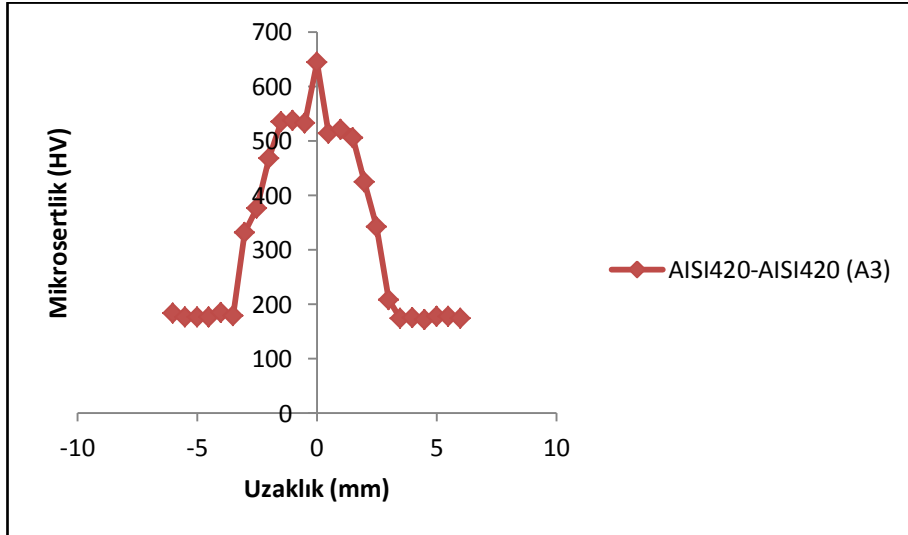
5.3.1. AISI 420/ AISI420 Çelik Çiftinin Mikrosertlik Sonuçları



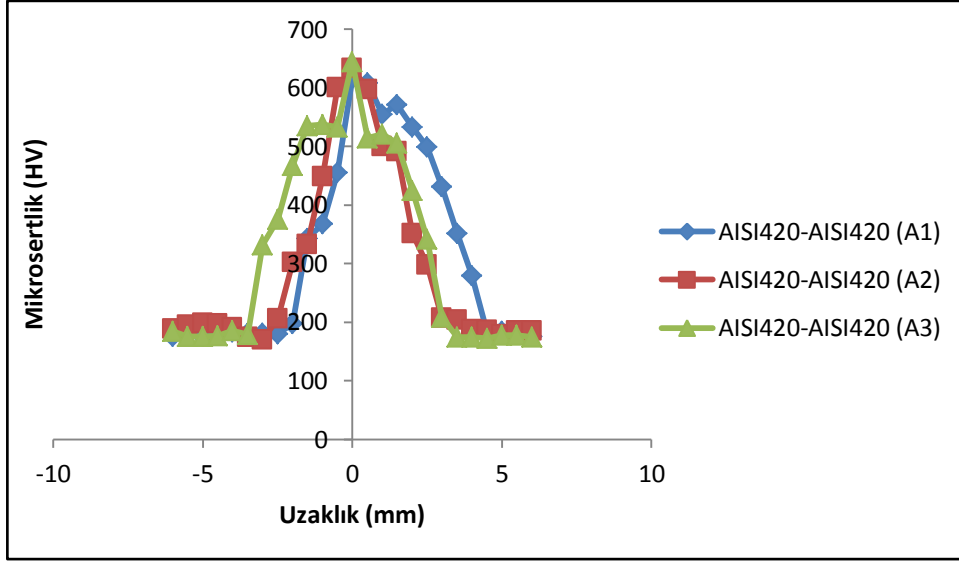
Şekil 5.55. A1 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.56. A2 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.57. A3 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.58. A1, A2 ve A3 no'lu numunelerin kaynak bölgelerindeki mikrosertlik dağılımları

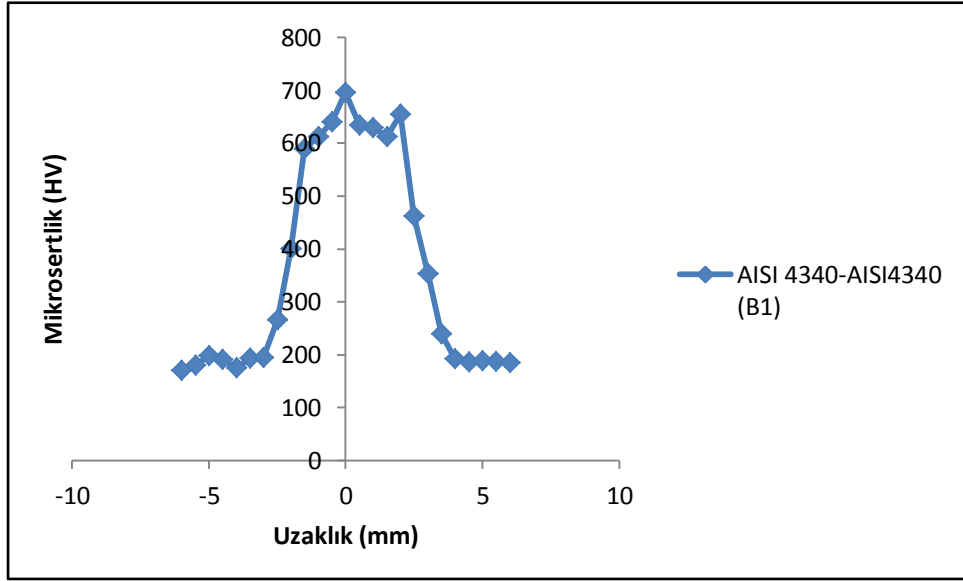
Farklı devir sayılarında birleştirilen A1, A2 ve A3 numunelerine ait mikrosertlik grafikleri Şekil 5.55-5.58'de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik dağılımları incelendiğinde her üç numunede de benzer bir dağılımın olduğu görülmektedir. AISI 420 çeliğinin ortalama sertlik değerinin 186 vickers olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Farklı devirlerde birleştirilen bu numune gruplarına bakıldığında kaynak ara yüzeyinde sertlik değerleri maximum olduğu görülmüştür. Kaynak arayüzeyinden esas malzemeye yaklaştıkça sertlik değerleri düşmüş ve esas malzemenin sertlik değerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen numunenin mikrosertlik grafiğine bakıldığında maximum sertlik değeri kaynak arayüzeyinde 615 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.55).

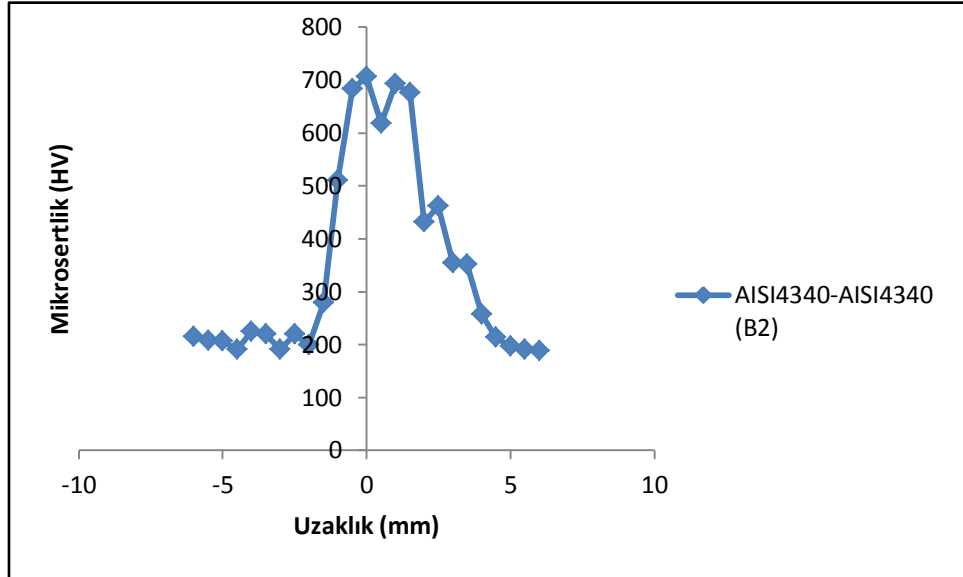
1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen numunenin mikrosertlik grafiğine bakıldığında maximum sertlik değeri kaynak arayüzeyinde 634 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.56).

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen numunenin mikrosertlik grafiğine bakıldığında maximum sertlik değeri kaynak arayüzeyinde 645 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.57).

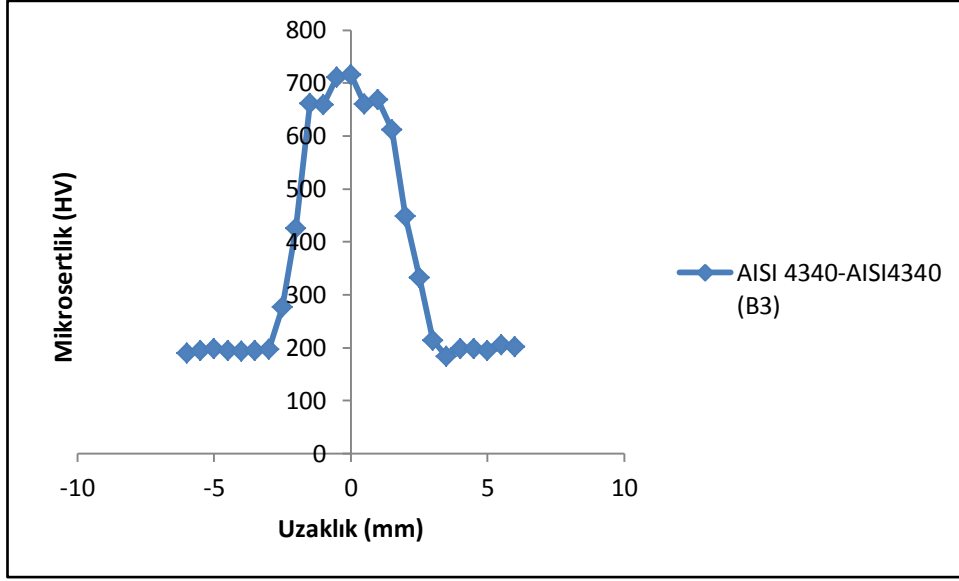
5.3.2. AISI 4340/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Mikrosertlik Sonuçları



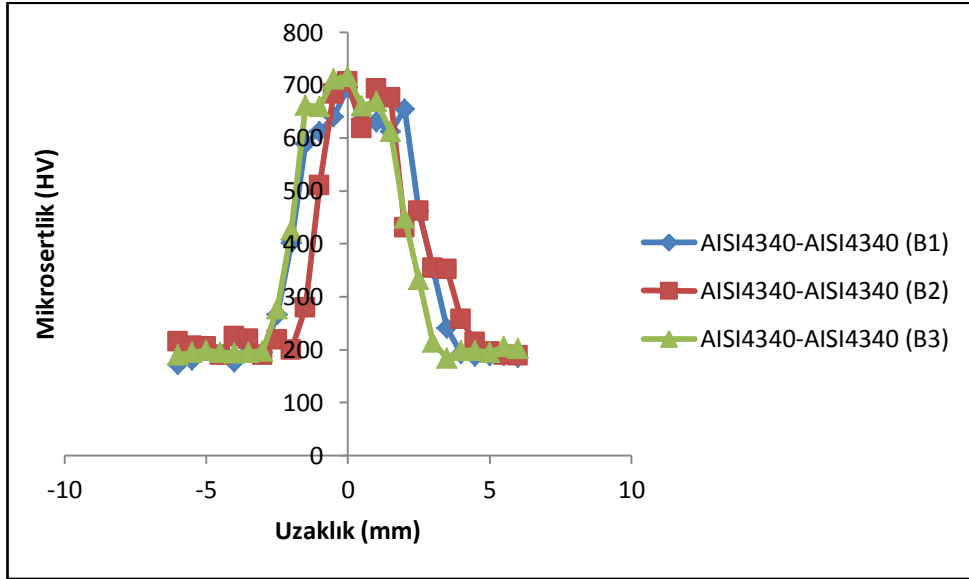
Şekil 5.59. B1 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.60. B2 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.61. B3 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.62. B1, B2 ve B3 no'lu numunelerin kaynak bölgelerindeki mikrosertlik dağılımları

Farklı devir sayılarında birleştirilen B1, B2 ve B3 numunelerine ait mikrosertlik grafikleri Şekil 5.59-5.62'de gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik dağılımları incelendiğinde her üç numunede de benzer bir dağılımın olduğu görülmektedir. AISI 4340 çeliğinin ortalama sertlik değerinin 201 vickers olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Farklı devirlerde birleştirilen bu numune gruplarına bakıldığında kaynak ara yüzeyinde sertlik değerleri maximum noktadır. Kaynak arayüzeyinden esas malzemeye yaklaştıkça

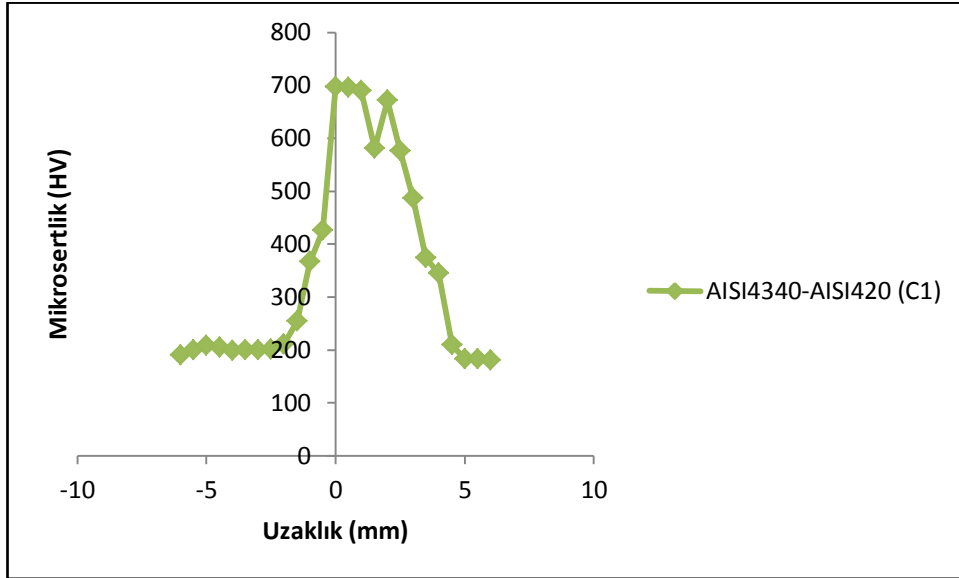
sertlik deęerleri dūřmūř ve esas malzemenin sertlik deęerine yakın sonuçlar elde edilmiřtir.

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sūrtūnme sūresi, 50 MPa sūrtūnme basıncı, 60 MPa yıęma basıncı ve 6 sn yıęma sūresi kullanılarak birleřtirilen numunenin mikrosertlik grafięine bakıldıęında maximum sertlik deęeri kaynak arayūzeyinde 696 vickers olarak ōlūlmūřtur (řekil 5.59).

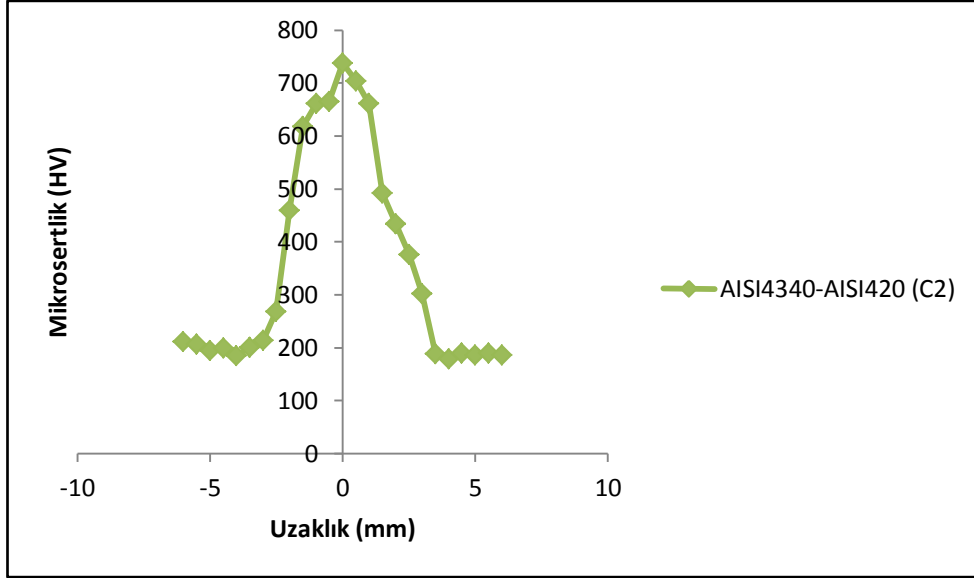
1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sūrtūnme sūresi, 50 MPa sūrtūnme basıncı, 60 MPa yıęma basıncı ve 6 sn yıęma sūresi kullanılarak birleřtirilen numunenin mikrosertlik grafięine bakıldıęında maximum sertlik deęeri kaynak arayūzeyinde 706 vickers olarak ōlūlmūřtur (řekil 5.60).

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sūrtūnme sūresi, 50 MPa sūrtūnme basıncı, 60 MPa yıęma basıncı ve 6 sn yıęma sūresi kullanılarak birleřtirilen numunenin mikrosertlik grafięine bakıldıęında maximum sertlik deęeri kaynak arayūzeyinde 716 vickers olarak ōlūlmūřtur (řekil 5.61).

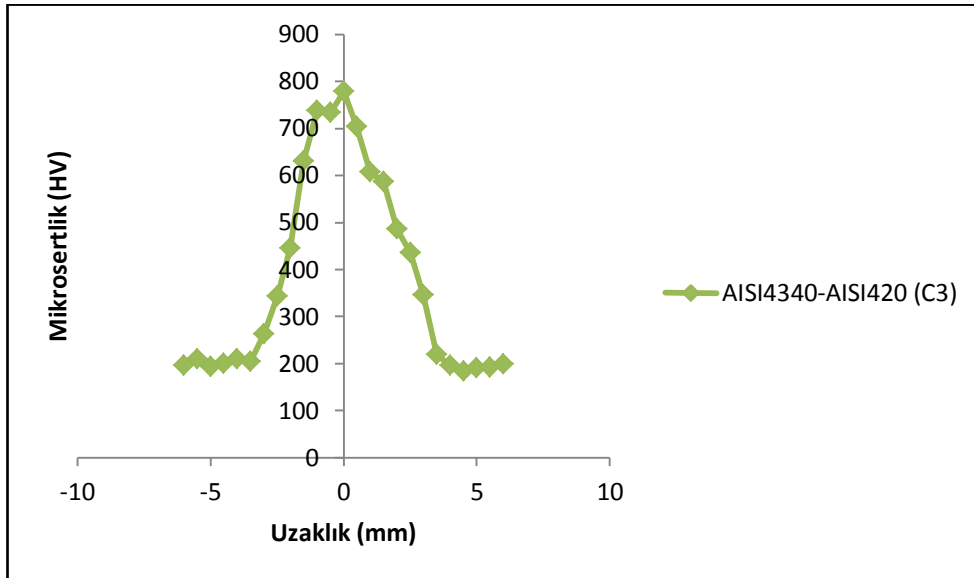
5.3.3. AISI 420/ AISI 4340 elik çiftinin Mikrosertlik Sonuçları



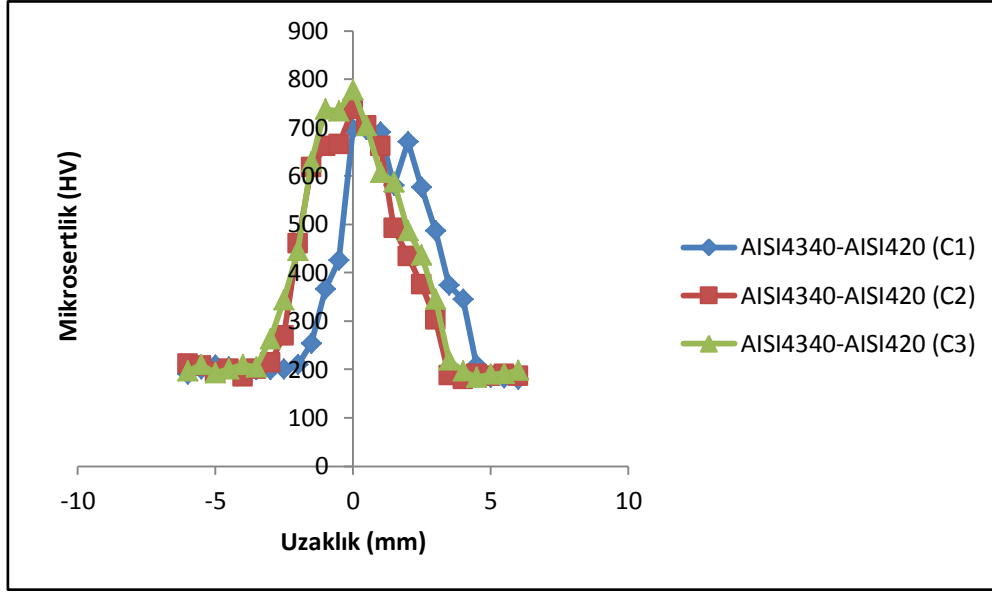
şekil 5.63. C1 no'lu numunenin kaynak bōlgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.64. C2 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.65. C3 no'lu numunenin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımı



Şekil 5.66. C1, C2 ve C3 no'lu numunelerin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

Farklı devir sayılarında birleştirilen C1, C2 ve C3 numunelerine ait mikrosertlik grafikleri Şekil 5.63-5.66'da gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik dağılımları incelendiğinde her üç numunede de benzer bir dağılımın olduğu görülmektedir. AISI 420 çeliğini ortalama sertlik değeri 186 vickers AISI 4340 çeliğinin ortalama sertlik değerinin 201 vickers olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Farklı devirlerde birleştirilen bu numunene gruplarına bakıldığında kaynak ara yüzeyinde sertlik değerleri maximum noktadır. Kaynak arayüzeyinden esas malzemeye yaklaştıkça her iki malzemedeki sertlik değerleri düşmüş ve esas malzemenin sertlik değerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen numunenin mikrosertlik grafiğine bakıldığında maximum sertlik değeri kaynak arayüzeyinde 697 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.63).

