

**SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ
AISI 2205 / AISI 1020 MALZEME ÇİFTİNİN
MİKROYAPI VE YORULMA DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

Serdar MERCAN

Doktora Tezi

**Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR**

MART-2013

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 2205 / AISI 1020 MALZEME
ÇİFTİNİN MİKROYAPI VE YORULMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Serdar MERCAN

(08222203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Şubat 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Mart 2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nuri ORHAN (F.Ü)

Doç. Dr. Sedat KOLUKISA (D.Ü)

Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK (F.Ü)

Doç. Dr. Mustafa TAŞKIN (F.Ü)

MART-2013

ÖNSÖZ

Çalışmalarımın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında sağladığı büyük katkılardan dolayı saygıdeğer hocam, Sayın Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR' e sonsuz teşekkür ederim.

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi öğretim üyeleri ile birlikte bu tez çalışmasını proje kapsamında maddi olarak destekleyen FÜBAP ve tüm üniversite çalışanlarına, aynı zamanda laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Bilal TIRNAKÇI, Sinan AYDIN, İhsan KIRIK, Ahmet YÜCEL ve Mehmet KELEŞ ile tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca bugünlere gelmemi sağlayan babam ve anneme, her zaman yanımda bana destek olan eşim ve çocuklarıma sevgilerimi ve sonsuz şükranlarımı sunarım.

Serdar MERCAN
Elazığ - 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIV
SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ	XVI
1. GİRİŞ	1
2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ	3
3. TEMEL BİLGİLER	11
3.1. Kaynak İşlemi ve Kaynak Yöntemleri	11
3.1.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri	11
3.1.2. Sürtünme Kaynağı	12
3.1.2.1. Sürtünme	12
3.1.3. Sürtünme Kaynağının Mekanizması	14
3.1.4. Sürtünme Kaynak Makinaları	16
3.1.5. Sürtünme Kaynağı Yöntemleri	17
3.1.5.1. Enerji Kaynağına Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri	18
3.1.5.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	18
3.1.5.1.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	19
3.1.5.1.3. Kombine Sürtünme Kaynak Yöntemi	21
3.1.5.2. Hareket Şekline Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri	22
3.1.6. Sürtünme Kaynağı Parametreleri	23
3.1.6.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Parametreleri	24
3.1.6.1.1. Çevresel Hız	24
3.1.6.1.2. Sürtünme Basınç Kuvveti	25
3.1.6.1.3. Sürtünme Süresi	27
3.1.6.1.4. Yığma Basıncı	27
3.1.6.1.5. Yığma Süresi	30
3.1.6.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağında Kaynak Parametreleri	31

3.1.7. Malzeme Özelliklerinin Sürtünme Kaynak Kabiliyetine Etkisi	31
3.1.8. Sürtünme Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Özellikleri	34
3.1.9. Uygulama Alanları	36
3.1.9.1. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrilere	36
3.1.9.2. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzeme Türleri	37
3.1.9.3. Endüstride Uygulama Alanları.....	37
3.1.10. Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları.....	40
3.1.10.1. Avantajları.....	40
3.1.10.2. Dezavantajları	41
3.2. Paslanmaz Çelikler	41
3.2.1. Paslanmaz Çelik Türleri	42
3.2.1.1. Austenitik Paslanmaz Çelikler	42
3.2.1.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	43
3.2.1.3. Martenitik Paslanmaz Çelikler	44
3.2.1.4. Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler	45
3.2.1.5. Dupleks Paslanmaz Çelikler	45
3.2.2. Paslanmaz Çeliklerde İyiyapı.....	48
3.2.3. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Termofiziksel Özellikleri	50
3.2.4. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri.....	51
3.2.5. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Edilebilirliği	52
3.2.5.1. Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Edilebilirliği.....	53
3.3. Yorulma Olayı	56
3.3.1. Yorulma Çatlağı Oluşumu ve İlerlemesi ile Meydana Gelen Yorulma Kırılması.....	58
3.3.1.1. Çatlak Oluşumu.....	58
3.3.1.2. Yorulma Çatlağının İlerlemesi.....	59
3.3.1.3. Yorulma Kırılması.....	60
3.3.1.4. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma;	61
3.3.1.5. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Çatlakının İlerlemesi	62
3.3.2. Yorulma Deney Türleri ve Yorulma Deney Cihazları	63
3.3.2.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi:	63
3.3.2.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi	64
3.3.2.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	65
3.3.2.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	66
3.3.3. Yorulma Deneyi ile İlgili Terimler	67

3.3.3.1. S – N Diyagramı (Wöhler Diyagramı);	69
3.3.3.2. Yorulma Sınırı.....	70
3.3.4. Yorulma Deneyinin Yapılışı	71
3.3.5. Yorulma Deney Numuneleri.....	72
3.3.5.1. Dairesel Kesitli Numuneler.....	73
3.3.5.2. Dikdörtgen Kesitli Numuneler	73
3.3.6. Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler	74
3.3.6.1. Yüzey Özelliklerinin Etkisi.....	75
3.3.6.2. Malzeme Cinsinin, Bileşiminin ve Yapısının Etkisi	75
3.3.6.3. Gerilmelerin Etkisi	76
3.3.6.4. Çentik Etkisi.....	77
3.3.6.5. Çevrenin ve Korozyonun Etkisi	77
3.3.6.6. Sıcaklığın Etkisi	78
3.3.6.7. Frekansın (Deney Hızının) Etkisi.....	79
3.3.6.8. Artık Gerilmeler	79
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	80
4.1. Çalışmanın Amacı.....	80
4.2. Kaynak Öncesi İşlemler	80
4.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	80
4.2.2. Sürtünme Kaynak Numunelerinin Hazırlanması	81
4.2.3. Sürtünme Kaynak Tezgâhı	81
4.2.4. Sürtünme Kaynak Parametreleri	83
4.3. Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler	84
4.3.1. Metalografik İncelemeler.....	84
4.3.2. Mikrosertlik Analizi	85
4.3.3. Çekme Deneyi.....	86
4.3.4. Döner Eğmeli Yorulma Deneyi	87
5. DENEY SONUÇLARI ve YORUMLANMASI	92
5.1. Kaynaklı Numunelerin Makroskobik Değerlendirilmesi	92
5.1.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri.....	95
5.1.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri....	100
5.1.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri....	105
5.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirilmesi.....	110
5.2.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin SEM, EDS ve X-Ray Analizleri.....	113