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen numunenin mikrosertlik grafiğine bakıldığında maximum sertlik değeri kaynak arayüzeyinde 738 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.64).

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen numunenin mikrosertlik grafiğine bakıldığında maximum sertlik değeri kaynak arayüzeyinde 778 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.65).

Her üç gruptaki kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümleri incelendiğinde dokuz numunede de benzer bir sertlik dağılımı görülmüştür. Bütün numunelerde kaynak arayüzeyinde maximum sertlik görülmüş, kaynak arayüzeyinden esas malzemelere yaklaşıldıkça sertlik değerleri düşmüş ve daha sonra esas malzemelerin ana sertlik değerine ulaştığı görülmüştür. Kaynaklı numunede bağlantının merkezi en geç soğuyan bölgedir bu nedenle bu bölgede atomik hareketlilik daha uzun süre devam ettiğinden en yüksek mikrosertlik değeri bu bölgede görülmektedir.

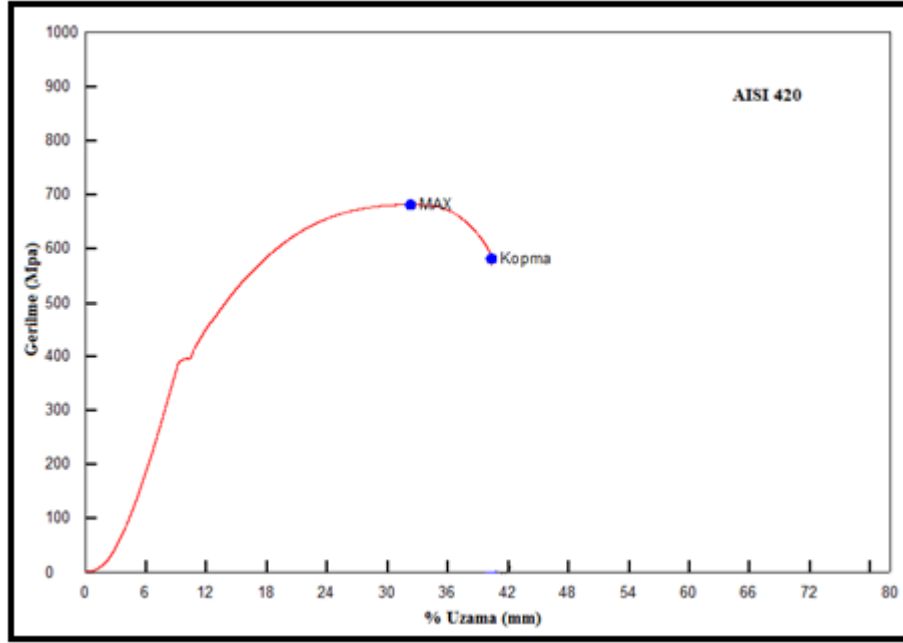
Sertlik değerindeki değişim element geçişine, karbür oluşumuna ve plastik şekil değiştirmenin etkilerine bağlanabilir. Devir sayısının artması ile birlikte birleşme arayüzeyinde daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığından element geçişinin ve bileşik oluşumunun arttığı düşünülmektedir. Plastik deformasyonun etkisiyle de malzeme de oluşan tane küçülmesi de sertlik artışının sebeplerindendir.

5.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Sürtünme kaynak işleminde kullanılan çeliklerin kaynak öncesi ve sonrası çekme dayanımlarını karşılaştırabilmek için, deneylere başlamadan önce AISI 420 ve AISI 4340 çelikleri standartlara göre hazırlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda AISI 420 çeliğinin çekme dayanımı 680,328 MPa ve AISI 4340 çeliğinin çekme dayanımı ise 658,721 MPa olarak bulunmuştur. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de, gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 5.67 ve Şekil 5.68’de verilmiştir.

Tablo 5.2. AISI 420 çeliğine ait çekme deneyi sonunda elde edilen değerler

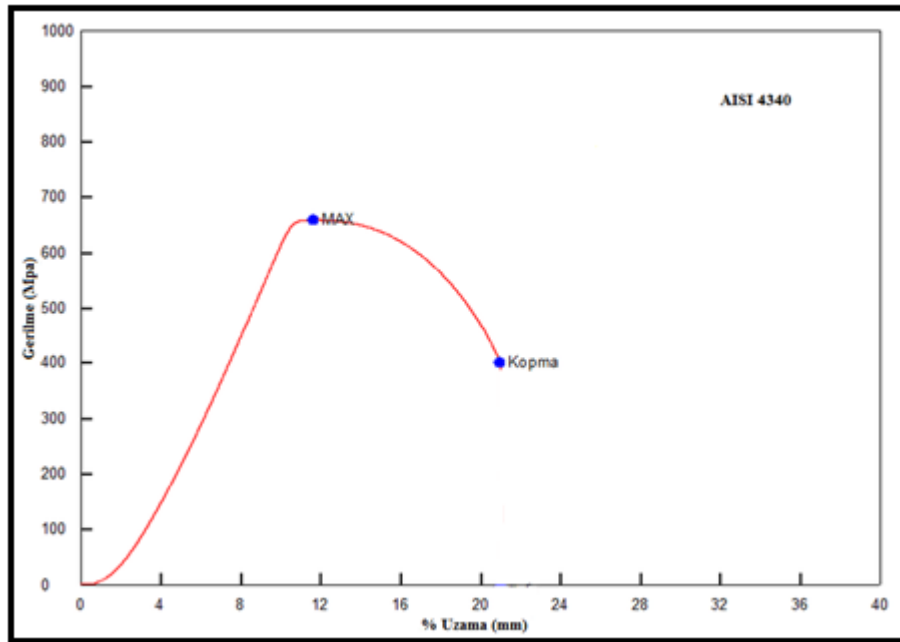
AISI 420	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	% Uzama
	-	680,328	580,734	40,36



Şekil 5.67. AISI 420 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Tablo 5.3. AISI 4340 çeliğine ait çekme deneyi sonunda elde edilen değerler

AISI 4340	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	% Uzama
	-	658,721	400,100	20,98



Şekil 5.68. AISI 4340 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmenin gerçekleştirildiği AISI 420 ve AISI 4340 çeliklerinin hangi parametrelerde birleştirildiği ve bu birleştirme işlemlerinden sonra uygulanan çekme deneyine ait sonuçlar Tablo 5.4’de gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde kaynak parametrelerine bağlı olarak çekme gerilmesi değerlerinde değişiklik olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.4. A, B ve C grubu numunelerine ait çekme deneyi sonucunda elde edilen değerler

NUMUNELER	Devir Sayısı (dev/dk)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)
A1	700	381,945	631,409	480,371	25,4
A2	1000	-	640,58	469,001	26,7
A3	1300	401,269	670,06	515,296	27,8
B1	700	-	591,1	368,72	26,7
B2	1000	-	593,485	370,914	26,6
B3	1300	-	617,05	393,961	29,41
C1	700	-	542,6	329,02	23,93
C2	1000	-	570,134	345,67	23,14
C3	1300	378,64	592,47	368,94	23,7

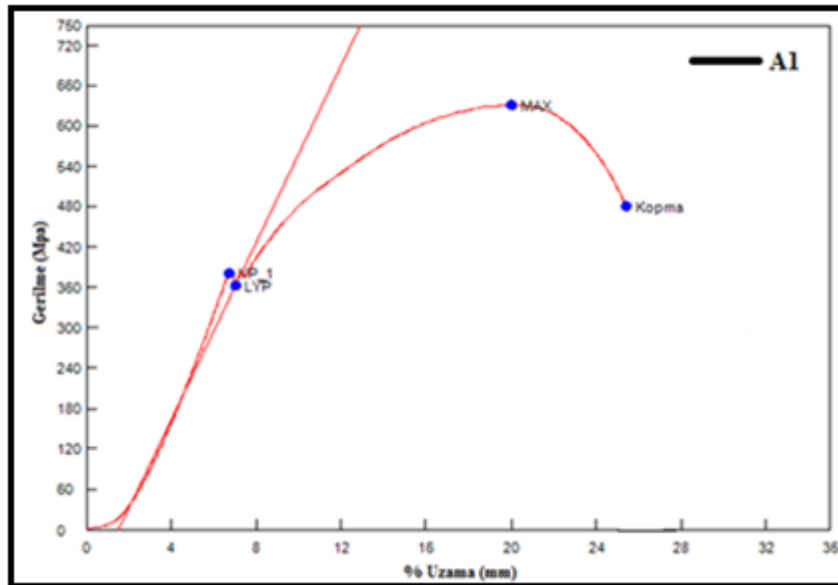
Sürtünme kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, üretim parametrelerinin bağlantıların mukavemeti üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Bu parametreler; devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Devir sayısı ve sürtünme süresi, kaynak kalitesi bakımından en etkin parametrelerdir [5]. Deneysel çalışmalar sırasında 700, 1000 ve 1300 dev/dk olmak üzere 3 farklı devir sayısı kullanılmış; sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi ve yığma basıncı parametreleri ise sabit tutulmuştur ve değişen devir sayısının numunelerin çekme deneyi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

5.4.1. AISI 420/ AISI 420 Çelik Çiftinin Çekme Deneyi Sonuçları

5.4.1.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A1 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



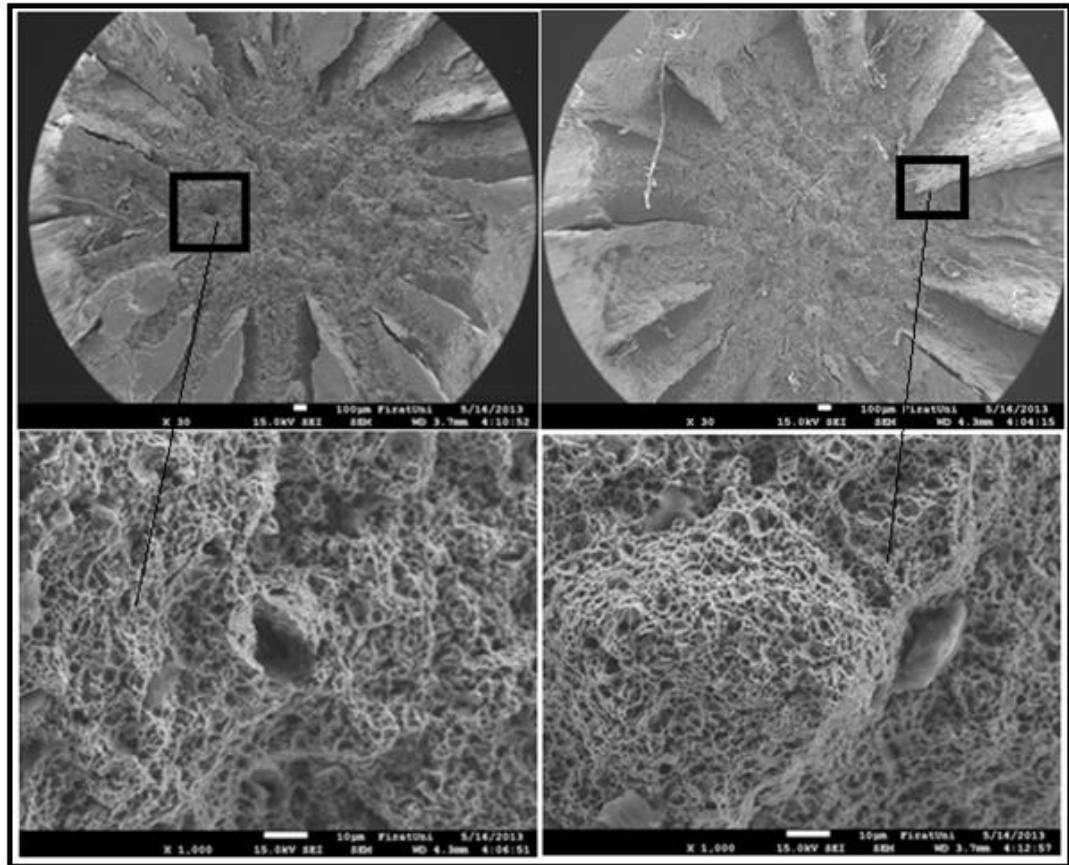
Şekil 5.69. A1 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.70. A1 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.69’da ve gerilme –şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.70’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, bu çelik çiftine ait çekme gerilmesi 631,409 MPa kopma gerilmesi 480,371 MPa ve % uzama değeri ise 25,4 olarak bulunmuştur.

A1 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 631,409 MPa’dır ve bu değer orijinal AISI 420 çeliğinin sahip olduğu 680,328 MPa değerinden düşük olduğu görülmektedir. Çekme sonrası numune kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. A1 numunesinin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımı değerinden düşük olmasının nedeni, kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşiklerdir.



Şekil 5.71. A1 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

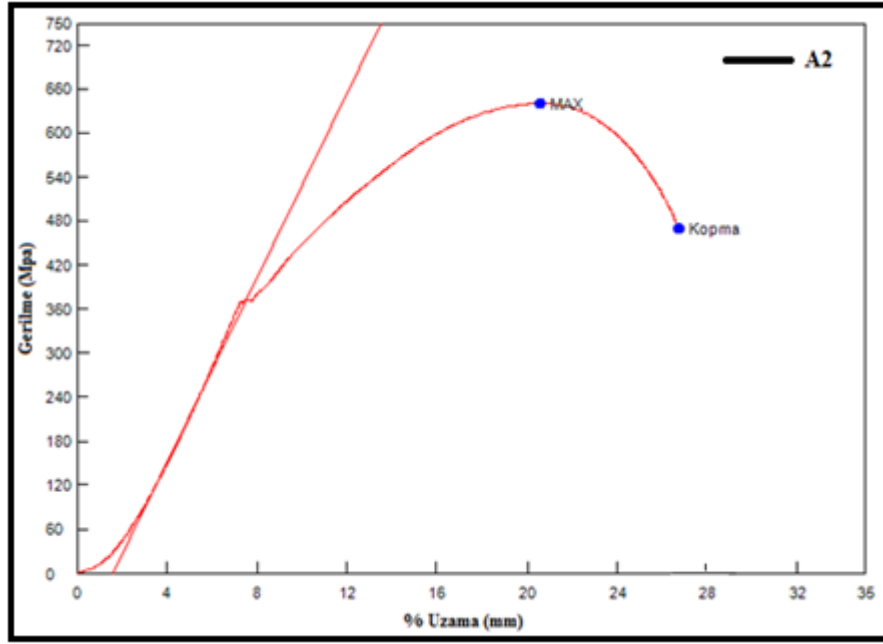
Çekme deneyinden sonra numunelerin kırık yüzeylerinin SEM fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 5.71) ve çekilen fotoğrafların belirli bölgeleri büyütülerek detaylı inceleme yapılmıştır.

700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen numunenin kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde numunenin kaynak bölgesinin dışından kırıldığı ve belirli bir akma göstererek hem sünek hem de gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. A1 numunesinde makroskobik olarak koni-çanak tipi kırılma görülmüştür. Sünek kırılmada oluşan plastik deformasyon sonrası boyun verme gerçekleşmiştir. Kırılmış kesitin ortasında son kopma bölgesi de diyebileceğimiz lifli bir bölge bulunmaktadır. Bu lifli kırılma bölgesinde yüzey mattır. Lifli bölgenin etrafında ise radyal çizgiler görülmektedir, bu radyal çizgiler gevrek kırılma belirtisidir (klivaj kırılma).

5.4.1.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A2 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



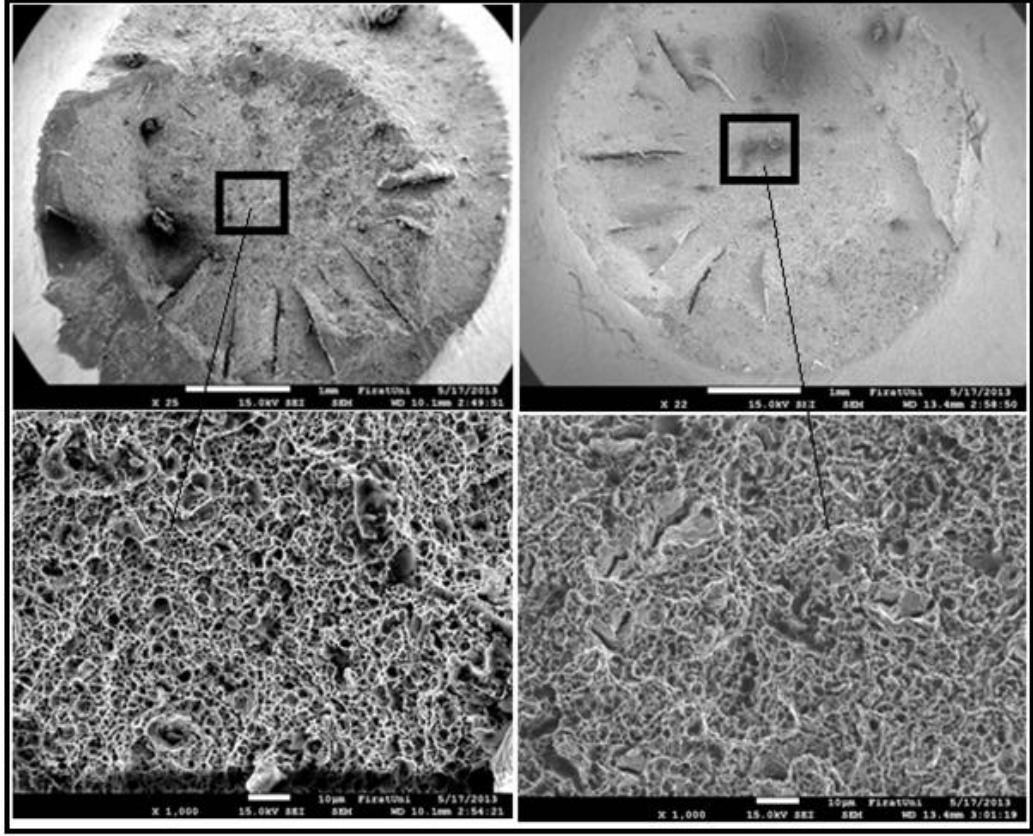
Şekil 5.72. A2 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.73. A2 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.72'de ve gerilme –şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.73'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait çekme gerilmesi 640,58 MPa kopma gerilmesi 469,001 ve % uzama değeri ise 26,7 olarak bulunmuştur.

A2 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 640,58 MPa olup, bu değer orijinal AISI 420 çeliğinin sahip olduğu 680,328 MPa değerinden düşüktür. Çekme sonrası A2 numunesi A1 numunesine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. A2 numunesinin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımı değerinden düşük çıkmasının sebebi, kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşiklerdir.