5.2.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin SEM ve X-Ray Analizleri	121
5.2.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin SEM ve X-Ray Analizleri	127
5.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	135
5.3.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	136
5.3.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	139
5.3.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	141
5.4. Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özelliklerine Ait Sonuçlar	144
5.4.1. Çekme Test Sonuçları	144
5.4.1.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları	150
5.4.1.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları	158
5.4.1.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları	165
5.4.2. Yorulma Deney Sonuçları	174
5.4.2.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deney Sonuçları	178
5.4.2.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deney Sonuçları	186
5.4.2.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deney Sonuçları	192
6. GENEL SONUÇLAR	201
KAYNAKLAR	205
ÖZGEÇMİŞ	211

ÖZET

Farklı bileşime sahip iki metalik malzemenin geleneksel ergitme yöntemleri ile birleştirilmesi güç ve problemlidir. Ayrıca, metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi durumunda, birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim ve işlem şartlarına bağlı olarak malzeme ve yerel geometrik etkilerin oluşturduğu süreksizliklerde meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte kaynaklı bağlantılarda oluşan hasarlar incelendiğinde, büyük çoğunluğunun yorulma zorlanmaları ile kaynak bölgesinden başlayarak meydana geldiği bilinmektedir. Bu nedenle kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının tespit edilip uygun parametrelerle imalat yapılması özel önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın hedefi; kendi sınıfında en yaygın kullanım alanına sahip AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik ile kaynak kabiliyeti yüksek ve aynı zamanda uygun fiyat avantajı sunan düşük karbonlu AISI 1020 çelik çifti farklı işlem parametreleri kullanılarak katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Elde edilen bu kaynaklı bağlantılara döner eğmeli yorulma testi ve çekme testi uygulanarak hasar süreçlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde ortaya çıkan olumsuzlukları minimize etmek için gerekli işlem parametreleri optimize edilmiştir. Mikroyapı ve mekanik test sonuçları, literatür ışığında değerlendirilerek üretim parametrelerinin bu iki malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine olan etkileri incelendiğinde; uygun seçilmiş devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süreleri kullanılarak kaynak kalitesini artırmak mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde güncel çalışmanın literatürdeki yeri ve öneminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde sürtünme kaynak yöntemi, paslanmaz çelikler ve metalik malzemelerde yorulma olayı hakkında genel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışma yöntemi ele alınmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışma sonuçları incelenmiş ve yorumları yazılmıştır. Altıncı bölümde genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Kaynağı, AISI 2205, Dubleks Paslanmaz Çelikler, AISI 1020, Karbon Çeliği, Yorulma Dayanımı, Mikroyapı

SUMMARY

The Investigation of Microstructure and Fatigue Behavior of Friction Welded AISI 2205/AISI 1020 Steel Couple

Uniting of the conventional fusion methods of the two metallic materials having different compound is difficult and problematic. Furthermore, on condition of uniting with fusion welding methods of the metallic materials, constitutional transformation occurring in the uniting area and depending on the process conditions higher stresses occurring in the transitories generated by material and the locational geometric factors play important roles in the damage period of welded joints. Besides, majority of the damages is known that is occurred by starting from the welding area with fatigue strength, when the damage occurring in the welded joints is examined. Therefore, determination of fatigue strengths of the welded joints and production with appropriate parameters have an special importance.

The aim of this study; AISI 2205 duplex stainless steel which has widest usage area in its own category and, both higher welding capability and lower carbonaceous AISI 1020 providing with affordable price advantage is combined by using different continuous drive friction welding which is one of the solid-state methods. Examination of the damage periods is aimed by being implemented fatigue bending test and pulling test to these acquired-welded joints. Besides, necessary process parameters are optimized for minimizing negatives occurring in the damage period of the welded joints. When microstructure and mechanic test results by determining on the light of literature, on the effects of friction welding of these two material couples of production parameters with combinability is examined, it can be possible to increase the welding quality by being used the convenient chosen rotation speed, friction pressure, and friction times.

In the first chapter of this study, it was made introduction to the subject. In the second chapter, the place and importance in the literature of the actual study were mentioned. In the third chapter, general informations were given about friction welding method, stainless steels, and fatigue in the metallic materials. In the fourth chapter, experimental studying method was examined. In the fifth chapter, the results of the experimental studying were examined and their comments were written. In the sixth chapter, general results and recommendations were given.

Key Words: Friction Welding, AISI 2205, Duplex Stainless Steels, AISI 1020, Carbon Steel, Fatigue Strength, Microstructure

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Görünür ve gerçek temas alanları	13
Şekil 3.2. Yükün zamana göre uygulanması durumunda A_r ’ nin değişimi	14
Şekil 3.3. Sürtünme kaynağı işlem basamakları.....	14
Şekil 3.4. Sürtünme kaynak makinası ve donanımı.....	17
Şekil 3.5. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterilişi	18
Şekil 3.6. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri	19
Şekil 3.7. Volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterilişi	19
Şekil 3.8. Volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri	20
Şekil 3.9. Kombine sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterilişi	21
Şekil 3.10. Kombine sürtünme kaynak yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri ..	22
Şekil 3.11. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı	22
Şekil 3.12. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı	23
Şekil 3.13. Farklı kaynak parametrelerinin kullanılması ile ITAB’ da oluşan değişiklikler	23
Şekil 3.14. Kaynaklı parçalardaki ısı dağılımı	26
Şekil 3.15. Sürtünme kaynaklı parçalara ait bağlantı şekilleri	33
Şekil 3.16. Kaynak bölgesi ve ITAB içyapı görünümü	34
Şekil 3.17. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilen parça kesitleri	36
Şekil 3.18. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen parçalar	39
Şekil 3.19. Dupleks paslanmaz çelik mikroyapısı	45
Şekil 3.20. Dupleks paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması	47
Şekil 3.21. Paslanmaz çeliklere ait mikroyapı	49
Şekil 3.22. Schaeffler diyagramı	49
Şekil 3.23. Paslanmaz çeliklerin WRC-92 diyagramı	53
Şekil 3.24. Girinti ve çıkıntıların oluşumu	58
Şekil 3.25. Yorulma çatlak başlangıcı ve yorulma kırık yüzey görünümü	59
Şekil 3.26. Eksenel çekme-basma gerilmeleri uygulayan yorulma cihazı.....	64
Şekil 3.27. Düzlemsel eğilme gerilmeli deney cihazı.....	65
Şekil 3.28. Döner eğme gerilmeli yorulma deney cihazı.....	65

Şekil 3.29. Burma gerilmeli yorulma deney cihazı	66
Şekil 3.30. Bileşik gerilmeli (Basma-Burma) yorulma deney cihazı	66
Şekil 3.31. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme (Gerilme-Zaman eğrisi).	67
Şekil 3.32. Yorulma deneyinde farklı gerilme değişimlerini gösteren örnekler	68
Şekil 3.33. Tipik bir S-N (Wöhler eğrisi)	69
Şekil 3.34. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S-N eğrisi	70
Şekil 3.35. Dönen eğmeli yorulma deney numuneleri (Tek nokta yüklemeli)	73
Şekil 3.36. Eksenel gerilmeli yorulma deney numuneleri	74
Şekil 4.1. Sürtünme kaynak numuneleri	81
Şekil 4.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgahı fotoğrafı.....	82
Şekil 4.3. Malzeme çiftinin birleşme düzenini gösteren şematik resim	83
Şekil 4.4. Metolografik incelemelerde kullanılan numuneler	84
Şekil 4.5. Metalografik incelemeler için hazırlanan numune boyutları.....	84
Şekil 4.6. Mikrosertlik ölçüm yapılan noktaların şematik gösterimi	86
Şekil 4.7. Çekme deney numunelerine ait ölçüler	86
Şekil 4.8. Çekme deney numunesi.....	87
Şekil 4.9. Yorulma deney numunelerine ait ölçüler	88
Şekil 4.10. Yorulma deney numunesi.....	88
Şekil 4.11. Yorulma deney cihazı.....	89
Şekil 4.12. Yorulma deney cihazında numune yükleme şekli	90
Şekil 5.1. Kaynak bölgesinde oluşan flanş ve IEB' nin gösterimi	92
Şekil 5.2. Boyca kısalma miktarı ve flanş geometrisine ait özellikler.....	93
Şekil 5.3. Ortalama boyca kısalma miktarlarının grafik olarak gösterimi	93
Şekil 5.4. S1, S4, S7 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları	95
Şekil 5.5. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	97
Şekil 5.6. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	99
Şekil 5.7. S10, S13, S16 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	100
Şekil 5.8. S11, S14, S17 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	102
Şekil 5.9. S12, S15, S18 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	104
Şekil 5.10. S19, S22, S25 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	105
Şekil 5.11. S20, S23, S26 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	107
Şekil 5.12. S21, S24, S27 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları.....	108
Şekil 5.13. AISI 1020 çelik malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı	110
Şekil 5.14. AISI 2205 DPÇ malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı	111

Şekil 5.15. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler	112
Şekil 5.16. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri.....	114
Şekil 5.17. S2, S5 ve S8 no' lu numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri.....	116
Şekil 5.18. S3, S6 ve S9 no' lu numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri.....	118
Şekil 5.19. S1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği	121
Şekil 5.20. S10, S13 ve S16 no' lu numunelerinin arayüzeyden alınan SEM görüntüleri	122
Şekil 5.21. S11, S14 ve S17 no' lu numunelerinin arayüzeyden alınan SEM görüntüleri	124
Şekil 5.22. S12, S15 ve S18 no' lu numunelerinin arayüzeyden alınan SEM görüntüleri	125
Şekil 5.23. S12 no'lu numunenin X - Işını analiz grafiği	127
Şekil 5.24. S19, S22 ve S25 no' lu numunelerinin alın SEM görüntüleri	129
Şekil 5.25. S20, S23 ve S26 no' lu numunelerinin alın SEM görüntüleri	130
Şekil 5.26. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerinin alın SEM görüntüleri	133
Şekil 5.27. S27 no' lu numunenin X-Işını analiz grafiği	134
Şekil 5.28. AISI 1020 ve AISI 2205 malzemelerde oluşan mikrosertlik izlerinin karşılaştırılması	135
Şekil 5.29. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının değiştiği bölgeler	136
Şekil 5.30. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	137
Şekil 5.31. S2, S5 ve S8 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	137
Şekil 5.32. S3, S6 ve S9 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	137
Şekil 5.33. S10, S13 ve S16 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	140
Şekil 5.34. S11, S14 ve S17 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	140
Şekil 5.35. S12, S15 ve S18 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	140
Şekil 5.36. S19, S22 ve S25 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	142
Şekil 5.37. S20, S23 ve S26 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	142
Şekil 5.38. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları	142
Şekil 5.39. AISI 1020 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	144
Şekil 5.40. AISI 1020 çeliğin çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafı	144
Şekil 5.41. AISI 2205 DPÇ' e ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	145

Şekil 5.42. AISI 2205 DPÇ çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafı	145
Şekil 5.43. Çekme test sonuçlarına ait grafik.....	146
Şekil 5.44. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi	148
Şekil 5.45. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	150
Şekil 5.46. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	151
Şekil 5.47. S1 no' lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	153
Şekil 5.48. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	154
Şekil 5.49. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	155
Şekil 5.50. S3, S6, S9 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği	156
Şekil 5.51. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	157
Şekil 5.52. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	158
Şekil 5.53. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	160
Şekil 5.54. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	161
Şekil 5.55. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	162
Şekil 5.56. S11 no' lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	163
Şekil 5.57. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	164
Şekil 5.58. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	165
Şekil 5.59. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	166
Şekil 5.60. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	167
Şekil 5.61. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	169
Şekil 5.62. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	170
Şekil 5.63. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	171
Şekil 5.64. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları.....	172
Şekil 5.65. S21 no' lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları	173
Şekil 5.66. AISI 1020 ve AISI 2205 çeliklerine ait Wöhler Eğrisi	174
Şekil 5.67. Yorulma deneyi ile 340 MPa gerilme uygulanarak kırılan AISI 1020 malzeme ve kırık yüzeyleri	175