Şekil 5.74. A2 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

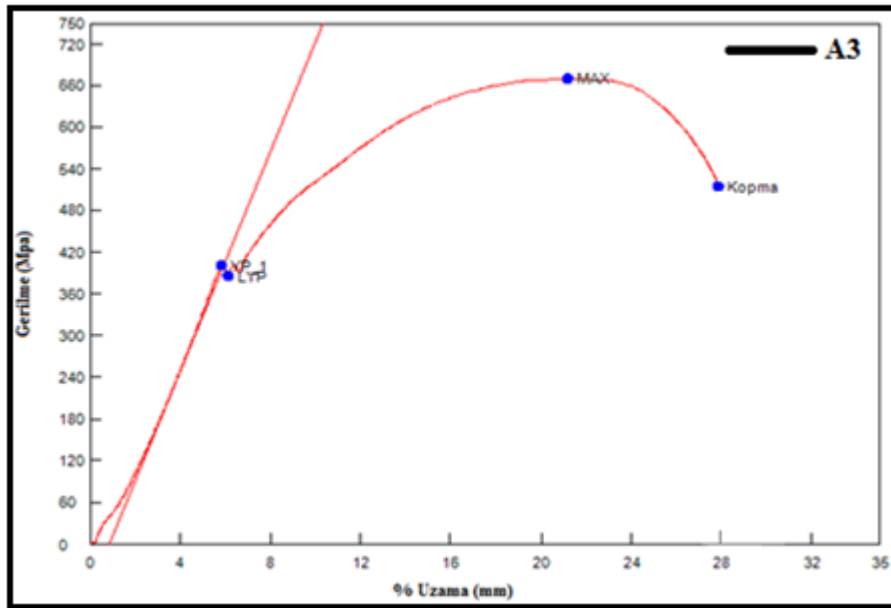
1000 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen numunelerin kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde, numunenin kaynak bölgesinin dışından kırıldığı ve belirli bir akma göstererek çoğunlukla sünek, kısmen de gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Gevrek kırılmanın sonucunda oluşan ayrılma düzlemleri çekme gerilmesinin uygulandığı doğrultuya diktir.

A2 numunesinde A1 numunesinde olduğu gibi koni-çanak tipi kırılma görülmüştür. Sünek kırılmada oluşan plastik deformasyondan dolayı A2 numunesi de boyun vermiştir ve A1 numunesine benzer şekilde kırılmış kesitin ortasında lifli bir bölge bulunmaktadır. Son kopmanın gerçekleştiği bu lifli bölgede, kırılma yüzeyi mattır. Lifli bölgenin etrafında ise radyal çizgiler görülmektedir ki bu çizgiler gevrek kırılma belirtisidir (klivaj kırılma). Klivaj kırılma çatlaklarının yayılması bu radyal çizgilere paralel şekilde gerçekleşmiştir (Şekil 5.74).

5.4.1.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A3 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



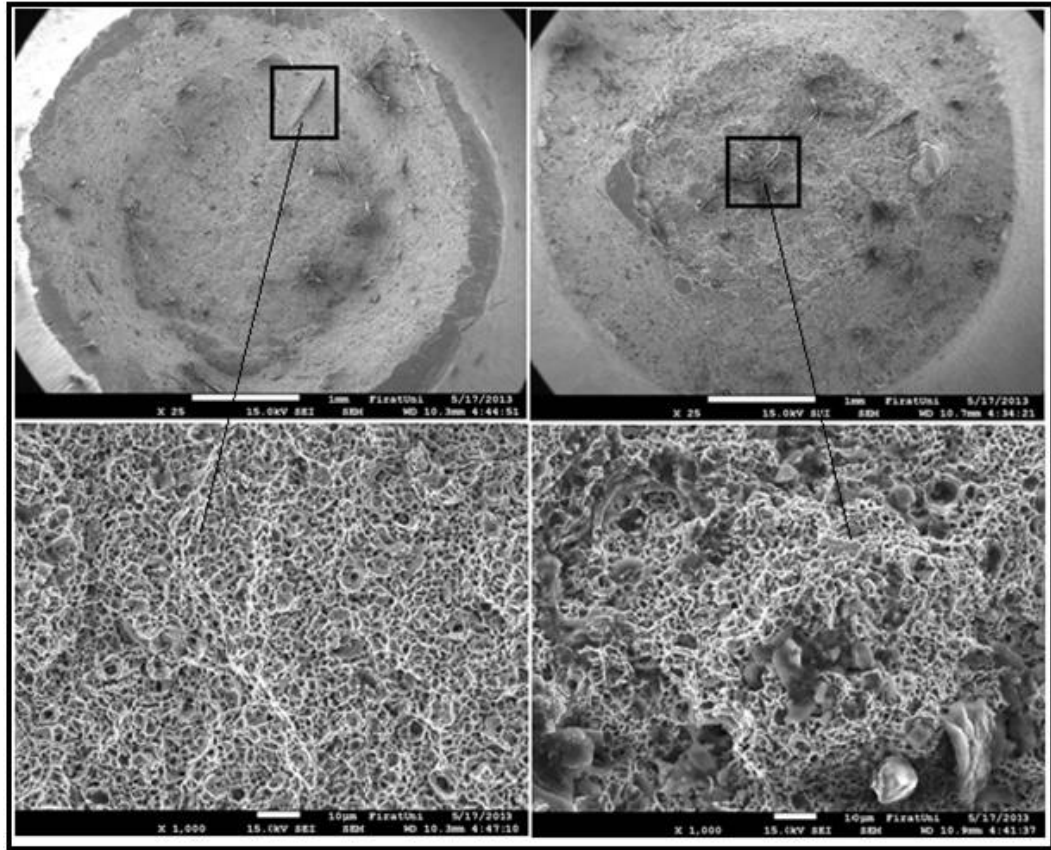
Şekil 5.75. A3 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.76. A3 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.75’de ve gerilme –şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.76’da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait çekme gerilmesi 670,06 MPa kopma gerilmesi 515,296 ve % uzama değeri ise 27,8 olarak bulunmuştur.

A3 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 670,06 MPa olup, bu değer orijinal AISI 420 çeliğinin sahip olduğu 680,328 MPa değerine yakındır. Çekme sonrası A3 numunesi A1 ve A2 numunelerinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. A3 numunesinin çekme dayanımı, ana malzemenin çekme dayanımı değerine yakındır.



Şekil 5.77. A3 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

A3 numunesinde de A1 ve A2 numunelerinde olduğu gibi koni-çanak tipi kırılma görülmüştür. Sünek kırılmada oluşan plastik deformasyondan dolayı A3 numunesi de boyun vermiştir ve A1 ve A2 numunelerine benzer şekilde kırılmış kesitin ortasında lifli

bir bölge bulunmaktadır. Son kopmanın gerçekleştiği bu lifli bölgede, kırılma yüzeyi mattır (Şekil 5.77).

AISI 420/AISI 420 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra numuneler incelenmiş ve devir sayısının çekme dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir ve bu değerlendirmeler sonucunda artan devir sayısına paralel olarak numunelerin çekme gerilmeleri değerlerinde bir miktar artışın olduğu görülmüştür. Artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzeme dışarı atılır ve ara yüzeyde malzemenin mukavemetini olumsuz etkileyecek bileşikler de dışarı atılmış olur, dolayısıyla çekme gerilmesi değerleri artar. Ayrıca düşük devir sayılarında plastik deformasyon için gerekli olan sıcaklığa ulaşamadığından kaynaklı bağlantıların mukavemetleri daha düşüktür. Çekme gerilmesi değerlerindeki artışın bir sebebi de devir sayısının artması ile birlikte daha fazla miktarda martenzitin temperlenmesine bağlanabilir. Bu nedenle en düşük çekme gerilmesi değeri 700 dev/dk devir sayısı ile A1 numunesinde görülmüştür.

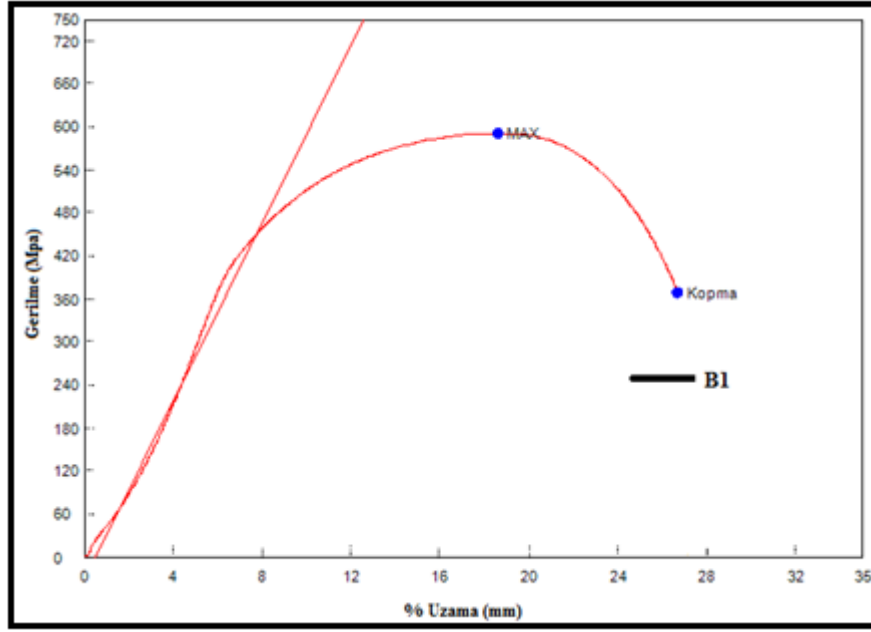
AISI 420/AISI 420 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra yapılan çekme işlemleri incelendiğinde, numunelerin hepsinin kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu ve koni-çanak tipi kırılma oluştuğu görülmüştür. Kırık yüzeyler incelendiğinde A1 ve A2 numunelerinde sünek ve gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği A3 numunesinde ise sadece sünek kırılmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bütün numunelerde akmanın olduğu ve oluşan plastik deformasyon sonrası boyun vermenin gerçekleştiği görülmüştür.

5.4.2. AISI 4340/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Çekme Deneyi Sonuçları

5.4.2.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B1 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



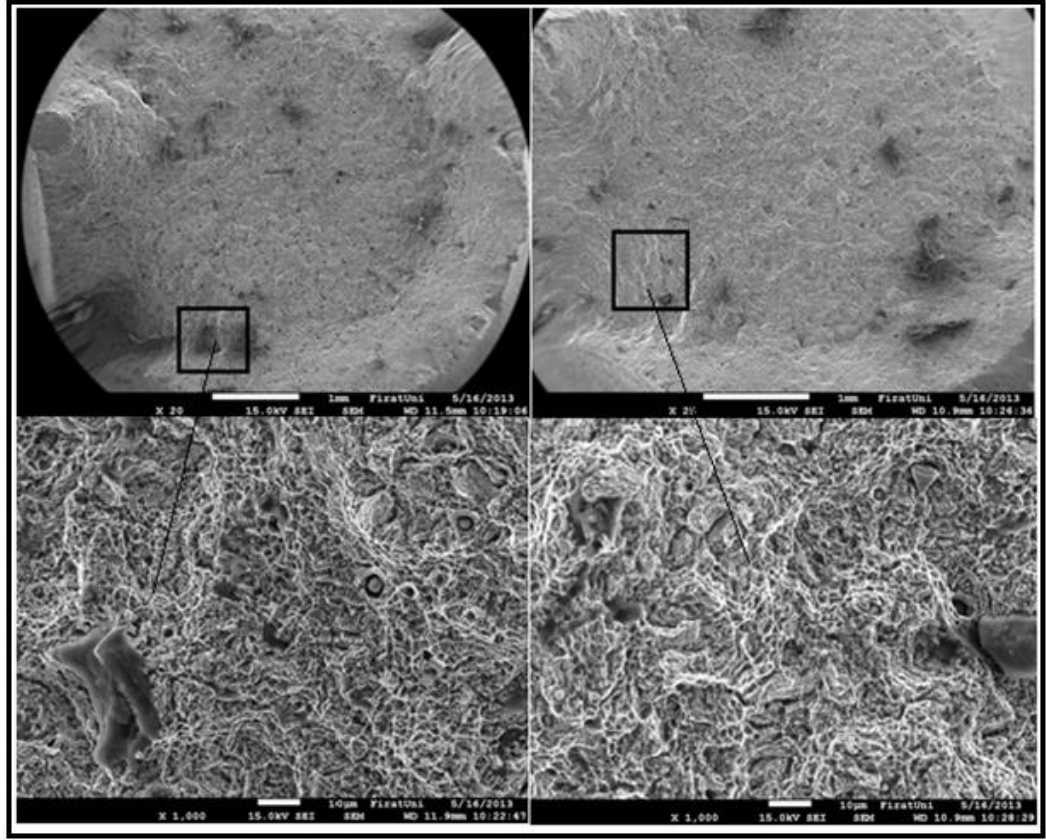
Şekil 5.78. B1 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.79. B1 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 4340 /AISI 4340 ıslah çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.78'de ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.79'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait çekme gerilmesi 591,1MPa kopma gerilmesi 368,72 ve % uzama değeri ise 26,7 olarak bulunmuştur.

B1 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 591,1MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 658,721 MPa değerinden düşük olduğu görülmektedir. Çekme sonrası B1 numunesi, A grubu numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. B1 numunesinin çekme dayanımı ana malzemenin çekme dayanımı değerinden düşüktür. Bunun nedeni, kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşiklerdir.



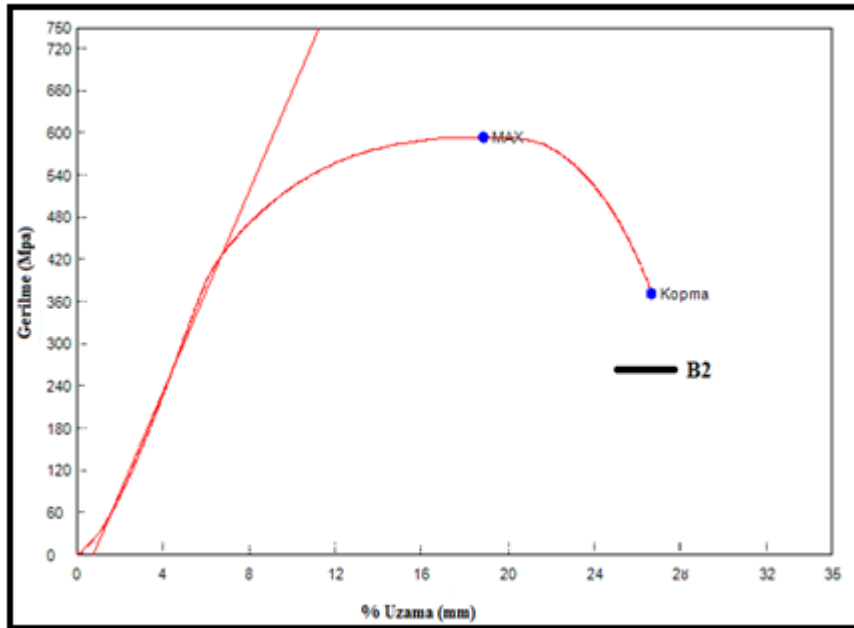
Şekil 5.80. B1 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen B1 numunesinin kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde numunenin kaynak bölgesinin dışından kırıldığı ve belirli bir akma göstererek genelde sünek kırılma davranışı sergilediği, bununla beraber kenar bölgelerde bir miktar gevrek kırılma olduğu düşünülmektedir. Buradaki sünek kırılma sırasında numune boyun vererek koni çanak tipi şeklinde kırılmıştır. B1 numunesinin ortasında parlak olmayan lifli bir kırık yüzey tespit edilmiştir. Çok az miktarda gevrek kırılmanın görüldüğü kenar kısımlarda ise parlak yüzeylere rastlanmıştır (Şekil 5.80).

5.4.2.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B2 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



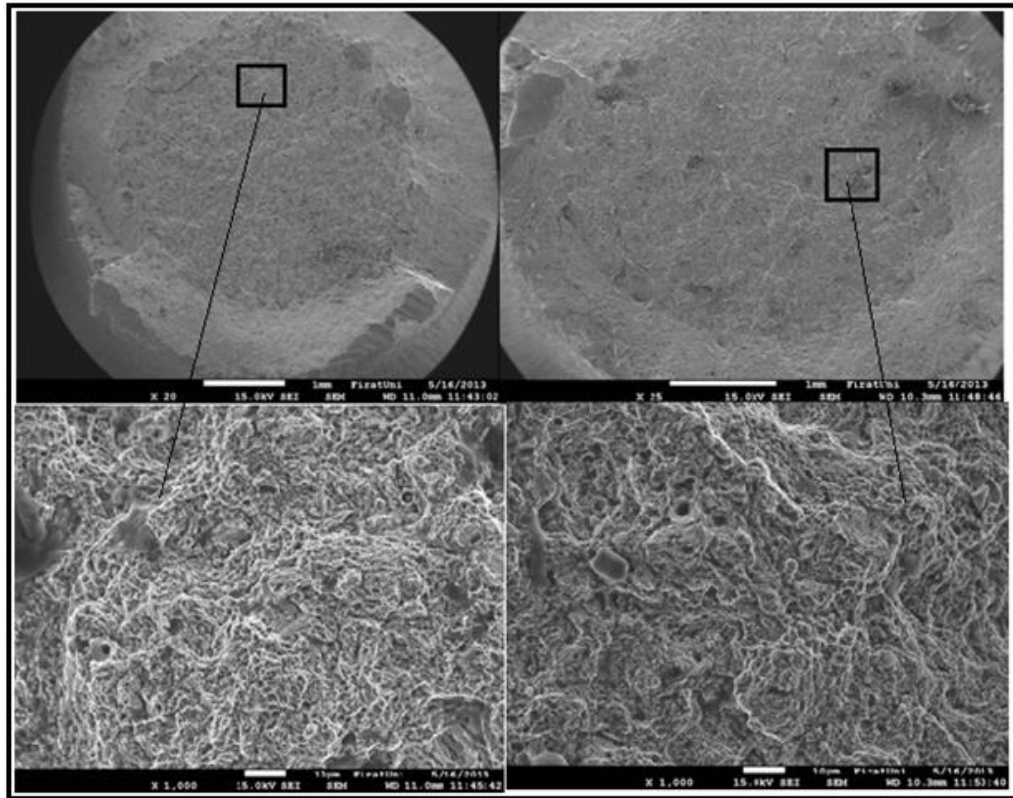
Şekil 5.81. B2 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.82. B2 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 4340 /AISI 4340 ıslah çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.81’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.82’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait çekme gerilmesi 593,485 MPa kopma gerilmesi 370,914 ve % uzama değeri ise 26,6 olarak bulunmuştur.

B2 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 593,485 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 658,721 MPa değerinden düşük olduğu görülmektedir. Çekme sonrası B2 numunesi de B1 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. B2 numunesinin çekme dayanımı değeri, ana malzemenin çekme dayanımı değerinden düşüktür ve B1 numunesininkinden yüksektir. B2 numunesinin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımı değerinden düşük olmasının nedeni, kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşiklerdir.



Şekil 5.83. B2 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

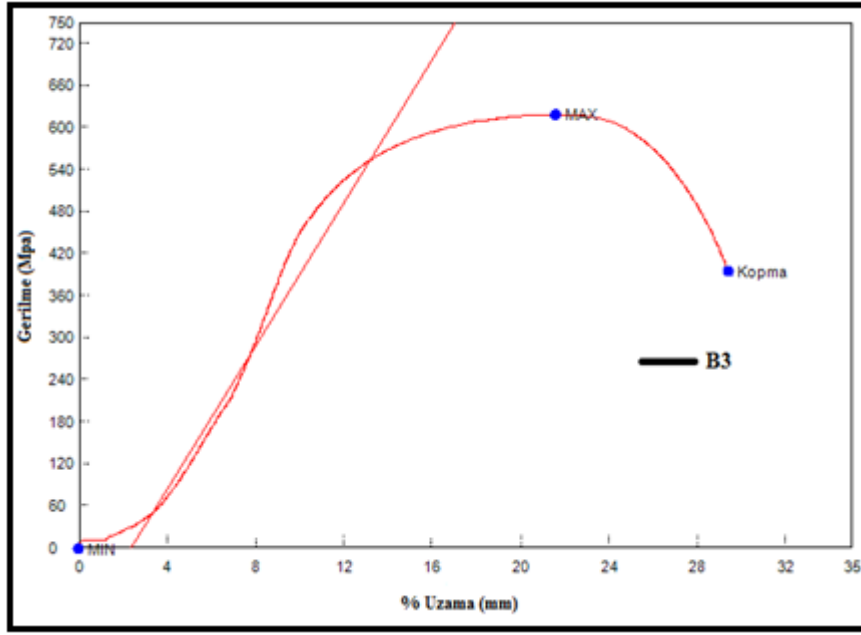
1000 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen B2 numunesinin çekme sonrası makro kırık yüzey fotoğrafları incelenmiş ve numunenin kaynak bölgesinin dışından

kırıldığı tespit edilmiştir. B2 numunesi de B1 numunesinde olduğu gibi belirli bir akma göstererek çoğunlukla sünek kırılma davranışı sergilemiştir, ayrıca kenar bölgelerde bir miktar gevrek kırılma olduğu görülmüştür. Burada da B1 numunesine benzer şekilde koni çanak oluşumu gerçekleşmiştir ve gevrek kırılmanın görüldüğü kenar kısımlarda yer yer parlak yüzeyler mevcuttur (Şekil 5.83).