Şekil 5.68. Yorulma deneyi ile 180 MPa gerilme altında kırılan AISI 1020 malzeme SEM fotoğrafları.....	176
Şekil 5.69. Yorulma deneyi ile 640 MPa gerilme altında kırılan AISI 2205 malzeme fotoğrafları.....	177
Şekil 5.70. Yorulma deneyi ile 640 MPa gerilme altında kırılan AISI 2205 malzeme SEM fotoğrafları.....	177
Şekil 5.71. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait S-N grafikleri.....	179
Şekil 5.72. S1, no' lu numune yorulma deneyi sonrası kırık yüzey fotoğrafları.....	181
Şekil 5.73. S1 no' lu numune 260 MPa gerilim ile yapılan yorulma deneyi sonrası kırık yüzey SEM_fotoğrafları.....	181
Şekil 5.74. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait S-N grafikleri.....	182
Şekil 5.75. 300 MPa gerilme altında yorulma sonucu kırılan S3, S6 ve S9 no' lu numuneler	183
Şekil 5.76. S9 no' lu numunenin 260 MPa gerilim ile yapılan yorulma deneyi sonrası kırık yüzey SEM fotoğrafları.....	185
Şekil 5.77. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait S-N grafikleri.....	186
Şekil 5.78. S10 no' lu numunenin farklı gerilme değerleri altında yorulma_sonucu kopan kırık yüzey fotoğrafları	188
Şekil 5.79. S16 no' lu numune 340 MPa gerilime değeri ile yapılan yorulma deneyinde meydana gelen mikro çatlaklar.....	189
Şekil 5.80. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait S-N grafikleri.....	190
Şekil 5.81. S12, S15 ve S18 no' lu numunelerin 300 MPa gerilme altında yorulma ile kırılan_yüzey fotoğrafları.....	191
Şekil 5.82. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait S-N grafikleri.....	193
Şekil 5.83. S25 no' lu numunenin yorulma deneyi sonrası kırık yüzey fotoğrafları.....	194
Şekil 5.84. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait S-N grafikleri.....	196
Şekil 5.85. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerin yorulma deneyi sonrası kırık yüzey fotoğrafları.....	198
Şekil 5.86. S24 no' lu numune 300 MPa gerilim ile yapılan yorulma deneyi sonrası kırık yüzey SEM fotoğrafları.....	199

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Aynı kesitli parçalar için optimum, sürtünme kaynak parametreleri	30
Table 3.2. AISI 2205 çeliğinin farklı standartlara göre sınıflandırılması	47
Tablo 3.3. AISI 2205 DPÇ. kimyasal kompozisyonu	47
Tablo 3.4. Paslanmaz çeliklere ait ortalama fiziksel ve termofiziksel özellikler	51
Tablo 3.5. Paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri.....	52
Tablo 3.6. Çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanım sınırına etkisi	77
Tablo 4.1. AISI 1020 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu	81
Tablo 4.2. AISI 2205 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu	81
Tablo 4.3. Sürtünme kaynağı deneylerinde kullanılan parametreler	83
Tablo 5.1. Kaynak parametrelerine bağlı olarak boyca kısalma miktarları.....	94
Tablo 5.2. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	96
Tablo 5.3. S2, S5, S8 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları.....	98
Tablo 5.4. S3, S6 ve S9 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	99
Tablo 5.5. S10, S13, S16 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	101
Tablo 5.6. S11, S14 ve S17 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	103
Tablo 5.7. S12, S15, S18 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	104
Tablo 5.8. S19, S22, S25 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	106
Tablo 5.9. S20, S23, S26 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	108
Tablo 5.10. S21, S24, S27 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları	109
Tablo 5.11. S1, S5 ve S9 no' lu numunelere ait EDS sonuçları	120
Tablo 5.12. S1 no' lu numunenin X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar	121
Tablo 5.13. S12 no' lu numunenin X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar ...	127
Tablo 5.14. S27no' lu numunenin X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar	134
Tablo 5.15. Çekme deney sonuçlarına ait ortalama değerler.....	147
Tablo 5.16. Çekme deney sonunda numunelerde boyut analizi	149
Tablo 5.17. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	150
Tablo 5.18. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	154
Tablo 5.19. S3, S6, S9 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları.....	156
Tablo 5.20. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	158

Tablo 5.21. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	161
Tablo 5.22. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	164
Tablo 5.23. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	166
Tablo 5.24. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	169
Tablo 5.25. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları	171
Tablo 5.26. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları	179
Tablo 5.27. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları	182
Tablo 5.28. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları.....	186
Tablo 5.29. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları.....	190
Tablo 5.30. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları.....	193
Tablo 5.31. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları.....	196

SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ

- F:** Sürtünme kuvveti (N)
 φ : Sürtünme katsayısı
N: Yüzeye dik olan kuvvet (N)
D: Parça çapı (mm)
p: Yüzey basıncı (N/mm²)
r: Parça yarıçapı (mm)
n: Devir sayısı (dev/dak)
k: Isı iletim katsayısı (W/m².°C)
F: Yüzey alanı (m²)
T: Sıcaklık (°C)
t: Süre (sn.)
m: Kütle (kg.)
c: Özgül ısı (kJ/kg.°C)
Q: Isı (kcal)
P_f: Yığılma basınç kuvveti (Kg/mm²)
 μ : Akışkan malzemenin vizkozitesi (gr/sn)
V: Kaliteli bir kaynak bağlantısı için malzemenin yığılma hızı (mm/dk)
R: Deformasyona uğrayan bölgenin derinliği (mm)
 μ_0 : Sıvı modelin relatif vizkozitesi (gr/sn)
 ϵ : Numunenin şekil değiştirme oranı
b: Metallerin mekanik özelliklerini karakterize eden katsayı
 $\delta B_{(p)}$: Deformasyon bölgesinin sınırlarına karşılık gelen sıcaklıktaki akma noktası
 $\delta B_{(0)}$: Numunenin kontak bölgesindeki sıcaklıkta deforme olmuş metalin akma noktası
T: 1 çevrim (Titreşim periyodu)
 $\sigma_{min} (\sigma_a)$: Gerilmenin en küçük değeri (Alt gerilme)
 $\sigma_{max} (\sigma_{ii})$: Gerilmenin en büyük değeri (Üst gerilme)
 $\sigma_{ort} (\sigma_m)$: Ortalama gerilme
 σ_g : Gerilme genliği
 ϵ : Birim şekil değiştirme
 ϵ : Lineer ısı genleşme katsayısı
E: Elastisite modülü
DPÇ: Dupleks paslanmaz çelik
SK: Sürtünme kaynağı

1. GİRİŞ

İnsanlar, ihtiyaçları olan araç gereçlerin yapımı için iki metali birleştirmek zorunda kalmış, bunun sonucunda kaynağın ve kaynaklı bağlantıların ortaya çıkmasını sağlamışlardır. Daha sonra da yapmış olduğu kaynaklı bağlantıların yeterli mukavemete sahip olması ve birleştirmenin malzeme özelliklerini olumsuz etkilemeden gerçekleştirilebilmesini araştırmışlardır. Araştırmalarla birlikte mühendislik uygulamalarındaki gelişmeler, yeni malzeme türlerinin bulunması ve ihtiyaçların artması imalat yöntemlerini de etkilemiştir. Kaynak tekniği de bu imalat yöntemlerinden biridir ve bunun sonucunda kaynak teknikleri işlem cinsine göre ergitme ve katı hal kaynak yöntemleri olarak iki şekilde gruplandırılmışlardır. Ergitme kaynak yöntemlerinde birleştirilen metalik malzemelerin her ikisi birleşme yüzeylerinin ergimesi ve eriyik karışımın katılaşması sonucu birleştirilirler. Ergime nedeni ile farklı metaller, fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonlarına bağlı olarak ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmeleri hemen hemen imkânsızdır. Bu ihtiyacı gidermek amacı ile katı hal kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Katı hal kaynak yönteminde aynı ya da farklı iki malzeme çifti ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, basınç etkisinin oluşturduğu plastik deformasyon ve ekstüzyonla birleşme sağlanır. Katı hal kaynak yöntemleri arasında sürtünme kaynak yöntemi en sağlıklı ve en sık kullanılan yöntemdir.

Sürtünme kaynak yönteminde, işlem sürecinde ergime olmadığından katılaşmada olmamaktadır. Dolayısıyla katılaşma sırasında oluşabilecek kristal yapı farklılaşması, ergimiş metal içerisinde yabancı madde kalma riski ve katılaşma hızına bağlı olarak meydana gelebilecek çatlamlar sürtünme kaynak yönteminde görülmez. O halde farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde, eğer boyutları ve şekilleri müsaade ediyorsa, ergitme kaynağına nazaran bir ergime olayının olmaması ya da sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve minimum kaynak sonrası iç gerilmelere sahip olması nedenleriyle katı hal kaynak yöntemleri gösterdikleri bu avantajları nedeni ile tercih edilirler [1,2].

Bu çalışmada, geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor olan farklı kimyasal bileşimlere sahip; özellikle off-shore uygulamaları başta olmak üzere sanayiinin her alanında kullanılan, dubleks paslanmaz çelik AISI 2205 ile kaynak kabiliyeti yüksek ve aynı zamanda uygun fiyat avantajı sunan düşük karbonlu AISI 1020 çelik çifti, farklı

bileşime sahip metallerin başarılı bir şekilde birleştirilebildiği bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda farklı devir sayıları kullanılmış ve kullanılan her bir devir sayısı ayrı ayrı sabit tutularak, sürtünme kaynak parametreleri (sürtünme basıncı, sürtünme zamanı, yığma basıncı ve yığma zamanı) değiştirilmesi ile üç parametre grubu kullanılmıştır. Literatür ışığında yapılan parametre değişiklikleri ile farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip bağlantılar elde edilmiştir.

Dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında optimum mekanik ve korozyon özelliklerini elde etmede kaynak metalinde ferrit/ostenit faz dengesinin sağlanması gerekir. Kaynaklı numunelerde faz dengesinin korunup korunmadığı ve farklı cinsten malzemelerin birleştirilmesinde ortaya çıkabilecek problemler bu çalışma ile incelenmiştir. Aynı zamanda, kaynak sonrası üretim parametrelerinin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla; kullanılan tüm parametreler için mikrosertlik değerleri araştırılmış, hasarlı veya kırılan numunelerin hasar mekanizmalarını belirlemek ve hasar analizlerini yapmak için taramalı elektron mikroskop incelemeleri ile mikro yapı çalışmaları tamamlanmıştır.

Hazırlanan numunelerin çekme dayanım değerleri araştırılmış, döner eğmeli yorulma testi uygulanarak hasar süreçleri incelenmiş ve hasar sürecinde ortaya çıkan olumsuzlukları minimize etmek için gerekli işlem parametreleri optimize edilmiştir. Böylece dubleks paslanmaz çeliklerin endüstriyel uygulamalardaki kullanımında; başta yorulma ömrü olmak üzere, mekanik özellikler ve ekonomik açıdan en uygun kullanım şekli elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca her grup için kaynak bölgesi ara yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri de ölçülmüş ve etkileri incelenmiştir. Sanayi ile yapılan işbirliği sonucu; ergitme kaynak yöntemlerine göre büyük avantajları bulunan sürtünme kaynak yönteminin uygulanabilirliği ülkemizde yaygınlaştırılmaya çalışılmıştır.

2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

Sürtünme kaynak yöntemi üzerine yapılan ilk çalışmaların 15.yüzyılda başladığı bilinmektedir. Sürtünme kaynak yönteminin uygulama alanlarının geliştirilebilmesi aynı zamanda birleştirilen parçaların bağlantı kalitesinin arttırılabilmesi için incelemeler günümüzde de devam etmektedir [3,4]. Sürtünme kaynak yöntemi ve kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımları üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Vill [5], sürtünme basıncının büyük bir öneme sahip olduğunu ve geniş bir aralıkta değiştiğini ifade etmiştir. Vill'e göre sürtünme kaynak basıncı, kaynak bölgesindeki sıcaklık ve eksenel kısalma miktarı ile kontrol edilebilir. Hassasiyeti en düşük olan parametre dönme hızıdır ve pratik olarak kaynak kalitesini etkilemeksizin geniş bir değişim aralığında kullanılabilir.

Ellis [6], 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. Karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde yığma için gerekli sürtünme süresini yaklaşık olarak $t=82,55xD$ (sn) olarak ifade etmiştir. Bu formülün yüksek alaşımlı, paslanmaz çelikler, sertleştirilmiş çelikler ve yüzey işlemi görmüş çelikler için iyi sonuç vermediğini belirtmiştir.

Itoh vd. [7], östenitik paslanmaz çelik ve C-Mn-Si alaşımlı çeliklerin kaynaklı bağlantılarında, yorulma çatlağı başlangıcının, yorulma ömrüne etkisini ve kaynaklı kaynaksız numunelerde, yorulma çatlaklarının ilerlemesine neden olan kalıntı gerilmelerin etkisini araştırmıştır. Deneyleri, gerilme oranının $R>0$ olduğu, sabit ve değişken gerilme genliklerinde tamamlamıştır. Kaynaklı parçalarda yorulma çatlaklarının büyümesinin, kalıntı gerilmelerin etkisine bağlı olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca çatlak büyüme miktarını tahmin etmek için esas metalden alınan verileri kullanmanın da mümkün olduğunu belirtmiştir. Yorulma ömür tahminlerini lineer elastik yorulma bağlantılarını kullanarak yapmış, yorulma çatlak ilerlemelerini ve kırılma yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop kullanarak incelemiştir.