5.4.2.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B3 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



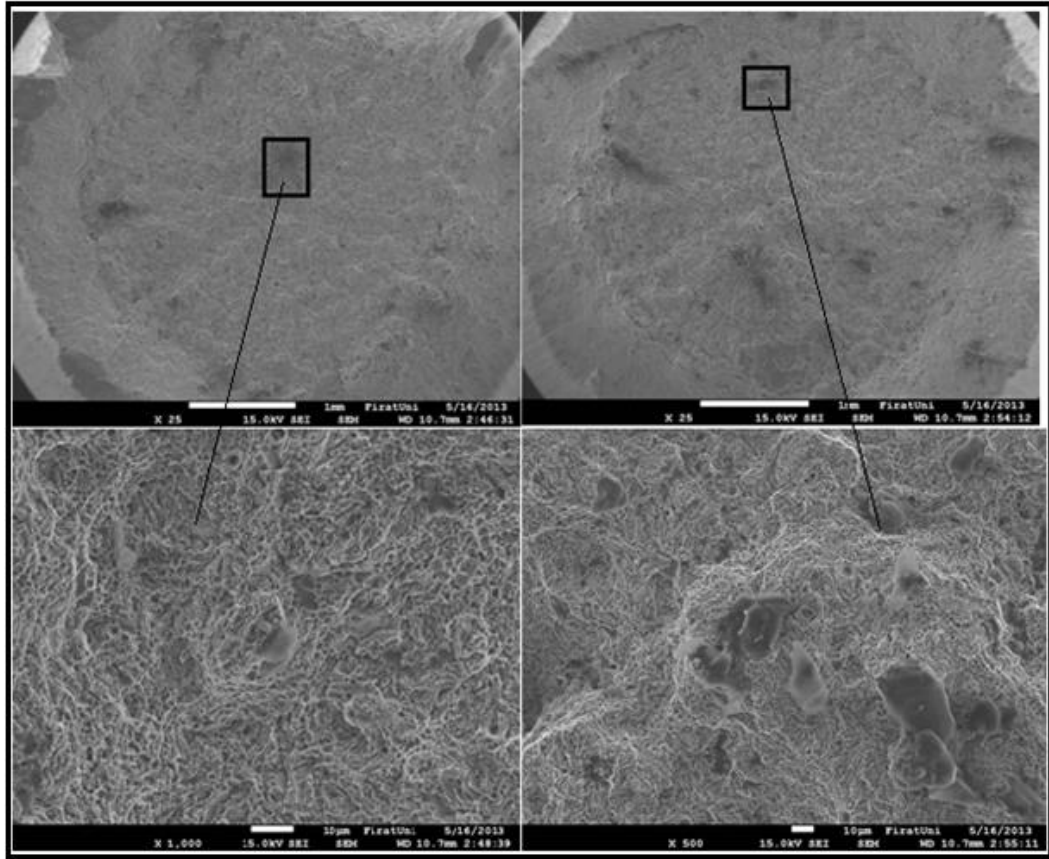
Şekil 5.84. B3 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.85. B3 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 4340 /AISI 4340 ıslah çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.84'de ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.85'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait çekme gerilmesi 617,05 MPa kopma gerilmesi 393,961 ve % uzama değeri ise 29,41 olarak bulunmuştur.

B3 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 617,05 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 658,721 MPa değerinden düşüktür. Çekme sonrası B3 numunesi B1 ve B2 numunelerinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. B3 numunesinin çekme dayanımı ana malzemenin çekme dayanımı değerinden bir miktar düşük olup ve B1 ve B2 ye göre yüksektir. B3 numunesinin çekme dayanımının ana malzemenin çekme dayanımı değerinden düşük olmasının sebebi, B1 ve B2 de olduğu gibi kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşiklerdir.



Şekil 5.86. B3 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen B3 numunesinin çekme sonrası makro kırık yüzey fotoğrafları incelenmiş ve numunenin kaynak bölgesinin dışından kırıldığı tespit edilmiştir. B3 numunesi B1 ve B2 numunelerinde olduğu gibi belirli bir akma göstererek çoğunlukla sünek kırılma davranışı sergilemiştir, ayrıca kenar bölgelerde bir miktar gevrek kırılma olduğu görülmüştür. Burada da B1 ve B2 numunelerine benzer şekilde koni çanak oluşumu gerçekleşmiştir ve gevrek kırılmanın görüldüğü kenar kısımlarda yer yer parlak yüzeyler mevcuttur (Şekil 5.86).

AISI 4340/AISI 4340 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra yapılan çekme işlemleri incelenmiş ve devir sayısının çekme dayanımı üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. İncelemeler sonucunda artan devir sayısına paralel olarak numunelerin çekme gerilmeleri değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Kaynaklı numunelerin hepsinin çekme deneyinin sonucunda kaynağın dışındaki bir bölgeden yani esas malzemedan koptuğu görülmüştür. Kırık yüzeyler incelendiğinde B grubu numunelerin hepsinde genel olarak sünek ve bir miktar da gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği, düşünülmektedir. Devir sayısı arttıkça sünek davranış

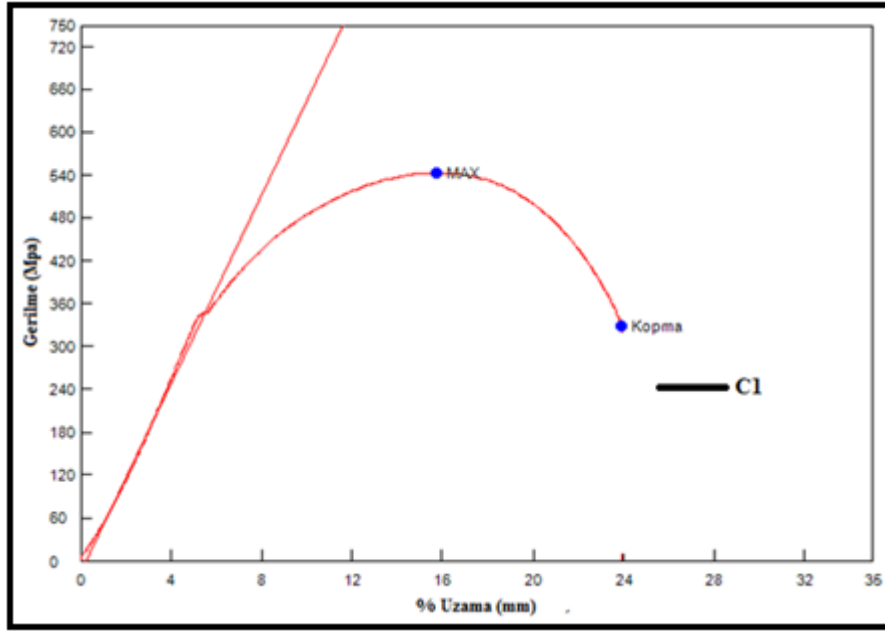
gösterme özelliği de artmıştır. Bu durumun sebebi, devir sayısındaki artışa bağlı olarak sıcaklığın artması ve bu sıcaklık artışının etkisiyle malzemenin plastik deformasyon miktarının da artmasıdır. Ayrıca artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzeme dışarı atıldığından malzemenin mukavemetini düşürecek bileşikler de dışarı atılmış olur. Bu nedenlerden dolayı en düşük çekme gerilmesi değeri 700 dev/dk devir sayısı ile B1 numunesinde görülmüştür.

5.4.3. AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Çekme Deneyi Sonuçları

5.4.3.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C1 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



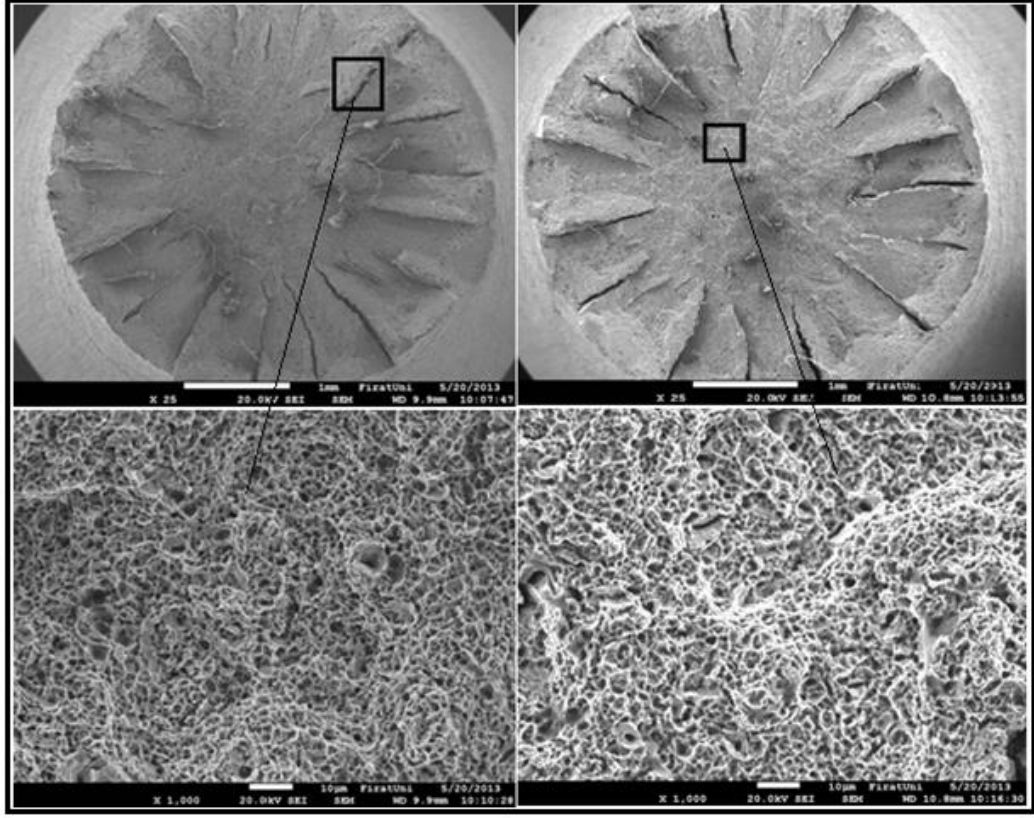
Şekil 5.87. C1 no'lu numunelere ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.88. C1 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 4340 çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.87'de ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.88'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, çelik çiftine ait çekme gerilmesi 542,6 MPa kopma gerilmesi 329,02 ve % uzama değeri ise 23,93 olarak bulunmuştur.

C1 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 542,6 MPa olup, bu değer kopmanın gerçekleştiği orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 658,721 MPa değerinden düşüktür. Çekme sonrası C1 numunesi, A ve B grubu numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. Kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşikler, C1 numunesinin çekme dayanımını düşürmüştür.



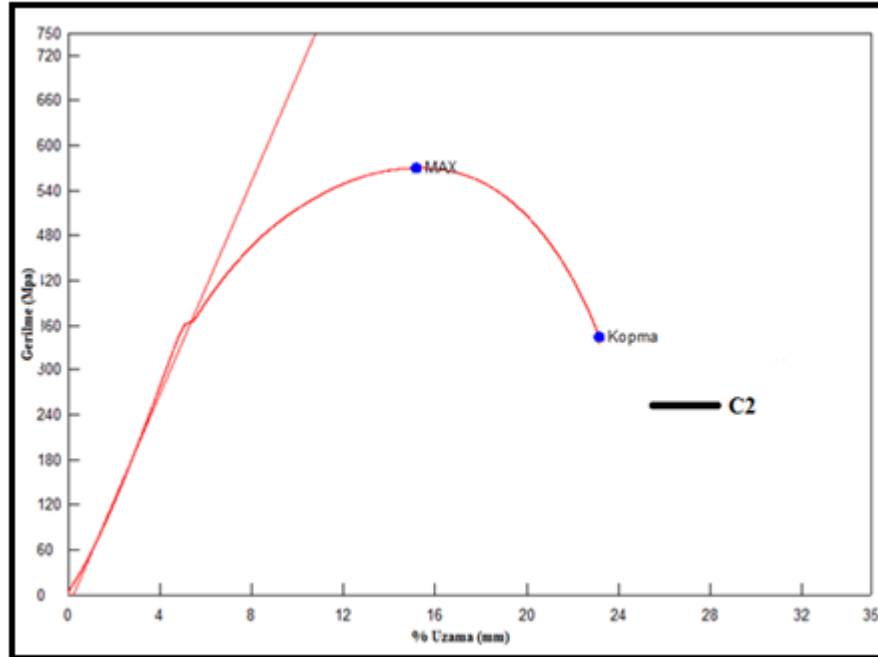
Şekil 5.89. C1 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen C1 numunesinin çekme sonrası makro kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde, kırılmanın A ve B grubu numunelerine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışından gerçekleştiği görülmüştür. Numunedeki kopma AISI 4340 çeliği tarafında meydana gelmiştir. Bunun sebebi AISI 4340 malzemesinin AISI 420' ye göre daha sert olmasıdır. C1 numunesi çekme esnasında boyun vermiş ve koni-çanak tipi şeklinde kırılmıştır. Numune belirli bir akma göstererek çoğunlukla gevrek ve bir miktar da sünek kırılma davranışı sergilemiştir. Resimde görüldüğü üzere, kırık yüzeyde gevrek kırılmanın sonucunda oluşan parlak görünümlü ayrılma düzlemleri mevcuttur. Kırılmış kesitin ortasında son kopma bölgesi de diyebileceğimiz lifli bir bölge bulunmaktadır ve bu lifli kırılma bölgesinde, yüzey mattır. Lifli bölgenin etrafında ise radyal çizgiler görülmektedir, bu radyal çizgiler gevrek kırılma belirtisidir (klivaj kırılma), (Şekil 5.89).

5.4.3.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C2 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



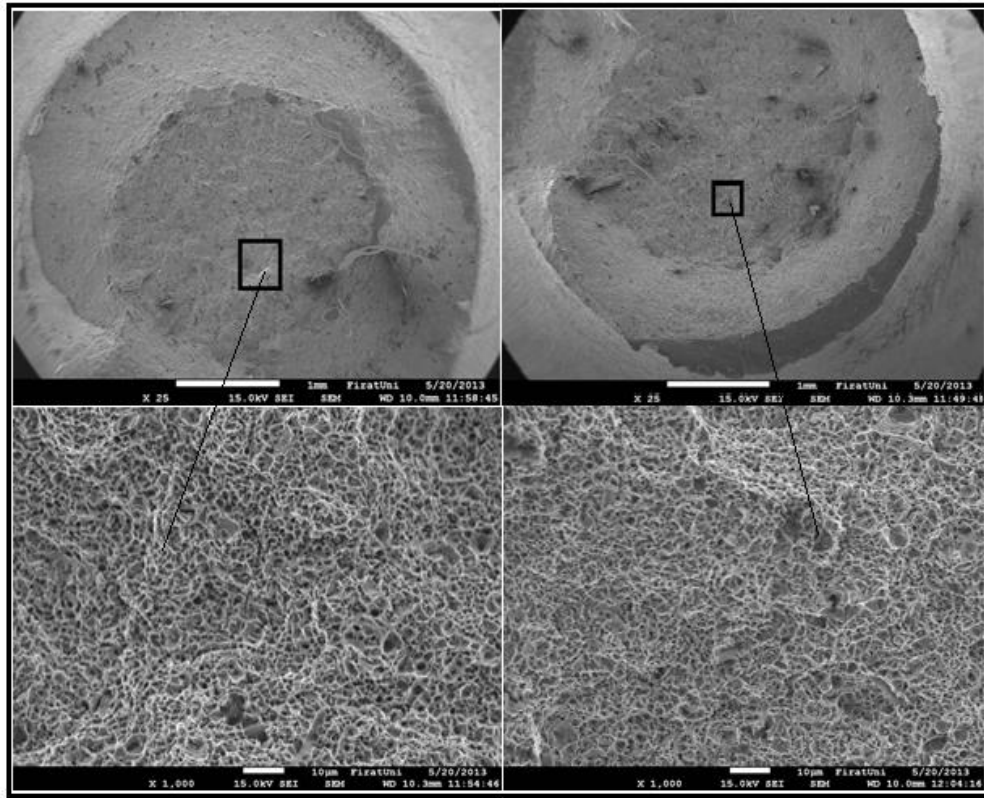
Şekil 5.90. C2 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.91. C2 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 4340 çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.90’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.91’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait çekme gerilmesi 570,134 MPa kopma gerilmesi 345,67 ve % uzama değeri ise 23,14 olarak bulunmuştur.

C2 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 570,134 MPa olup, bu değer kopmanın gerçekleştiği orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 658,721 MPa değerinden düşüktür. Çekme sonrası C2 numunesi de C1 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. Kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşikler C2 numunesinin çekme dayanımını düşürmüştür.



Şekil 5.92. C2 no’lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

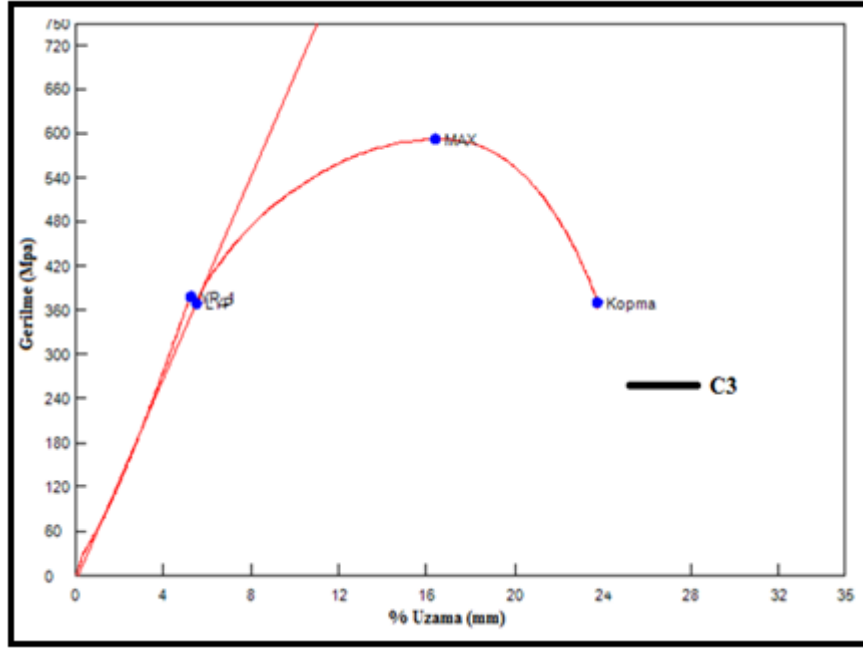
1000 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen C2 numunesinin çekme sonrası makro kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde, kırılmanın C1 numunesine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışından gerçekleştiği görülmüştür. Numunedeki kopma AISI 4340 çeliği tarafında meydana gelmiştir. Bunun sebebi AISI 4340 malzemesinin AISI 420’ ye

göre daha sert olmasıdır. C2 numunesi çekme esnasında boyun vermiş ve koni-çanak tipi şeklinde kırılmıştır. Numune belirli bir akma göstererek çoğunlukla sünek ve bir miktar da gevrek kırılma davranışı sergilemiştir. Kırılmış kesitin ortasında lifli bir bölge bulunmaktadır ve bu lifli kırılma bölgesinde yüzey mattır. Kenar bölgelerde çok az miktarda parlak gevrek kırılma yüzeylerine rastlanmıştır (Şekil 5.92).

5.4.3.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C3 No'lu Numunenin Çekme Deneyi Sonuçları



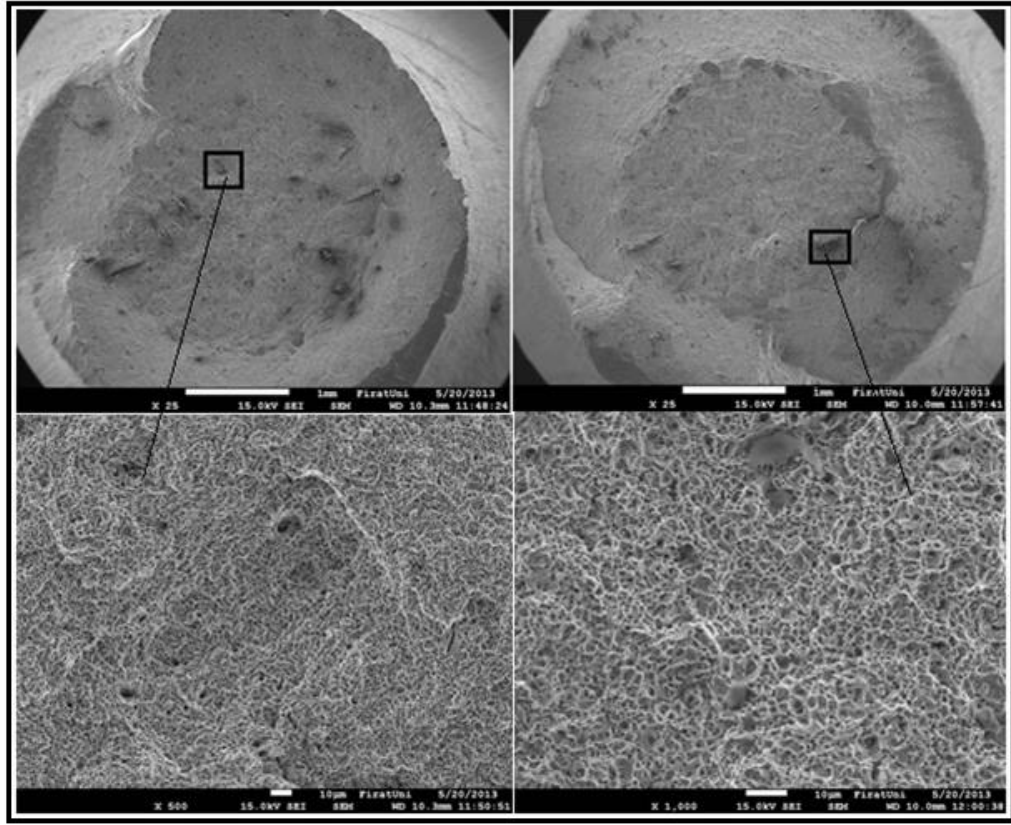
Şekil 5.93. C3 no'lu numuneye ait çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.94. C3 no'lu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 4340 çelik çiftine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.4'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.93'de ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.94'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, çelik çiftine ait çekme gerilmesi 592,47 MPa kopma gerilmesi 368,94 MPa ve % uzama değeri ise 23,7 olarak bulunmuştur.