Yilbaş vd. [8], çelik-alüminyum ve alüminyum-bakır çubuk malzeme çiftlerini sürtünme kaynak yöntemini 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 ara yüzeyde yeterli deformasyonun oluşabilmesi için yüksek dönme hızı ve yüksek sürtünme basıncı kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Yan ve arkadaşları [9], sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 1045 çeliğin sabit ve değişken genlikli yükleme altında yorulma testlerini yapmış ve test sonuçlarını istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirerek yorulma katsayısı ile eşik değerlerini elde etmişlerdir. Sabit dağılımlı yükleme altındaki yorulma testinin istatistiksel ve deneysel analizleri küçük boyutlardaki çentikli sürtünme kaynaklı 1045 çeliğinin yorulma ömrü basınç dağılım fonksiyonundan yorulma direnci katsayısı çıkartılarak istatistiksel analizlerle kontrol etmişler, istatistiksel analizle birlikte bir tip blok yükleme programı kullanarak test sonuçlarını tekrar değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre metallerdeki çentik elementi ile süreksiz sertleştirme karakteristiğinin, değişken yükleme altındaki çentikli sürtünme kaynaklı bağlantıların yorulma ömrünün olasılık dağılımının tahmininde de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Hong ve arkadaşları [10], 304L paslanmaz çeliklere düşük çevrimli yorulma testleri uygulayarak, delta-ferritin yorulma çatlak başlangıcı ve ilerleme mekanizmaları üzerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yorulma çatlaklarının, yükleme ve delta-ferrit liflerinin doğrultusuna bağlı olarak başladığını belirlemişlerdir. Delta-ferrit liflerinin yükleme doğrultusuna paralel olduğu durumlarda, yorulma çatlaklarının ince bantların kaymasından dolayı başladığını ve ilerlediğini gözlemlemişlerdir. Ferrit liflerinin yükleme doğrultusuna dik olduğu durumlarda ise, çatlak oluşumlarının tane içerisinde başladığını ve çatlakların tane sınırlarında hızlandıklarını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, yüklemenin delta-ferrit liflerine paralel olduğu durumlarda, yorulma dayanımının daha yüksek olduğu belirlemişlerdir.

Satyanarayana vd. [11], östenitik-ferritik paslanmaz çelik çiftini sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin mikroyapı, mekanik özellikler ve kırılma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. En uygun kaynak parametrelerini belirleyerek, sağlıklı kaynakların ancak belirli kaynak parametrelerinin kombinasyonları ile elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Lee ve arkadaşları [12], sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen STR35 ve STR3 malzeme çiftinde, oluşturulan yapay hataların (çentiklerin) kaynak arayüzü ve ısıdan etkilenen bölgelerde çentik konumuna göre yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ara yüzeylere 0,5 mm ve 1 mm olmak üzere iki farklı mesafede dairesel çentikler açmışlar. Çentik mesafesinin yorulma ömrü üzerinde farklı etkilerinin olduğunu belirlemişlerdir. Kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde ana malzemeden daha yüksek, kaynak ara yüzeyine uzak bölgelerde ise ana malzemeden daha düşük yorulma ömürleri tespit etmişlerdir. Bununla birlikte mikrosertlik değerlerinin kaynak arayüzeyinde arttığını bildirmişlerdir.

N. Özdemir [13], AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ile AISI 4340 çelik çiftini sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmiştir. Çalışmada, devir sayısının kaynaklı bağlantının kalitesine olan etkisini araştırmıştır. Mikroyapı ve mikrosertlik ölçümleri yapmış ve sonuç olarak devir sayısının sürtünme kaynağı ile birleştirilen çelik çiftinin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir.

N. Özdemir ve Orhan [14], termomekanik işlemlerle tane boyutu küçültülmüş ötektoid üstü, ultra yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesini inceleyerek kaynak parametrelerinin (devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Kaynak sonrası elde edilen mikro yapı, mikro sertlik analizi ve mekanik testler sonucunda, kaynak işlemi boyunca oluşan mikroyapı dikkate alınarak değerlendirildiğinde; her bir kaynak parametresinin kaynaklı bağlantının kalitesini bir miktar etkilediğini ancak mekanik ve metalurjik özelliklere en önemli etkinin devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin kombinasyonu ile elde edildiğini bildirmişlerdir.

Chai [15], DPC için çok yüksek döngülü yorulma testleri uygulamış ve çok kademeli S-N eğrilerini elde etmiştir. Yüzeydeki yorulma çatlak başlangıcının yüzey altına geçiş mekanizmalarını araştırmıştır. Yüzeydeki yorulma çatlaklarının başlangıcını; kayma bantlarının ekstrüzyonu ve intrüzyonu nedeniyle, ferrit fazında başladığını bildirmiştir. Yüzey altı yorulma çatlak başlangıcında; lokalize yorulma hasarlarına ve şekil

değiştirme lokalizasyonuna yol açan, gerilme arttırıcı özellikteki inklüzyonların yüzey altındaki varlığı nedeniyle yine ferrit fazında başladığını belirtmiştir. Optik mikroskoptaki kararmış bölgelerde (ODA) ostenitik ve ferritik fazlar arasında bir mikro çatlak uyumsuzluğu olduğunu bildirmiştir.

Şahin [16], sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çeliklerin (AISI 304) kaynak dayanımlarını ve mikro yapısal özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada; sürtünme süresi ve sürtünme basıncının artması ile paslanmaz çeliklerin birleşme noktalarındaki gerilme dayanımlarının arttığı, belirli değerlerde maksimuma geldiği, ancak sürtünme süresi ve sürtünme basıncındaki artışın bağlantı mukavemetini düşürdüğü belirtilmiştir. Elde edilen bu maksimum gerilme dayanımı esas metalin gerilme dayanımının % 96 'sı kadardır.

N. Özdemir vd. [17], sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 304L ve AISI 4340 çeliklerde, devir sayısının, malzeme ara yüzey özelliklerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Mikroyapı ve meknik test sonuçlarından, dönme hızının aşırı deformasyona uğramış bölgenin genişliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ve artan devir sayısına bağlı olarak kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının arttığını bildirmişler.

Şahin [18], sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kaynaklı bağlantıların ara yüzey mikro yapı özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapmış olduğu çalışmada; plastik deformasyonun kaynak bölgesindeki etkilerini analiz etmiş ve sonuçta AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde plastik deformasyonun hem işlem parametrelerine hem de kaynaklı bağlantıların dayanımı üzerine etkisinin olmadığını bildirmiştir.