C3 numunesine ait çekme gerilmesi değeri 592,47 MPa olup, bu değer kopmanın gerçekleştiği orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 658,721 MPa değerinden düşüktür. Çekme sonrası C3 numunesi C1 ve C2 numunelerinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. Kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşikler C3 numunesinin çekme dayanımını C1 ve C2 numunelerinde olduğu gibi düşürmüştür.



Şekil 5.95. C3 no'lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen C3 numunesinin çekme sonrası makro kırık yüzey fotoğrafları incelenmiş ve kırılmanın C1 ve C2 numunelerine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışından gerçekleştiği görülmüştür. Numunedeki kopma AISI 4340 çeliği tarafında meydana gelmiştir C3 numunesi çekme esnasında boyun vererek koni-çanak tipi şeklinde kırılmıştır. Numune belirli bir akma göstererek çoğunlukla sünek ve bir miktar da gevrek kırılma davranışı sergilemiştir. Kırılmış kesitin ortasında mat görünümlü lifli bir bölge bulunmaktadır Kenar bölgelerde çok az miktarda parlak, gevrek kırılma yüzeylerine rastlanmıştır (Şekil 5.95).

AISI 420/AISI 4340 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra yapılan çekme işlemleri incelenmiş ve devir sayısının çekme dayanımı üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. İncelemeler sonucunda artan devir sayısına paralel olarak numunelerin çekme gerilmeleri değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Kaynaklı numunelerin hepsi A ve B grubu numunelere benzer şekilde kaynağın dışındaki bir bölgeden kopmuştur ve bütün C grubu numunelerde kopma AISI 4340 tarafında gerçekleşmiştir. Bu durum AISI 4340 malzemesinin AISI 420' ye göre daha sert olması ile açıklanabilir.

Kırık yüzeyler incelendiğinde C1 numunesinde C2 ve C3 'e göre daha gevrek bir kırılma gerçekleştiği görülmüştür C1 numunesinde yoğun olarak gevrek ve bir miktar sünek kırılma davranışı görülürken C2 ve C3 numunelerinde bunun tam tersi görülmüştür. Bu durumun sebebi devir sayısındaki artışa bağlı olarak sıcaklığın artması ve bu sıcaklık artışının etkisiyle malzemenin plastik deformasyon miktarının da artmasıdır. Ayrıca artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzeme dışarı atıldığından malzemenin mukavemetini düşürecek bileşikler de dışarı atılmış olur Bu nedenlerden dolayı en düşük çekme gerilmesi değeri 700 dev/dk devir sayısı ile C1 numunesinde görülmüştür.

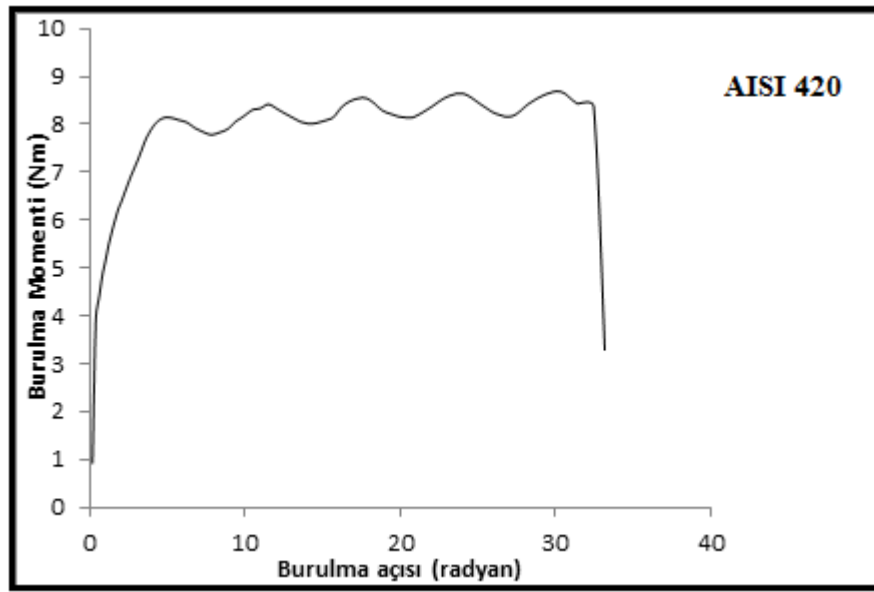
C grubu numunelerin tümünde bir miktar akma meydana geldiği çekme grafiklerinde görülmektedir.

5.5. Burulma Deneyi Sonuçları

Sürtünme kaynak işleminde kullanılan çeliklerin kaynak öncesi ve sonrası burulma dayanımlarını karşılaştırmak için, deneylere başlamadan önce AISI 420 ve AISI 4340 çelikleri deney yapılacak cihazın özelliklerine göre hazırlanarak burulma deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyler sonucunda AISI 420 çeliğinin kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 15,859580 MPa ve AISI 4340 çeliğinin kopma anındaki kayma gerilmesi değeri ise 22,012739 MPa olarak bulunmuştur. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da verilmiştir. Numunelerin burulma momenti-burulma açısı grafikleri ise Şekil 5.96 ve Şekil 5.97'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5 AISI 420 çeliğine ait burulma deneyi sonunda elde edilen değerler

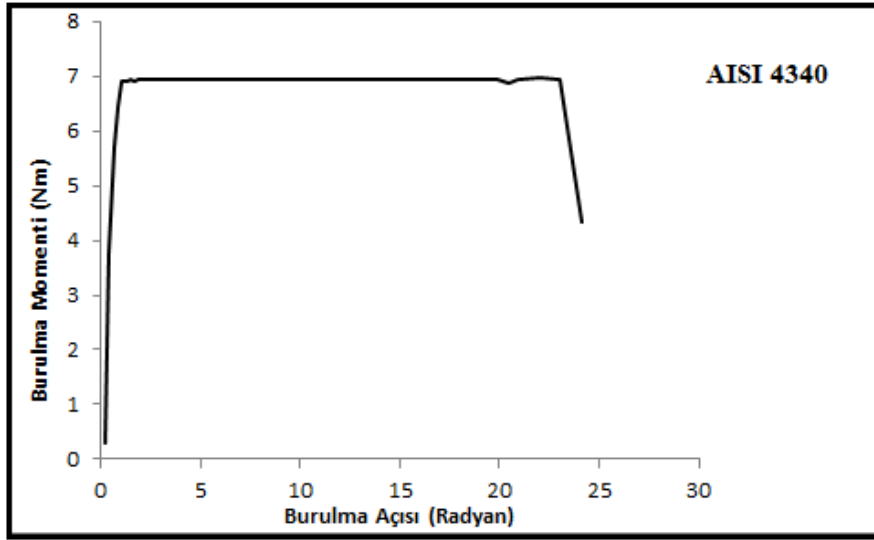
AISI 420	Kopmadaki Burulma Açısı (Radyan)	Kopmadaki Burulma Momenti (Nm)	Kopmadaki Kayma Gerilmesi MPa	Kopmadaki Kayma uzaması (Radyan)
	33,51032	3,02	15,859580	1,863776



Şekil 5.96. AISI 420 çeliğine ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

Tablo 5.6. AISI 4340 çeliğine ait burulma deneyi sonunda elde edilen değerler

AISI 4340	Kopmadaki Burulma Açısı (Radyan)	Kopmadaki Burulma Momenti (Nm)	Kopmadaki Kayma Gerilmesi MPa	Kopmadaki Kayma uzaması (Radyan)
	24,08554	4,32	22,012739	1,514814



Şekil 5.97. AISI 4340 çeliğine ait burulma momenti-burulma açısı grafiği

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmenin gerçekleştirildiği AISI 420 ve AISI 4340 çelikleri kaynak işleminden sonra burulma deneyine tabi tutulmuştur. Kaynağı yapılan malzeme çiftleri, burulma momenti etkisinde kalan yerlerde de (şaft, matkap vb.) kullanılabildiğinden burulma deneyinin yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Deneyler yapıldıktan sonra numunelerin burulma deneyi sonuçları değerlendirilmiş, AISI 420 ve AISI 4340 çeliklerinin hangi parametrelerde birleştirildiği ve bu birleştirme işlemlerinden sonra uygulanan burulma deneyine ait sonuçlar Tablo 5.7’de gösterilmiştir. Bu tablodan burulma deneyi uygulamalarında esas alınan kayma gerilmesi değerlerinin, devir sayısına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir.

Tablo 5.7. A, B ve C grubu numunelerine ait burulma deneyi sonucunda elde edilen değerler

NUMUNELER	Devir Sayısı (dev/dk)	Kopmadaki Burulma Açıısı (Radyan)	Kopmadaki Burulma Momenti (Nm)	Kopmadaki Kayma Gerilmesi MPa	Kopmadaki Kayma uzaması (Radyan)
A1	700	23,03835	0,55	2,845010	1,508103
A2	1000	33,51032	1,18	6,103839	1,862724
A3	1300	27,22714	2,83	14,420382	1,745329
B1	700	13,61357	2,07	10,547771	0,850848
B2	1000	16,75516	3,95	20,127389	1,074049
B3	1300	15,18436	3,96	20,484071	0,944277
C1	700	17,80236	1,1	5,776668	0,987911
C2	1000	25,13274	2,16	11,006369	1,59068
C3	1300	21,99115	2,4	12,229299	1,391845

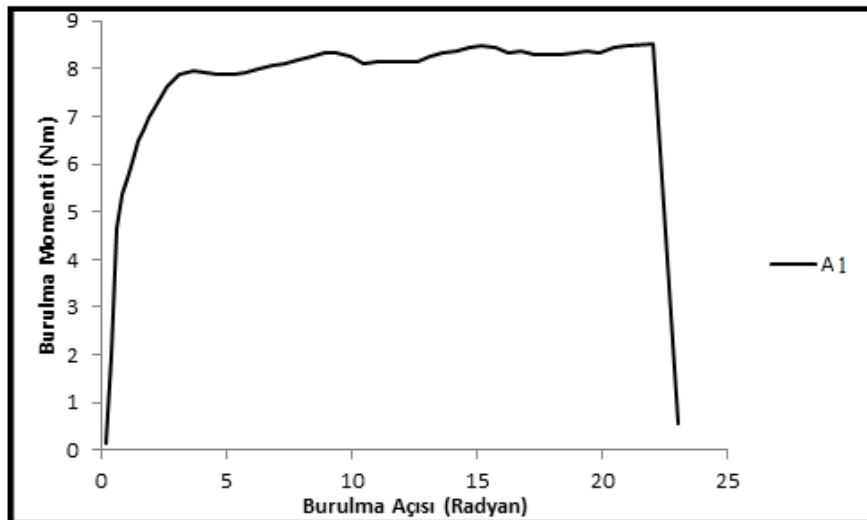
Burulma deneyinde, kırılmaya kadar uygulanan burulma sayısı malzemenin deformasyon kabiliyeti hakkında bir fikir verir. Fakat burulma sayısı, numunenin boyutlarına bağlıdır. Boyutlar arttıkça kırılmaya kadar tatbik edilen burulma sayısı da artacaktır. Bu nedenle burulma sayısı yerine kopmaya kadar olan kayma uzaması kullanılır. Burulma deneyinde uygulanan burulma momenti etkisiyle numunede kayma gerilmeleri oluşur ve kayma gerilmeleri tesiriyle de numune kayma uzaması şeklinde deformasyona uğrar [76]. Bu nedenle numunelerin burulma dayanımları değerlendirilirken kayma gerilmesi değerleri esas alınmıştır.

5.5.1. AISI 420/ AISI 420 Çelik Çiftinin Burulma Deneyi Sonuçları

5.5.1.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A1 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



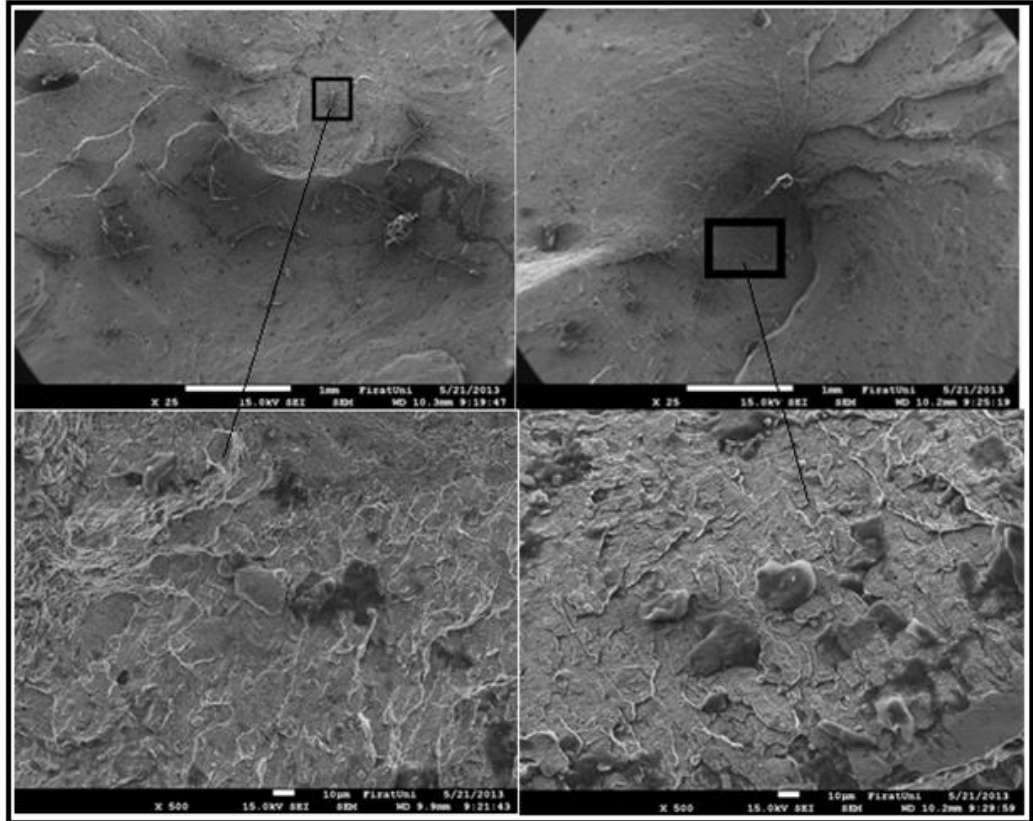
Şekil 5.98. A1 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.99. A1 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.98’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.99’da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 23,03835 radyan, kopma anındaki burulma momenti 0,55 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 2,845010 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 1,508103 radyan olarak bulunmuştur.

A1 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 2,845010 MPa olup, bu değer orijinal AISI 420 çeliğinin sahip olduğu 15,859580 MPa değerinden çok düşük olduğu görülmektedir. Burulma sonrası numune kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. A1 numunesinin burulma dayanımının ana malzemenin burulma dayanımı değerinden çok düşük olması, kaynak sırasında ısının etkisiyle oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlere bağlanabilir.



Şekil 5.100. A1 no’lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

Burulma deneyinden sonra numunelerin kırık yüzeylerinin SEM fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 5.100). Çekilen fotoğrafların belirli bölgeleri büyütülerek detaylı inceleme yapılmıştır.

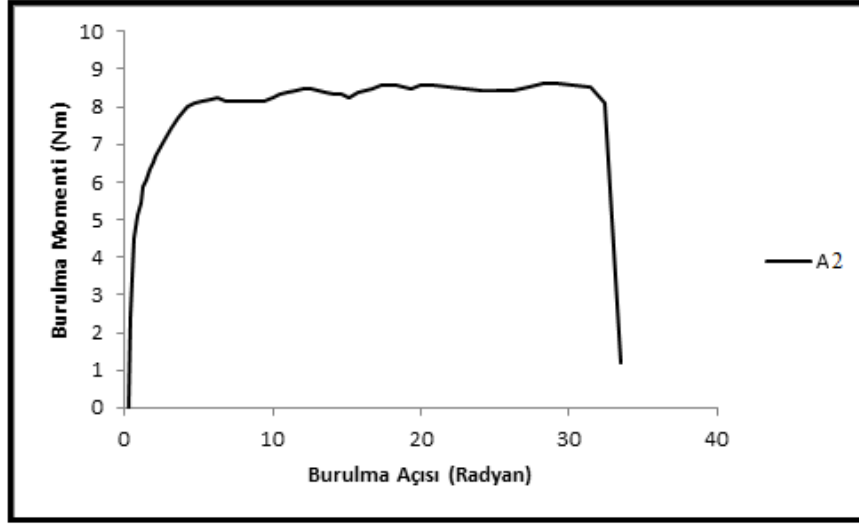
Burulma deneyinde sünek bir malzemenin kırılması, maksimum kayma gerilmeleri yönünde, genellikle numunenin düşey eksenı boyunca olur. Gevrek bir malzemenin kırılması ise, numunenin boyu uzun ise numunenin bükülmesi sonucunda şeklinin bozulması şeklinde, eğer numunenin boyu kısa ise yine maksimum kayma gerilmesi yönünde olur [76].

700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen A1 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Kırılmış kesitin ortasında son kopma bölgesi de diyebileceğimiz çok küçük bir bölgede lifli bir yapı görülmektedir. Kenar kısımlarda ise yer yer radyal çizgiler mevcuttur. Bu radyal çizgiler sünek kırılma içerisinde yer yer gevrek kırılmanın olduğunu belirtisidir.

5.5.1.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A2 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



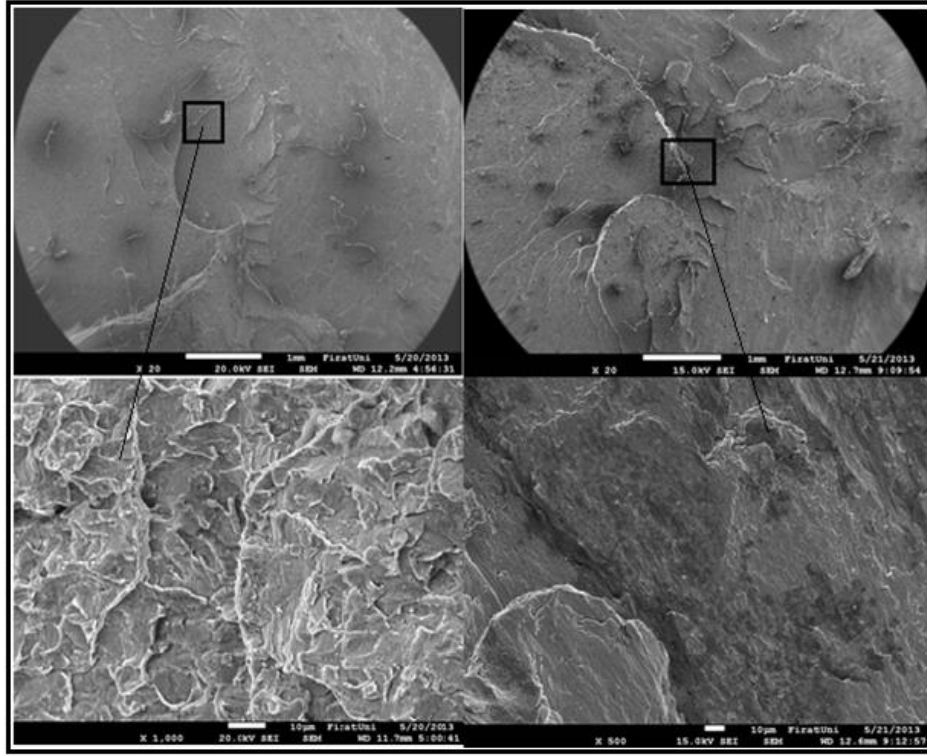
Şekil 5.101. A2 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.102. A2 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.101'de ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.102'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 33,51032 radyan, kopma anındaki burulma momenti 1,18 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 6,103839 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 1,862724 radyan olarak bulunmuştur.