Sathia ve arkadaşları [19], geleneksel teknikler ve yapay sinir ağlarını kullanarak, paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağındaki kaynak işlem parametrelerini, yaklaşık optimal ayarlarına karar veren bir metod ileri sürmüşlerdir. Bu amaçla sürtünme kaynağında istenilen çekme dayanımının ve minimum metal kaybının elde edildiği verileri kaynak proses parametrelerine karar vermede kullanmışlar. Çalışmaları ile geniş bir alan için uygun kaynak parametrelerinin nasıl elde edileceğini göstermişler ve evrimsel hesaplama tekniklerinden elde ettikleri sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Li ve arkadaşları [20], kaynak bağlantı kalitesini arttırmak ve elektrik tasarrufu sağlamak amacı ile geleneksel elektrik direnç kaynağındaki gibi elde edilen elektrik direnç ısını sürtünme kaynağı ile birleştirerek kullanmışlar. Bu amaçla 4 mm çapında 21-4N

(östenitik paslanmaz) ve 4Cr9Si2 (martenzitik paslanmaz) çelik çiftini kullanmışlar ancak bu uygulamanın yalnızca ince çubuklar için geçerli olabileceğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında kaynaklı bağlantının her iki tarafında termomekanik olarak değişime uğrayan bölge ile birlikte ısıdan etkilenen bölgelerin olduğunu tespit etmişlerdir.

Çelik ve arkadaşları [21], çalışmalarında, AISI 4140 (orta karbonlu düşük alaşımlı) çelik ile AISI 1050 (orta karbonlu) çelik çiftini sürtünme kaynağı ile birleştirmişler ve araştırmalar sonucunda optimum kaynak parametrelerini elde etmişlerdir. Kaynak bölgesindeki sıcaklık değişimini kaynak boyunca infrared sıcaklık ölçme aleti ile ölçerek, kaynak parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda; aynı gruptaki metallerin çekme dayanımlarının birbirine çok yakın çıktığını ve ısı tesiri altındaki bölgede sertlik değişiminin kaynak parametrelerine göre çeşitlilik gösterdiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte sürtünme kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının esas malzemesinin (AISI 1050) çekme dayanımlarının % 6 üzerinde olduğunu ve en düşük çekme dayanımının ise % 1,9 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Tavares vd. [22], off shore petrol üretiminde kullanılan esnek borulardaki ana malzemelerden UNS S31803 ve UNS S32304 dubleks paslanmaz çelik çiftlerini GTAW yöntemi ile birleştirmişlerdir. Önce ince levhalar halinde birleştirilen malzeme çiftlerini daha sonra “S” şeklindeki levhalarla birleştirmişler. “S” şeklindeki kaynaklı bağlantıların kritik bölgelerinde çoklu aksiyal yüklemeler yapmışlardır. Daha sonra kaynak metalindeki çatlakları seçerek hasar analizini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta, kaynak metalinin sünek bir kırılma göstermediğini, Cr₂Ni parçacıklarının oluşması nedeniyle kaynak metalinin % 28,4’ ünü östenitin oluşturduğunu ve bu dengesiz yapının düşük süneklik ile düşük tokluğa neden olarak çatlaklar için belirleyici olduğunu bildirmişlerdir. Kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgelerin esas metale göre daha düşük korozyon direncine sahip olduğunu görmüşlerdir.

Mitala ve Craciunescu [23], sertlik dereceleri ve yapıları birbirinden farklı, karbürize edilmiş ve sertleştirilmiş çelik bağlantıları sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Yığma basıncı, sürtünme basıncı, gibi sürtünme kaynağındaki ana parametrelerin ve kompozisyon üzerinde oluşan sıcaklığın etkilerine göre, nitel bir faktör olarak karbonca zenginleşmiş bir tabakanın, bağlantı ara yüzeyinden uzaklaşmasını incelemişlerdir. Düşük sürtünme basıncı ve uzun sürtünme süresi tercih edildiğinde; bağlantı düzleminde bir sementasyon tabakasının oluştuğunu, yüksek sürtünme basıncı tercih edildiğinde ise karbonca zenginleşmiş tabakanın bağlantı ara yüzeyinden uzaklaşmadığını tespit

etmişlerdir. Bununla birlikte yüksek yığılma basıncının ara yüzeyden uzaklaşan malzeme miktarını arttırdığını bildirmişler.

Nip ve arkadaşları [24], sıcak ve soğuk olarak şekillendirilmiş yapı çeliği (S355J2H) ve paslanmaz çelik (EN 1.4301-EN 1.4307) özelliklerini düşük-çok düşük çevrimli malzeme yorulma testleri altında incelemiş ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Eksenel ve eğilmeli konfigürasyon çevrimleri içinde $\pm \%15$ ' e varan gerilim genliklerinde, toplam 62 deney yapmışlardır. Üç malzemeyede uygun Coffin-Manson parametrelerini elde etmek için; ileri derecede düşük devirli yorulma ömrü tahmin modellerini kabul etmişler ve eksenel yüklemeli testlerden elde edilen sonuçları kullanmışlardır. Üç malzemeye ait çekme deney sonuçları benzer olarak elde edilirken, kırık parçaların ölçümü ile önemli oranda uzama farklılıklarını tespit etmişlerdir. Farklı gerilme genliklerinden elde edilen malzeme histerizis yanıtlarını, malzemenin sayısal modelini de içine alan sertleşme modelini kalibre etmek için kullanmışlar ve paslanmaz çelik numunelerinin sertleşme eğilimlerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Taban vd. [25], değişken parametreler kullanarak, 6061-T6 alüminyum ve AISI 1018 çeliği sürtünme kaynak yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir. Birleşme ara yüzeylerini mekanik testler ve metalurjik analizler ile değerlendirmiş ve optimum değerleri tespit etmişlerdir. Bağlantı direncinin 250 MPa' a ulaştığını ancak bağlantının alüminyum tarafında plastik şekil değişimine uğramış katman bulunduğunu ve arayüzeyde iki intermetalik faz oluştuğunu belirtmişlerdir.