A2 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 6,103839 MPa olup, bu değer orijinal AISI 420 çeliğinin sahip olduğu 15,859580 MPa değerinden düşük olduğu görülmektedir. Burulma sonrası numune, A1 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. A2 numunesinin burulma dayanımı A1 numunesinden oldukça yüksektir. Bu durum devir artışına paralel olarak ara kesitten daha fazla miktarda Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlerin dışarı atılmasına ve martenzitin ısının etkisiyle temperlenmesine bağlanabilir.



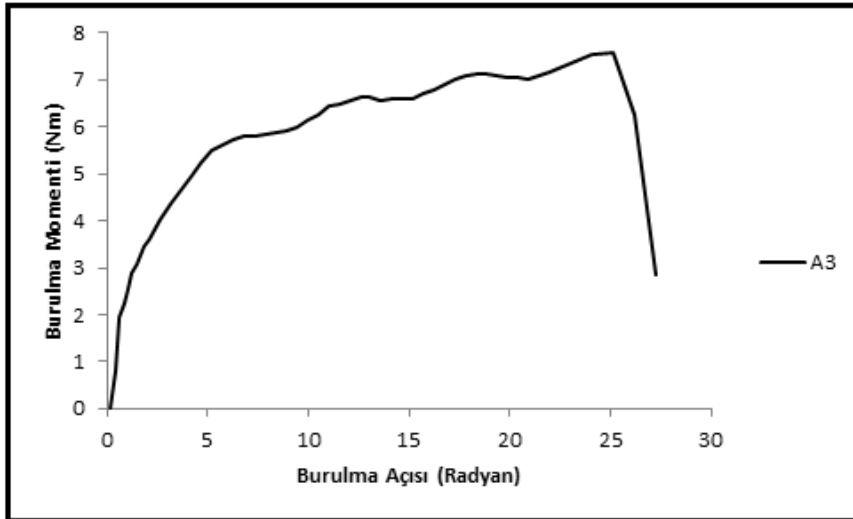
Şekil 5.103. A2 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1000 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen A2 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın A1 numunesine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve A1 numunesine benzer şekilde sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Yapıda gevrek kırılmanın göstergesi olan parlak bölgeler ve çizgiler mevcuttur (Şekil 5.103).

5.5.1.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen A3 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



Şekil 5.104. A3 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

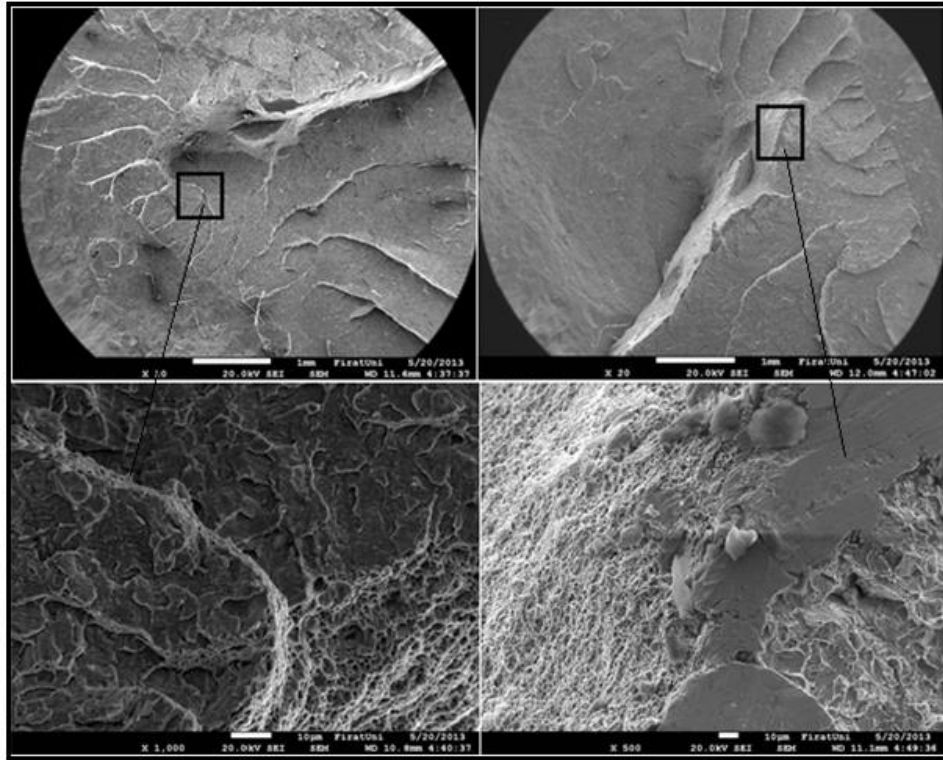


Şekil 5.105. A3 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 420 martenzik

paslanmaz çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.104’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.105’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 27,22714 radyan, kopma anındaki burulma momenti 2,83 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 14,420382 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 1,745329 radyan olarak bulunmuştur.

A3 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 14,420382 MPa olup, bu değer orjinal AISI 420 çeliğinin sahip olduğu 15,859580 MPa değerine yakın olduğu görülmektedir. Burulma sonrası numune A1 ve A2 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. A3 numunesinin burulma dayanımı A1 ve A2 numunelerinden oldukça yüksektir. Burada da A2 numunesinde olduğu gibi devir sayısındaki artışa paralel olarak ara kesitten daha fazla miktarda Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürler dışarı atılmış, ayrıca martenzit ısının etkisiyle temperlenmiştir.



Şekil 5.106. A3 no’lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen A3 numunesi, burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın A1 ve A2 numunelerine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve A1 ve A2 numunelerine benzer şekilde sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir.

Kırık yüzeylerde gevrek kırılmanın göstergesi olan damarlı parlak çizgiler ve kısmen de radyal çizgiler mevcuttur (Şekil 5.106).

AISI 420/AISI 420 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra numuneler incelenmiş ve devir sayısının burulma dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda artan devir sayısına paralel olarak numunelerin kopma anındaki kayma gerilmeleri değerlerinde önemli bir artışın olduğu görülmüştür. A3 numunesinde bu değer ana malzemeye yaklaşmıştır. Artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzeme dışarı atılmış olur dolayısıyla burulma dayanımı artar. Burulma dayanımı değerlerindeki artışın bir sebebi de devir sayısının artması ile birlikte daha fazla miktarda martenzitin temperlenmesidir. Kopma anındaki en düşük kayma gerilmesi değeri 700 dev/dk devir sayısı ile A1 numunesinde ve en yüksek kayma gerilmesi değeri 1300 dev/dk devir sayısı ile A3 numunesinde görülmüştür. 700 dev/dk devir sayısından 1000 dev/dk devir sayına geçişte kayma gerilmesi yaklaşık iki katına çıkmıştır. Bu artış oranı 1000 dev/dk devir sayısından 1300 dev/dk devir sayısına geçişte de aynıdır.

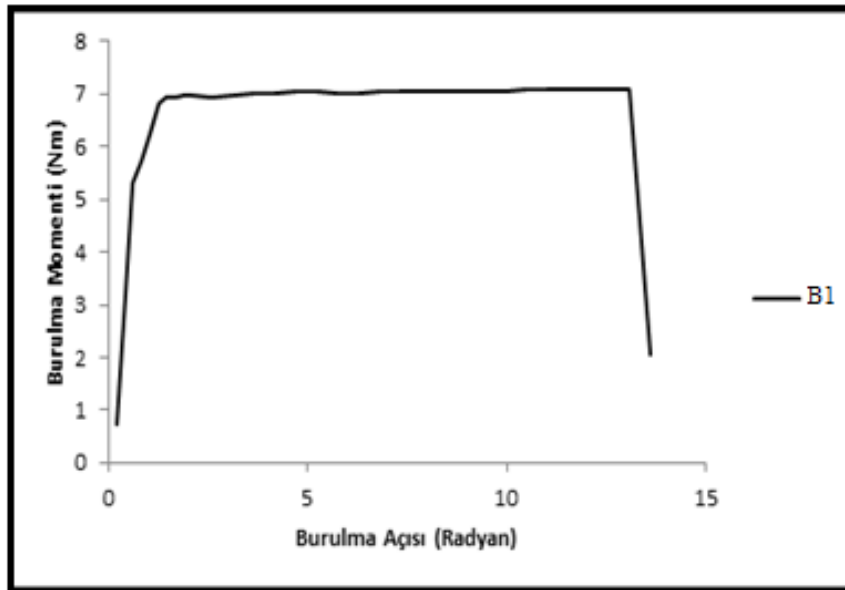
AISI 420/AISI 420 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra yapılan burulma deneyi işlemleri incelendiğinde, numunelerin hepsinin kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu ve genelde sünek olarak kırıldığı tespit edilmiştir. Kırık yüzeyler incelendiğinde her üç numunede de bölgesel olarak yer yer gevrek kırılma belirtisi olan radyal çizgilere, damarlı bölgelere ve parlak yüzeylere rastlanmıştır.

5.5.2. AISI 4340/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Burulma Deneyi Sonuçları

5.5.2.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B1 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



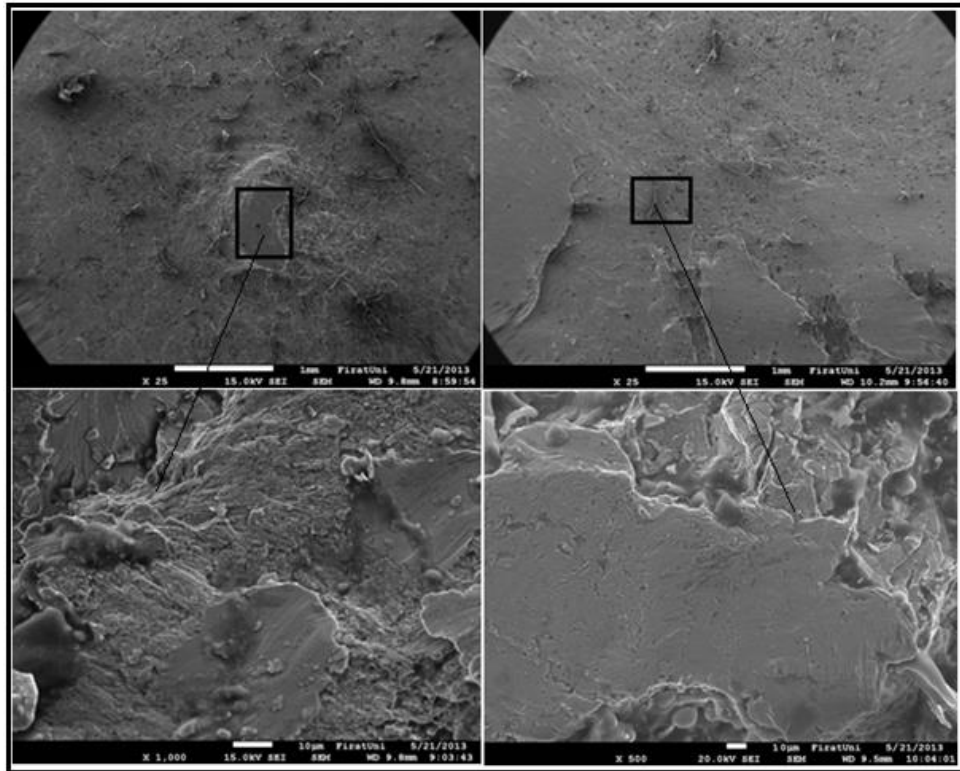
Şekil 5.107. B1 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.108. B1 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 4340 /AISI 4340 ıslah çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.107’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.108’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 13,61357 radyan, kopma anındaki burulma momenti 2,07 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 10,547771 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 0,850848 radyan olarak bulunmuştur.

B1 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 10,547771 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 22,012739 MPa değerinin hemen hemen yarısıdır. Burulma sonrası B1 numunesi A grubu numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. B1 numunesinin burulma dayanımının ana malzemenin burulma dayanımı değerinden düşük olması, kaynak sırasında ısının etkisiyle oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlere bağlanabilir.



Şekil 5.109. B1 no’lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

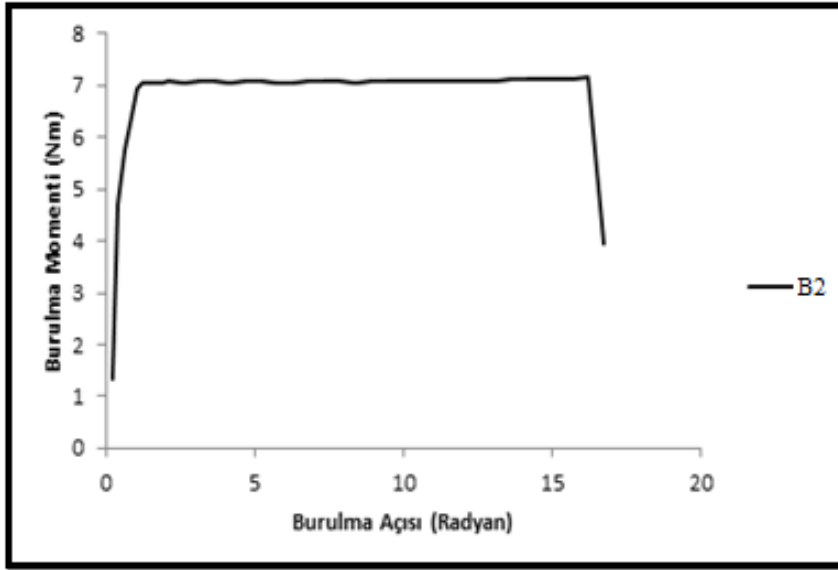
700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen B1 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın A grubu numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesinin

dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Kırılmış kesitin ortasında son kopma bölgesi de diyebileceğimiz çok küçük bir bölgede lifli bir yapı görülmektedir. Kenar kısımlarda az miktarda radyal çizgilere rastlanmıştır (Şekil 5.109).

5.5.2.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B2 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



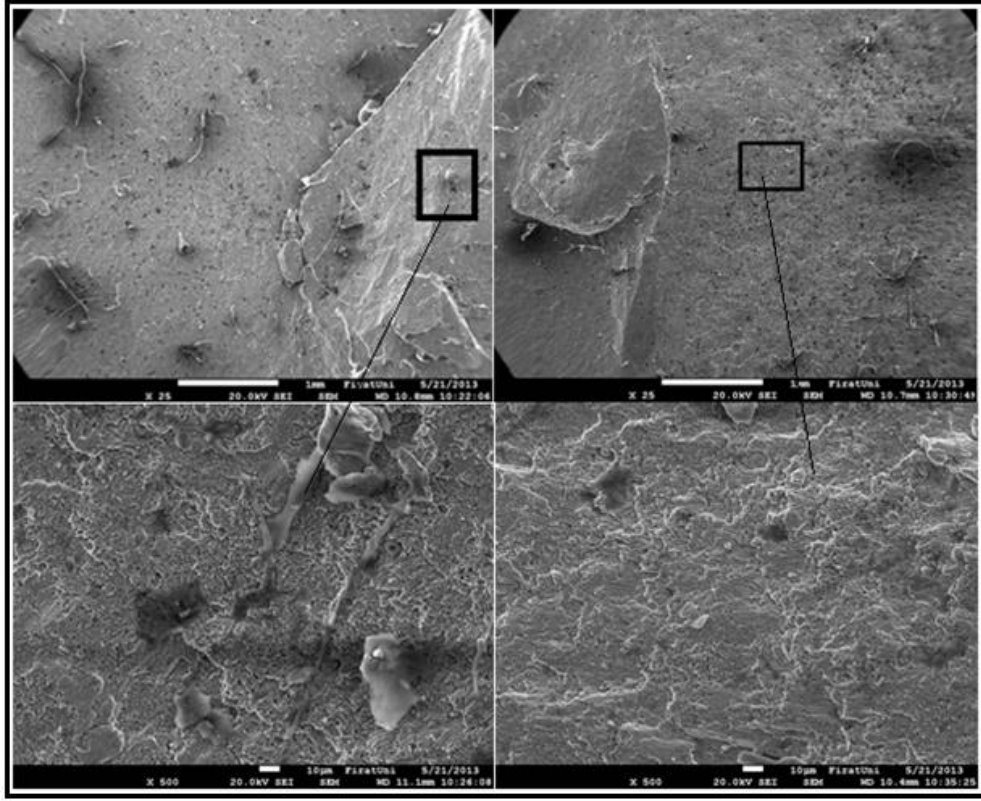
Şekil 5.110. B2 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.111. B2 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 4340 /AISI 4340 ıslah çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7'de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.110'da ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.111'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 16,75516 radyan, kopma anındaki burulma momenti 3,95 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 20,127389 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 1,074049 radyan olarak bulunmuştur.

B2 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 20,127389 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 22,012739 MPa değerine çok yakın bir değerdir. Burulma sonrası numune B1 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. B2 numunesinin burulma dayanımının B1 numunesinin burulma dayanımının yaklaşık iki katıdır. Burulma dayanımındaki bu artış, devir sayısındaki artışa paralel olarak ara kesitten daha fazla miktarda Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlerin dışarı atılmasına bağlanabilir.



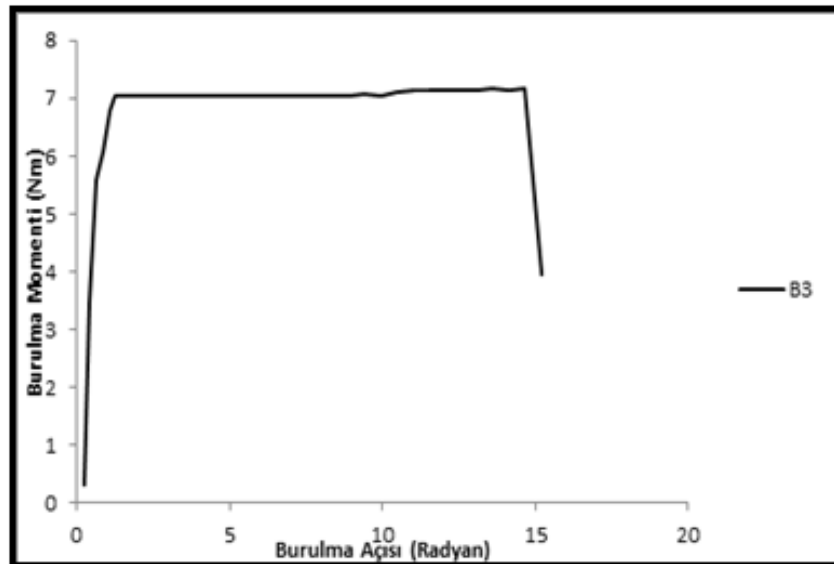
Şekil 5.112. B2 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1000 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen B2 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın B1 numunesine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve B1 numunesinde olduğu gibi sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Yapıda yer yer gevrek kırılmanın göstergesi olan parlak bölgeler mevcuttur. Kırık yüzeyin yapısı genel olarak lifli ve mattır (Şekil 5.112).

5.5.2.3. 1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen B3 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



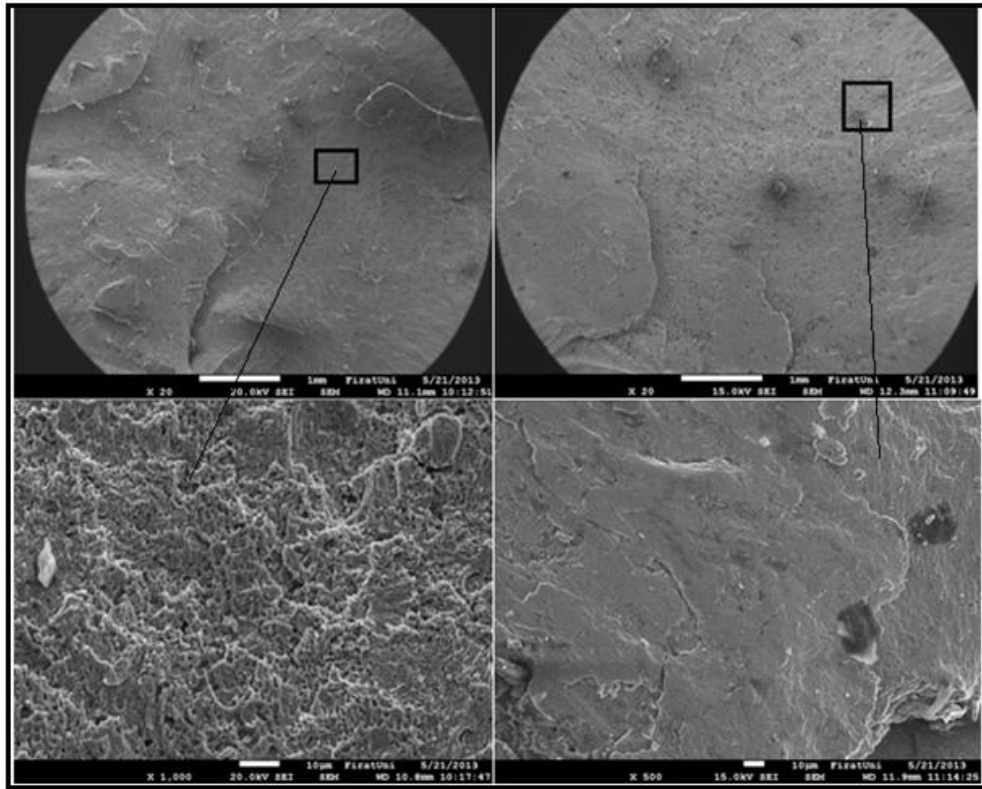
Şekil 5.113. B3 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.114. B3 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 4340 /AISI 4340 ıslah çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.113’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.114’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 15,18436 radyan, kopma anındaki burulma momenti 3,96 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 20,484071 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 0,944277 radyan olarak bulunmuştur.

B3 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 20,484071 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 22,012739 MPa değerine çok yakın bir değerdir. Burulma sonrası B3 numunesi de B1 ve B2 numunelerinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. B3 numunesinin burulma dayanımı değeri B2 numunesinin burulma dayanımı değerine yakın bir değerdir.



Şekil 5.115. B3 no’lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen B3 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın B1 ve B2 numunelerine benzer şekilde kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve

B1 ve B2 numunelerinde olduğu gibi sünek kırılma davranışı görölmüştür. Kırık yüzeyin yapısı genel olarak lifli ve mattır Yapıda yer yer gevrek kırılmanın göstergesi olan çok az miktarda radyal çizgiler mevcuttur (Şekil 5.115).

AISI 4340/AISI 4340 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra yapılan burulma deneyleri incelenmiş ve devir sayısının burulma dayanımı üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Kaynaklı numunelerin hepsinin burulma deneyinin sonucunda kaynağın dışındaki bir bölgeden yani esas malzemeden koptuğu görölmüştür. İncelemeler sonucunda artan devir sayısına paralel olarak numunelerin kopma anındaki kayma gerilmeleri değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzeme dışarı atılmış olur dolayısıyla burulma dayanımı artar. Kopma anındaki en düşük kayma gerilmesi değeri 700 dev/dk devir sayısı ile B1 numunesinde görölmüştür ve en yüksek kayma gerilmesi değeri 1300 dev/dk devir sayısı ile B3 numunesinde görölmüştür. B2 numunesinde bu değer hemen hemen B3 numunesinin kopma anındaki kayma gerilmesi değerine yaklaşmıştır. Bu durum B grubu numuneler için kaynak sırasında kullanılan 1000 dev/dk'lık devir sayısının optimum bir değer olduğunu düşündürmektedir.

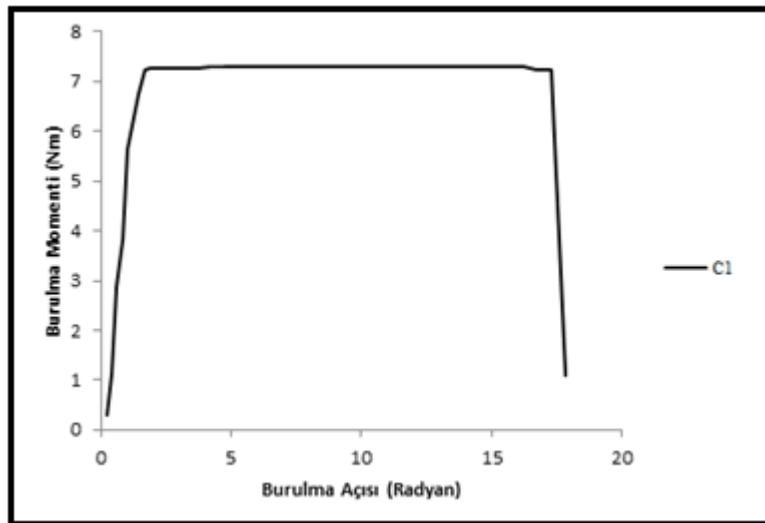
Kırık yüzeyler incelendiğinde B grubu numunelerin hepsinde genel olarak sünek ve bir miktar gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği düşünülmektedir. Her üç numunede de yer yer gevrek kırılma belirtisi olan radyal çizgilere ve parlak yüzeylere rastlanmıştır. Devir sayısı arttıkça sünek davranış özelliği de artmıştır Bu durumun sebebi devir sayısındaki artışa bağlı olarak sıcaklığın artması ve bu sıcaklık artışının etkisiyle malzemenin plastik deformasyon miktarının da artmasıdır.

5.5.3. AISI 420/ AISI 4340 Çelik Çiftinin Burulma Deneyi Sonuçları

5.5.3.1. 700 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C1 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



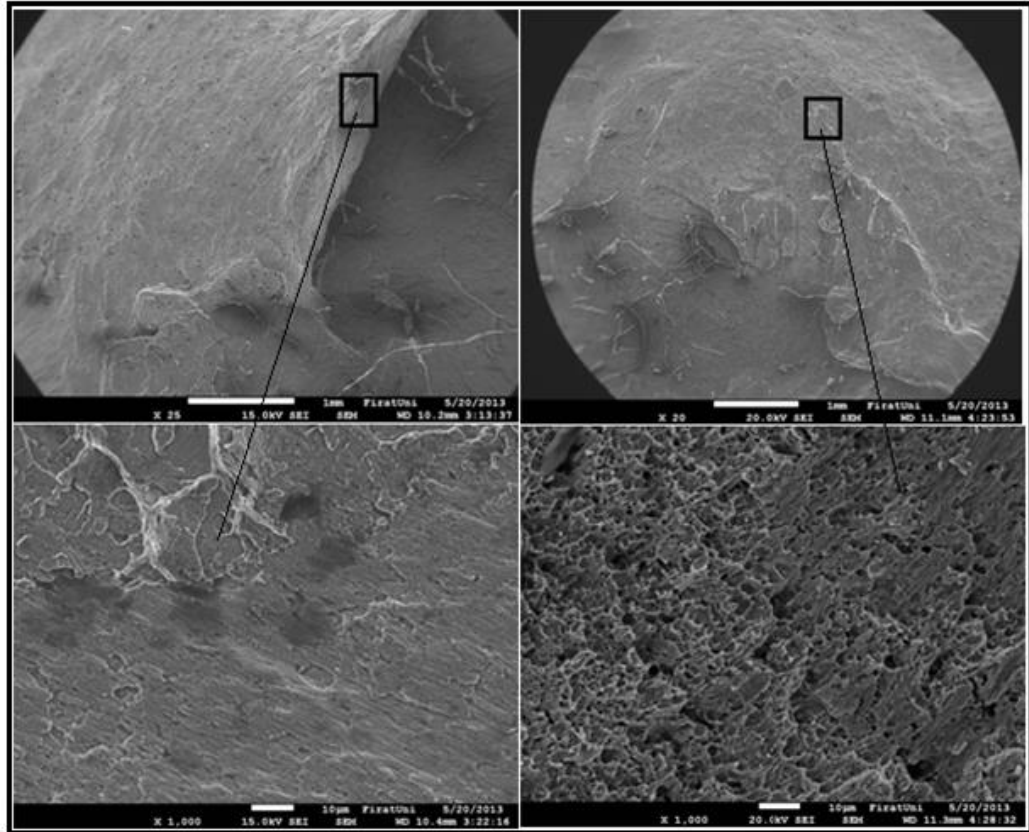
Şekil 5.116. C1 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.117. C1 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

700 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 4340 çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.116’da ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.117’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 17,80236 radyan, kopma anındaki burulma momenti 1,1 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 5,776668 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 0,987911 radyan olarak bulunmuştur.

C1 numunesinin burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 5,776668 MPa olup, bu değer kopmanın gerçekleştiği orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 22,012739 MPa değerinden oldukça düşüktür. Burulma deneyi sonrası C1 numunesi A ve B grubu numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. Kaynak sırasında oluşan Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi bileşiklerin C1 numunesinin burulma dayanımını düşürdüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.118. C1 no’lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

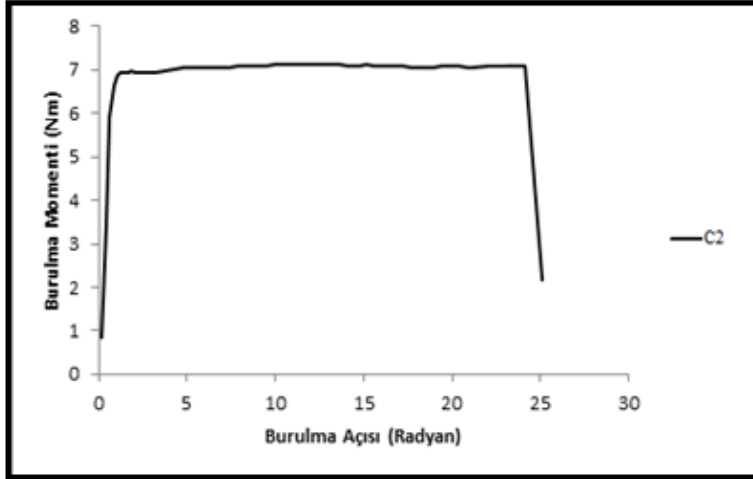
700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen C1 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın A ve B grubu numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesinin

dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunedeki kopma AISI 4340 çeliği tarafında gerçekleşmiştir Bunun sebebi AISI 4340 malzemesinin AISI 420' ye göre daha sert olmasıdır. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve incelemeler sonucunda sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Kırılmış kesitte genelde mat görünümlü lifli bir yapı görülmüştür. Gevrek kırılmanın olduğu bölgelerde kısmen parlak görünümlü ayrılma çizgilerine rastlanmıştır (Şekil 5.118).

5.5.3.2. 1000 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C2 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



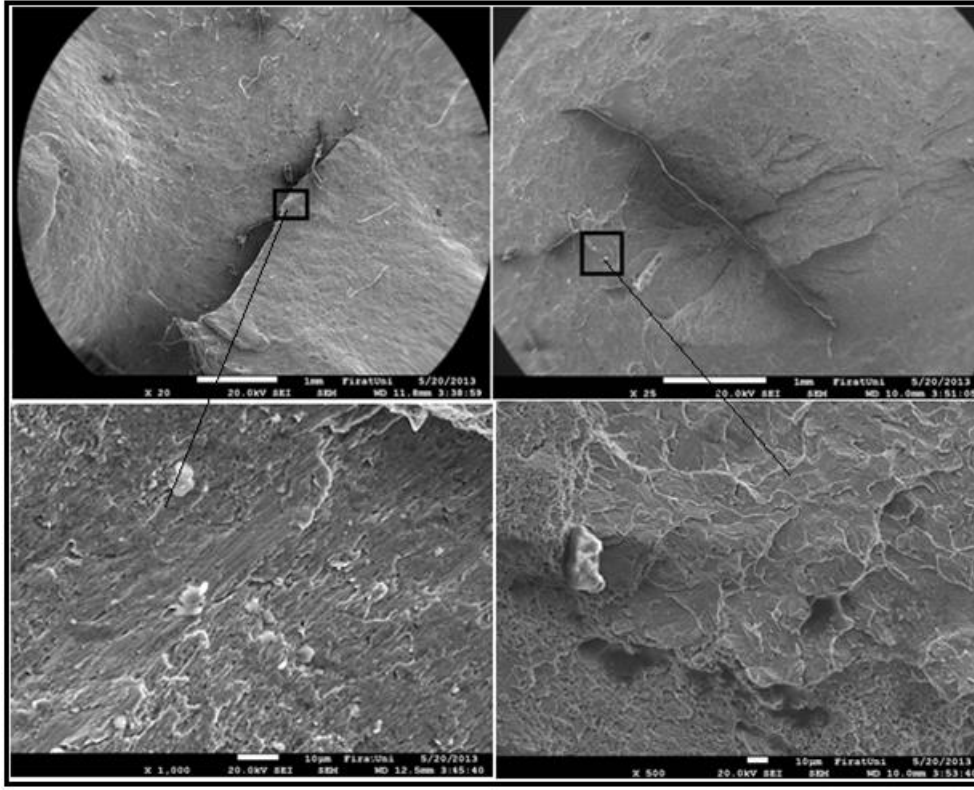
Şekil 5.119. C2 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.120. C2 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

1000 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 4340 çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.119’da ve gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.120’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 25,13274 radyan, kopma anındaki burulma momenti 2,16 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 11,006369 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 1,59068 radyan olarak bulunmuştur.

C2 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 11,006369 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 22,012739 MPa değerinin yaklaşık yarısıdır. Burulma sonrası numune, C1 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. C2 numunesinin burulma dayanımı C1 numunesinin burulma dayanımının yaklaşık iki katıdır. Burulma dayanımındaki bu artış, devir sayısındaki artışa paralel olarak ara kesitten daha fazla miktarda Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlerin dışarı atılmasına bağlanabilir.



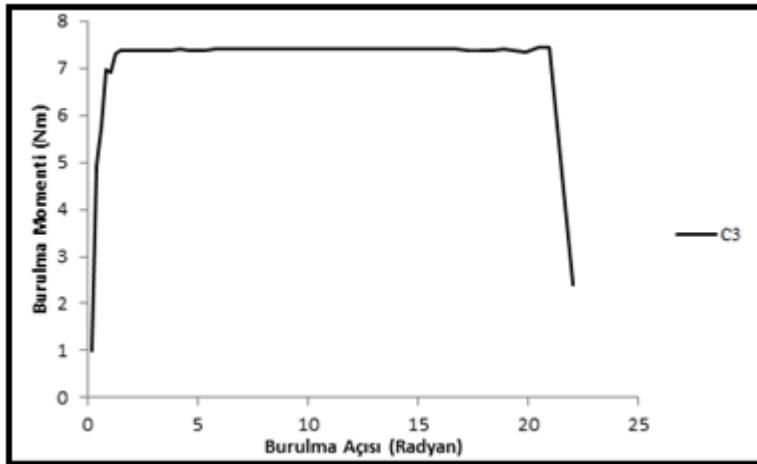
Şekil 5.121. C2 no'lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1000 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen C2 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın C1 numunesinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür. Numunedeki kopma AISI 4340 çeliği tarafında gerçekleşmiştir. Bunun sebebi, AISI 4340 malzemesinin AISI 420' ye göre daha sert olmasıdır. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve numunenin sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Kırılmış kesitte genelde mat görünümlü lifli bir yapı ve gevrek kırılmanın olduğu bölgelerde ise parlak ayrılma çizgilerine rastlanmıştır (Şekil 5.121).

5.5.3.4.1300 dev/dk Devir Sayısı ile Birleştirilen C3 No'lu Numunenin Burulma Deneyi Sonuçları



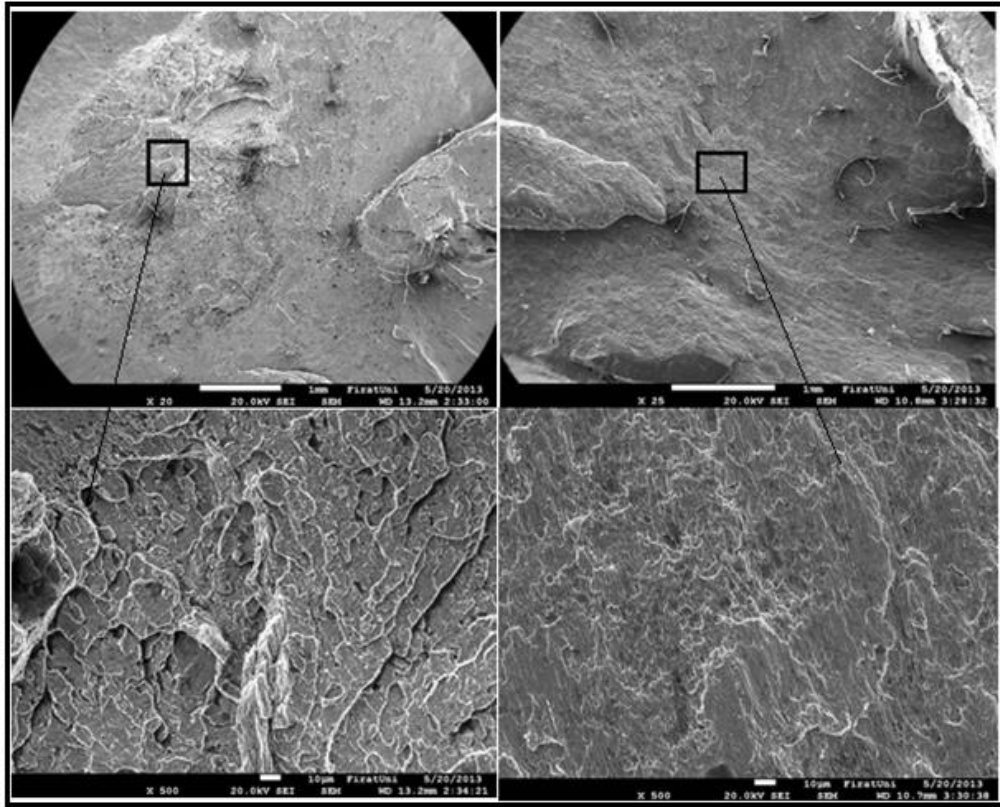
Şekil 5.122. C3 no'lu numuneye ait burulma deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları



Şekil 5.123. C3 no'lu numuneye ait burulma momenti- burulma açısı grafiği

1300 dev/dk devir sayısı, 10 sn sürtünme süresi, 50 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı ve 6 sn yığma sürelerinde birleştirilen AISI 420 /AISI 4340 çelik çiftine uygulanan burulma deneyi sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.7’de, numunelerin kırıldıktan sonraki makro fotoğrafları Şekil 5.122’de ve gerilme–şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.123’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde çelik çiftine ait kopma anındaki burulma açısı 21,99115 radyan, kopma anındaki burulma momenti 2,4 Nm, kopma anındaki kayma gerilmesi 12,229299 MPa, kopma anındaki kayma uzaması ise 1,391845 radyan olarak bulunmuştur.

C3 numunesine ait burulma deneyinde kopma anındaki kayma gerilmesi değeri 12,229299 MPa olup, bu değer orijinal AISI 4340 çeliğinin sahip olduğu 22,012739 MPa değerinden oldukça düşüktür. Burulma sonrası C3 numunesi de C1 ve C2 numunelerinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışından kopmuştur. C3 numunesinin burulma dayanımı C1 numunesinin burulma dayanımı değerine yakındır.



Şekil 5.124. C3 no’lu numunenin burulma deneyi sonunda kırık yüzey SEM fotoğraflar

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen C3 numunesi burulma deneyi sonrası incelenmiş ve kırılmanın C1 ve C2 numunelerinde olduğu gibi kaynak bölgesinin dışında gerçekleştiği görülmüştür Numunedeki kopma yine C1 ve C2 numunelerine benzer

şekilde AISI 4340 çeliği tarafında gerçekleşmiştir. Numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları incelenmiş ve numunenin sünek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Kırılmış kesitin genelinde ve son kopma noktası dediğimiz bölgede mat görünümlü lifli bir yapıya ve gevrek kırılmanın olduğu bölgelerde ise parlak görünümlü ayrılma çizgilerine rastlanmıştır (Şekil 5.124).

AISI 420/AISI 4340 çelik malzeme çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirildikten sonra yapılan burulma deneyleri incelenmiş ve devir sayısının burulma dayanımı üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Kaynaklı numunelerin hepsinin burulma deneyi sonucunda kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu görülmüştür. Tüm numunelerde kopma AISI 4340 çeliği tarafındadır. İncelemeler sonucunda artan devir sayısına paralel olarak numunelerin kopma anındaki kayma gerilmeleri değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzeme dışarı atılmış olur, dolayısıyla burulma dayanımı artar. Kopma anındaki en düşük kayma gerilmesi değeri 700 dev/dk devir sayısı ile C1 numunesinde görülmüştür ve en yüksek kayma gerilmesi değeri ise 1300 dev/dk devir sayısı ile C3 numunesinde görülmüştür. C2 numunesinde bu değer hemen hemen C3 numunesinin kopma anındaki kayma gerilmesi değerine yaklaşmıştır. Bu durum B grubu numuneler de olduğu gibi C grubu numuneler için de kaynak sırasında kullanılan 1000 dev/dk'lık devir sayısının optimum bir değer olduğunu düşündürmektedir.

Kırık yüzeyler incelendiğinde C grubu numunelerin hepsinde genel olarak sünek ve bir miktar da gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği düşünülmektedir. Her üç numunede de yer yer gevrek kırılma belirtisi olan parlak ayrılma çizgilerine rastlanmıştır. Devir sayısı arttıkça sünek davranış özelliği de artmıştır. Bu durumun sebebi, devir sayısındaki artışa bağlı olarak sıcaklığın artması ve bu sıcaklık artışının etkisiyle malzemenin plastik deformasyon miktarının da artmasıdır.

6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

6.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, ilk olarak AISI 420 - AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik çifti (A grubu), sonra AISI 4340 – AISI 4340 ıslah çelik çifti (B grubu) son olarak ise AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik ile AISI 4340 ıslah çelik çifti (C grubu) sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Çalışmalar sırasında, devir sayısı değişken parametre olarak alınmış; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi gibi parametreler sabit tutularak birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirme işleminden sonra, kaynaklı bağlantıların makroyapı ve mikroyapı fotoğrafları, EDS ve X-Ray analizleri değerlendirilmiş ve devir sayısının bağlantı mukavemeti ve dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- A, B ve C grubundaki bütün numuneler sürtünme kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.
- Kaynaklı bağlantıların makro ve mikro fotoğrafları incelendiğinde, tüm gruplardaki numunelerde bağlantı mukavemetini olumsuz etkileyebilecek çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgelere rastlanmamıştır.
- Kaynaklı bağlantıların makro yapı analizlerinde, kaynak profillerinin birbirine benzediği görülmüştür. Tüm numunelerde devir sayısının artması ile birlikte, ara yüzeydeki plastik deformasyon miktarı da artmış ve daha fazla malzeme dışarı atılmıştır (kaynaklı bağlantıların flanş miktarlarında artış).
- Kaynaklı bağlantılardaki boyca kısalma en fazla AISI 4340 tarafında meydana gelmiştir. AISI 4340 numunelerinde, AISI 420 numunelerine göre kısalma miktarının fazla olmasının sebebi, malzemelerin ısı iletim katsayılarına bağlanmıştır.
- 700-1000-1300 dev/dk devir sayıları ile sürtünme kaynağının yapıldığı A grubu numunelerin mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde, artan devir sayısına bağlı olarak, aşırı deformasyon bölgesinin genişlediği görülmüştür. Bu durum, artan devir sayısı ile malzemenin aynı sürede daha fazla sürtünmesine ve ısı girdisinin artmasına bağlanmıştır. Kısmen deformasyona uğramış bölgenin, artan devir sayısına bağlı olarak daraldığı gözlenmiştir. Deformasyona uğramamış bölgelerde de yapı orijinal iç halini korumuştur.

- A grubundaki numunelerin SEM mikroskopi incelemeleri, EDS analizi ve X-Ray analizleri incelemelerinde tüm numunelerin kaynak arayüzeylerinde Fe_3C ve Cr_7C_3 gibi karbürlerin oluştuğu belirlenmiştir.
- 700-1000-1300 dev/dk devir sayıları ile sürtünme kaynağının yapıldığı B grubu numunelerin mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde, artan devir sayısı ile birlikte ısı ve basınç dağılımının daha homojen olduğu dolayısıyla bağlantı kalitesinin de arttığı sonucuna varılmıştır ve yine A grubu numunelerinde olduğu gibi artan devir sayısına bağlı olarak aşırı deformasyon bölgesinin genişlediği görülmüştür. Bu durum, malzemenin aynı sürede daha fazla sürtünmesine ve ısı girdisinin artmasına bağlanmıştır. Kısmen deformasyona uğramış bölge A grubuna benzer şekilde devir sayısının artmasına bağlı olarak daralmıştır.
- B grubundaki numunelerin SEM mikroskopi incelemeleri, EDS analizi ve X-Ray analizleri incelemelerinde ITAB'da Fe_3C , Fe_7C_3 ve Cr_7C_3 gibi karbürlerin oluştuğu belirlenmiştir.
- 700-1000-1300 dev/dk devir sayıları ile sürtünme kaynağının yapıldığı C grubunda farklı malzeme çifti kullanılmıştır, Kaynaklı birleştirmelerde farklı malzeme grubu kullanıldığından birleşme arayüzeyinin her iki tarafında farklı mikroyapıların ortaya çıktığı ve A ile B grubu numunelerde olduğu gibi artan devir sayısına bağlı olarak aşırı deformasyon bölgesinin genişlediği görülmüştür.
- C grubundaki numunelerin SEM mikroskopi incelemeleri, EDS analizi ve X-Ray analizleri incelemelerinde ITAB'da Fe_3C , Fe_5C_2 , Cr_7C_3 , Fe_7C_3 , ve FeNi gibi bileşiklerin oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak arayüzeylerinden alınan EDS analizi sonuçlarına göre, kaynak arayüzeyine her iki malzemeden de geçişler olmuştur. Bu element geçişlerinin C3 numunesinde daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, devir sayısının artması ile birlikte sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla daha fazla elementin difüze olmasına bağlanmıştır.
- Her üç gruptaki kaynaklı bağlantıların mikrosertlik incelemelerinde, bütün kaynaklı bağlantıların benzer sertlik profiline sahip oldukları ve kaynak arayüzeyinde sertliğin maximum değerde olduğu, esas metale yaklaştıkça sertlik değerinin düşerek esas metalle aynı değere ulaştığı görülmüştür. Devir sayısı arttıkça, her üç gruptaki numunelerde de mikrosertlik değerleri artmıştır.

- AISI 420 çeliğinin ortalama sertlik değerinin 186 vickers olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. A grubu numuneler içinde en yüksek sertlik değeri, 645 vickers ile 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen A3 numunesinde görülmüştür.
- AISI 4340 çeliğinin ortalama sertlik değeri 201 vickers olarak ölçülmüştür. B grubu numuneler içinde en yüksek sertlik değeri, 716 vickers ile 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen B3 numunesinde görülmüştür.
- Farklı malzemelerin birleştirildiği C grubunda, en yüksek sertlik değeri 778 vickers ile 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen C3 numunesinde görülmüştür. Bu gruptaki numunelerde de kaynak arayüzeyinde sertlik değerleri maximumdur. Kaynak arayüzeyinden esas malzemeye yaklaştıkça her iki malzemede de sertlik değerleri düşmüş ve ana malzemelerin sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
- Kaynaklı bağlantıların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde A, B ve C grubundaki tüm numunelerde devir sayısının artması ile birlikte çekme gerilmeleri değerlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzemenin dışarı atılmasına ve böylece ara yüzeyde malzemenin mukavemetini olumsuz etkileyecek bileşiklerin de dışarı atılmasına bağlanmıştır. Ayrıca devir sayısının artmasıyla birlikte, daha fazla miktarda martenzitin temperlendiği ve bu durumun da çekme dayanımını arttırdığı düşünülmüştür.
- AISI 420 çeliğinin çekme mukavemeti yapılan çekme deneyi sonunda 680,328 MPa olarak bulunmuştur. A grubu numunelerinde en yüksek çekme mukavemeti 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen A3 numunesinde 670,06 MPa olarak bulunmuştur. Bu gruptaki numunelerin hepsinin kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu ve koni-çanak tipi kırılma olduğu görülmüştür. Kırık yüzeyler incelendiğinde A1 ve A2 numunelerinde sünek ve gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği, A3 numunesinde ise sadece sünek kırılmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- AISI 4340 çeliğinin çekme mukavemeti, 658,721 MPa olarak bulunmuştur. B grubundaki numunelerin hepsinin çekme deneyinin sonucunda kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu ve genel olarak sünek ve bir miktar da gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Farklı malzemelerin birleştirildiği C grubunda, en yüksek çekme mukavemeti 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen C3 numunesinde 592,47 MPa olarak bulunmuştur.

Kaynaklı numunelerin hepsi A ve B grubu numunelere benzer şekilde çekme deneyi sonucunda kaynağın dışındaki bir bölgeden kopmuştur ve bütün C grubu numunelerde kopma AISI 4340 tarafında gerçekleşmiştir. Bu durum AISI 4340 malzemesinin AISI 420' ye göre daha sert olması ile açıklanmıştır. Kırık yüzeyler incelendiğinde C1 numunesinde yoğun olarak gevrek ve bir miktar sünek kırılma davranışı görülürken C2 ve C3 numunelerinde bunun tam tersi görülmüştür.

- Kaynaklı bağlantıların burulma deneyi sonuçları incelendiğinde, A, B ve C grubundaki tüm numunelerde devir sayısının artması ile birlikte burulma dayanımlarında artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum çekme deneyinde olduğu gibi artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyden sıcaklığın etkisi ile daha fazla miktarda malzemenin dışarı atılmasına ve böylece ara yüzeyde malzemenin mukavemetini olumsuz etkileyecek bileşiklerin de dışarı atılmasına bağlanmıştır.
- AISI 420 çeliğinin burulma dayanımı yapılan burulma deneyi sonunda 15,859580 MPa olarak bulunmuştur. A grubu numunelerinde en yüksek burulma dayanımı 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen A3 numunesinde 14,420382 MPa olarak bulunmuştur. Bu gruptaki numunelerin hepsinin kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu ve genelde sünek olarak kırıldığı tespit edilmiştir.
- AISI 4340 çeliğinin burulma dayanımı yapılan burulma deneyi sonunda 22,012739 MPa olarak bulunmuştur. B grubu numunelerinde en yüksek burulma dayanımı 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen B3 numunesinde 20,484071 MPa olarak bulunmuştur. Kırık yüzeyler incelendiğinde, B grubu numunelerin hepsinde genel olarak sünek ve bir miktar gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği düşünülmüştür.
- C grubundaki numunelerde, en yüksek burulma dayanımı 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen C3 numunesinde 12,229299 MPa olarak bulunmuştur. Bu gruptaki numunelerin hepsinin burulma deneyinin sonucunda kaynağın dışındaki bir bölgeden koptuğu görülmüştür. Tüm numunelerde kopma AISI 4340 çeliği tarafında gerçekleşmiştir. Kırık yüzeyler incelendiğinde C grubu numunelerin hepsinde genel olarak sünek ve bir miktar da gevrek kırılmanın birlikte gerçekleştiği düşünülmüştür.
- Burulma deneyi sonunda B ve C grubunda, 1000 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen numunelerde burulma dayanımı sonucunun 1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen numunelerin burulma dayanımları ile yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Bu sonuç ile hem B grubu hem de C grubunda kaynak sırasında kullanılan 1000 dev/dk'lık devir sayısının optimum bir değer olduğu kanısına varılmıştır.

6.2. Öneriler

- Çalışmada ulaşılan optimum devir sayısı esas alınarak AISI 420 ve AISI 4340 çelikleri sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi gibi parametreler tek tek veya ikili gruplar halinde seçilerek birleştirilebilir.
- AISI 420 ve AISI 4340 çelikleri uygun ara tabaka kullanılarak birleştirilebilir.
- Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 420 ve AISI 4340 çelikleri diğer kaynak yöntemleriyle birleştirilerek elde edilen mekanik dayanım değerleri karşılaştırılarak bu malzeme çifti için en uygun kaynak yöntemi tespit edilebilir.
- Bu malzeme çifti için burulma dayanımı hesaplanırken farklı burulma deneyi parametreleri kullanılıp sonuçlar karşılaştırılarak optimum değerler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. **Anık, S.**, 1991. Kaynak tekniği el kitabı, İstanbul.
2. **Anık, S.**, 1983. Kaynak Teknolojisi El Kitabı, İTÜ Makine Fakültesi.
3. **Yılmaz, M.**, 1993. Farklı takım çeliklerinin sürtünme kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
4. **Tülbentçi, K., Yılmaz, M.**, 1989, “Farklı takım çeliklerinin katı hal kaynağı”, *II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı*, İTÜ, 303-314, İstanbul.
5. **Özdemir, N.**, 2002. Tane küçültülmüş düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
6. **Sönmez, F.**, 2007. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş yüksek hız çeliği (HSS) ve AISI 1040 çeliklerinde mukavemet ve metalürjik özelliklerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
7. **Ellis, C.R.G.**, 1977. Friction Welding, Some Recent Applications of Friction Welding, *Weld.And Metal Fab.*, 207-213
8. **Meriç, C., Köksal, N.S., Erdoğan, M.T.**, 2008. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı çeliklerde kaynak bölgesinin incelenmesi, CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu, *Teknik Bilimler Dergisi*, Cilt:2 Sayı:10, Manisa.
9. **Taşkın M., Çay V.V., Özdemir N.**, 2005. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 430/ Ç 1010 çelik çiftinin arayüzey mikroyapı değerlendirmesi, *Teknoloji*, Cilt 8, Sayı 1, 65-70.
10. **Uzkut, M., Ünlü, B.S., Akdağ, M.**, 2006. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş yüksek alaşımlı iki farklı çeliğin mikroyapı ve mekanik özellikleri, *Teknolojik araştırmalar: MTED* (6), 11-17.
11. **Çalgülü, U., Orhan, A., Gür, A.K.**, 2007. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 420/ AISI 1010 çelik çiftinde çevresel hızın mikroyapı özelliklerine etkisi, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilgisi Dergisi*, 19 (4), 583-592.
12. **Şahin, M., Akata, H.E.**, 2003. Joining with friction welding of plastically deformed steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 239-246.

13. **Sathiya, P., Aravindan, S., Noorul Haq, A.,** 2008. Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints, *Materials and Design*, 29, 1099-1109
14. **Özdemir, N., Sarsılmaz, F., Haşçalık, A.,** 2007. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel, *Materials and Design*, 28, 301-307
15. **Şahin, M., Akata, H.E., Gülmez, T.,** 2007. Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding, *Materials Characterization*, 58, 1033-1038.
16. **Özdemir, N.,** 2005. Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed, *Materials Letters*, 59, 2504-2509
17. **Şahin, M.,** 2005. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 202-210.
18. **Kaluç, E.,** 2004. Kaynak teknolojisi el kitabı, Cilt-1, Ergitme esaslı kaynak yöntemleri.
19. Metalişleri45.webstarts.com
20. www.teknikport.com
21. www.youtube.com
22. Argoncu.wordpress.com
23. **Ağca, E.,** 2010. Doğrusal olmayan takı yoluyla alüminyum alaşımlı sac malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi ve kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin irdelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
24. **Tülbentçi, K.,** 1993. Gazaltı kaynağı, MIG-MAG kaynağı İTÜ kimya-metalürji makinası, TMMOB makina mühendisleri odası arşivi.
25. **Kaluç, E.,** 1993. Lazer ışını ile kaynak ve kesme, diğer kaynak yöntemleri, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi.
26. **Uzun, H.,** 1991. Elktro-Curuf kaynak metodu ve yüzey kaplama, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
27. www.cgcrail.com
28. MEGEP, 2007. Metal teknolojisi, elektrik direnç kaynağı, Ankara.

29. **Anık, S., Vural, M.,** 1993. Özel kaynak yöntemleri, İTÜ makine fakültesi.
30. **Gül, A.,** 2006. Farklı metalsel malzemelerin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
31. **Çelik, Ö.,** 2008. Sürtünme kaynağı yapılmış farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
32. **Marr, S.,** 2001. Friction welding into the future, welding design and fabrication, 74 (8):34-36.
33. **Duffin, F.D., Bahrani, A.S.,** 1973. Friction behaviour of mild steel of friction welding, 57-73.
34. **Karabulut, A., Taşgetiren, S.,** 2004. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi tasarım ve imalatı, makine teknolojileri elektronik dergisi, 38.
35. **Ünal, E.,** 2003. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 4340 çeliği ile paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
36. **Bahrani, A.S., Grassland, B.,** 1976. Friction welding, CME, 61-66.
37. **Ziyal, L.,** 1997. Millerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesinde uç formu-kaynak parametresi ilişkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
38. **Çil, E.,** 2009. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş paslanmaz çelik ve bakır parçaların kaynak bölgesi özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
39. **Şahin, M.,** 2001. **Sürtünme kaynağı ile birleştirmede parça boyutları ve plastik** şekil değiştirmenin etkilerinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
40. <http://www.thompson-friction-welding.co.uk/about.html>
41. **Kuruzar, D.L.,** 1979. Joint deign fort he friction welding process, *Welding Journal*, 31-35.
42. **Şahin, M., Akata, H.E., Özel, K.,** Soğuk şekil verilmiş alüminyum malzemelerin sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma, kaynak teknolojisi beşinci ulusal kongresi.

43. **Çelik,İ.**, 1997. Alüminyum ve bakır çubukların sürtünme kaynağı üzerine bir araştırma, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
44. <http://www.mtiwelding.com>, *Manufacturing Technology*, 2011
45. **Gourd, L.M.**, 1996. Kaynak teknolojisinin esasları, London (Çeviri Prof.Dr. İ.B. Eryürek, Prof.Dr. H.O. Bodur, Prof.Dr. A.Dikicioğlu, İstanbul).
46. <http://www.teamafv.com>
47. **Sunay, Y.T.**, 2005. Microstructure and mechanical properties of friction welded cost and forget steel bars, *Yüksek Lisans Tezi*, Boğaziçi üniversitesi, İstanbul.
48. **Gürleyik, M.Y.**, 1989. Sürtünme kaynağı yapılan döküm alaşımları, İTÜ makine fakültesi, *II. Ulusal kaynak sempozyumu*, İstanbul, 231-241.
49. **Gürleyik, M.Y.**, 1977. Sürtünme kaynağı, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 16 (241).
50. **Dede, A., Soy, U., Aslanlar, S.**, 2002. Sürtünme kaynak yöntemi, Sakarya üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (1), Sakarya.
51. **Korkut, M.H.**, 1997. Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
52. **ASKAYNAK**, 2006. Çelikler için elektrod seçimi, gazaltı kaynağı, paslanmaz çeliklerin kaynağı, İstanbul.
53. **Alptelkin, A.**, 2006. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin paslanmaz çeliklere uygulanabilirliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
54. **Kayır, Y.Z.**, 2003. Türkiye paslanmaz çelik üretebilir mi?, *Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi*, 98-101, Zonguldak.
55. **Yüksel, M.**, 2002. Malzeme bilgisi, cilt 1, yayın no:2002/271-1, TMMOB makine mühendisleri odası, 547, Ankara.
56. **Tülbentçi, K.**, 1990. MIG-MAG eriyen elektrot ile gazaltı kaynağı, Gedik Holding A.Ş. yayınları, 168, İstanbul.
57. **Türkyılmazoğlu, A.**, 2006. Dupleks, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

58. **Odabaş, C.**, 2004. Paslanmaz çelikler, temel özellikleri, kullanım alanları, kaynak yöntemleri, Askaynak, 2.baskı Tavaslı matbaası, İstanbul.
59. **Smith, W.F.**, 2000. Paslanmaz çelikler, mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, Bölüm 5, cilt 1, çeviri: Erdoğan, M., 169-214, Ankara.
60. **Aran, A., Temel, M.A.**, 2004 paslanmaz çelik yassı mamul üretimi kullanımı standartları, *Sarıtaş Teknik Yayın* No:1 113 s., İstanbul.
61. **Krysiak, K. F., Grubb, J. F., Campbell, R. D.**, 1993. Selection of Wrought Ferritic Stainless Steel, *ASM Metal Handbook*, V.6, 443-454.
62. **Mohandas, T., Madhusudhan, R., Naveed, M.**, 1999. A comparative evaluation of gas tungsten and shielded metal arc welds of a ferritic stainless steel. *J. Mater. Proc. Tech.*, 133-140.
63. ASM International, 1980, properties and selection; stainless steel, tool materials and specials-purpose metals, ASM, 123s. Ohio.
64. **Brooks, J.A., Lippold, J.C.** 1993. Selection of wrought austenitic stainless steel, *ASM Metal Handbook*, V.56, 456-469.
65. **Yıldırım, M. M.**, 1984. Malzeme Bilgisi, F.Ü. Müh. Fak. Mak. Müh. Böl., Yayın No: 61
66. **Noble, D. N.**, 1993. Selection of Wrought Duplex Stainless Steel, *ASM Metal Handbook*, V.6, 471-479.
67. **Polland, B.**, 1993. Selection of Wrought Precipitation-Hardening Stainless Steel, *ASM Metal Handbook*, V.6, 482-493.
68. **Davis, J. R.**, 1993. Selection of Wrought Martensitic Stainless Steel, *ASM Metal Handbook*, V.6, 432-441.
69. <http://www.celmercelik.com>.
70. <http://mumintutar.home.uludag.edu.tr/otomlz/12.pdf>.
71. **Savaşkan, T.**, 2009. Malzeme bilgisi ve muayenesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon.
72. <http://www.muhsak.ktu.edu.tr/metalurji/foylar/cekme%20Deneyi.pdf>.
73. <http://izmitemlmetal.com>.
74. <http://www.muhsak.ktu.edu.tr/metalurji/foylar/centik%20Darbe%20Deneyi.pdf>
75. **Bakioğlu. M.**, cisimlerin mukavemeti, Cilt-1 beta yayınları, İstanbul teknik üniversitesi , İstanbul.

76. Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F.,1996. metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İ.T.Ü. rektörlüğü, sayı 1580, ISBN 975-561-098-7, üçüncü baskı.
77. <http://tez.sdu.edu.tr/Tezler/TF00956.pdf>.
78. Prof.Dr.Levon Capan Metallere Plastik şekil verme.
79. <http://www.belgeler.com/blg/a2c/burulma-projesi>.
80. **Kırık, İ.**, 2012. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1040/AISI 304L çelik çiftinin elektrokimyasal korozyon davranışının araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Elazığ'da doğdum. İlköğretim ve lise öğrenimimi Elazığ'da tamamladım. 2005 yılında girdiğim Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünden 2009 yılında fakülte birincisi olarak mezun oldum. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji Eğitimi Ana Bilim Dalı, Kaynak Bilim Dalı'nda doktora eğitimime başladım. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandım. Halen Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktayım. Evli bir kız çocuk annesiyim.