Pakandam ve Varvani-Farahani [26], tek eksenli yükleme koşulları altında kaynaklı bağlantıların yorulma hasar tespiti için enerji temelli üç farklı yöntemin karşılaştırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada; kaynaklı bağlantıların yorulma ömür tespitlerinde; çevrim sayısının çok olması durumunda stress-enerji modeli ile yorgunluğu açıklayan modelin en iyi sonuçlar verdiğini, küçük çevrim sayılarında ise diğer enerji modellerinin daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Tekrarlı yüklere maruz kalan kaynaklı bağlantılarda çatlak başlangıç ve çatlağın büyüdüğü noktalar yüksek gerilmelerin meydana geldiği kaynak başlangıç ve bitiş noktaları (esas metalden kaynak metaline geçiş noktaları) olduğunu belirtmişlerdir.

Nascimento ve Voorwald [27], uçuş güvenliğinde kritik öneme sahip AISI4130 çeliğinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin, onarımının ve korozyonun yorulma dayanımına etkilerini analiz etmişlerdir. Yorulma ömrünün ana malzemeye göre korozyon, TIG kaynağı ve onarım amaçlı yeniden kaynak işlemleri ile düştüğünü bildirmiştir.

Kaynaklı numunelerde malzeme boyutlarının artması ile kaynak hatalarının arttığını, özellikle mikro çatlak artışının ve bunların büyümesindeki artışın yorulma dayanımını düşürdüğünü tespit etmişler.

Ochi ve arkadaşları [28], sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen SUS304 paslanmaz çelikler de deformasyon meydana getiren ısı girdisi ile bağlantı mukavemetleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bağlantı mukavemetini çekme ve yorulma testleri ile değerlendirilmişlerdir. Isı girdisine bağlı oluşan deformasyon miktarı ve ITAB ile bağlantı mukavemeti arasında yüksek bir korelasyon olduğunu tespit etmiştir. Isıdan etkilenen bölgelerin sürtünme ısısı ile yumuşatıldığını bu nedenle çekme dayanımlarının ana malzeme çekme dayanımlarından daha düşük olduğunu bildirmiştir. Buna rağmen sürtünme kaynaklı SUS304 paslanmaz çeliklerinin yorulma dayanımlarının ana malzemeden daha yüksek çıktığını tespit etmiştir. Bunun nedeninin ise kaynak arayüzüne yakın bölgelerde pekleşme nedeni ile oluşan sertlik artışı olduğunu belirtmiştir. En iyi sonuçların ise ısı girişi (120 J/sn üzerinde) ile deforme olan bölge genişliğinin belli değerlere (1 mm den daha fazla) ulaşması ile elde edilebileceğini, böylece daha kararlı ve yüksek mukavemetli bağlantılar elde edildiğini bildirmiştir.

Beden ve arkadaşları [29], düşük ve orta karbonlu farklı çelik malzemelerin (ASTM A533, AISI 1020, AISI 4340) değişken genlikli yükleme altında, gerilme-gerinme temel metodu ile yorulma ömür tahminleri yapmaya çalışmışlardır. Yorulma ömrünü etkileyen faktörler arasından yüzey durumunu deneysel ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiş ve malzemelerin yorulma ömürleri arasındaki farkları göstermişlerdir. Bir çentikli bileşenin tekrarlı yükleme tabi olduğunda, gerilim ve gerinim konsantrasyonları alanındaki sıklık inelastik gerinimlerin çatlakların oluşumuna neden olabileceğini ve daha sonraki büyüme bileşeni ile malzemenin kırılmasına neden olacağını belirtmişlerdir. Yorulma davranışı içerisinde sıkı veya küt bir çentiğin genellikle çatlak çekirdeklenmesinde hakim olduğunu keskin bir çentikle gelen çatlak çekirdeklenmesinin ise yüksek lokal gerilmeler nedeni ile çok kısa sürede çatlak büyümesi ile sonuçlandığını bildirmişlerdir.

Paventhann vd. [30], orta karbonlu çelik AISI 1040 ve östenitik paslanmaz çelik AISI 304 çelik çiftlerini sürtünme kaynak yöntemini kullanarak birleştirmiştir. Çentikli ve çentiksiz numuneler için S-N eğrilerini elde ederek yorulma, yorulma çentik faktörü ve hassasiyetini benzer olmayan metaller açısından değerlendirmiştir. Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının kaynaklı bağlantıların mikroyapı, sertlik ve çekme dayanım özellikleri ile ilişkili olduğunu bildirmişlerdir. Benzer olmayan metallerin kaynaklı

bağlantısı sonucunda, baz malzemeye göre orta karbonlu çeliğin yorulma dayanımının %30, östenitik paslanmaz çeliğin yorulma dayanımının ise %40 daha azaldığını göstermişlerdir.

Voinov [31], 16 mm çaplı St 20 ve 40 KH çelik çiftini $P1 = 50$ MPa, $P2 = 100$ MPa, $t1 = 3$ sn ve $t2 = 1.5$ sn değişkenlerini kullanarak yapmış olduğu sürtünme kaynaklı numunelere çentik darbe ve yorulma deneyleri uygulayarak $n = 1200/4200$ dev/dak dönme hızının kaynak kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek için parametre optimizasyonu yapmıştır. Sürtünme kaynaklı bağlantıların yüksek dönme hızları kullanılarak yapılmasının çentik darbe dayanımlarını arttırdığını, yorulma deneyinde her iki dönme hızında iyi sonuçlar alındığını bildirmiştir.

Mümin vd. [32], AISI 1040 çelik çiftini sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirerek sürtünme süresi ve sürtünme basıncının kaynak kalitesine olan etkilerini incelemişlerdir. Artan sürtünme süresi ve sürtünme basıncı ile maksimuma ulaşan kaynak çekme dayanımının daha sonra düştüğünü bildirmişlerdir. Artan sürtünme süresi ve sürtünme basıncının kaynaklı bağlantının çekme dayanımını azaltan erimeleride beraberinde getirdiğini tespit etmişlerdir. Yorulma deneylerinde kaynaklı bağlantı yorulma dayanımlarının ana malzemeye yakın olduğunu ve çekme dayanımlarına uygun olarak değiştiğini kaydetmişlerdir. Kaynak arayüzeyinde oluşan deformasyon nedeni ile yatay yönde sertliğin kaynak merkezine doğru arttığını ancak dikey yönde ısınma ve soğumanın etkisi ile sertliğin parça sonuna doğru arttığını ve maksimuma ulaştığını göstermişler.

Çalık [33], AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 1060 çeliklerinin soğuma hızlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla 4 saat süreyle 1250 K° ye ısıtılan malzemeleri havada, suda ve fırında soğutmuş, ısıtılma işlem sonucundaki mikroyapı değişikliklerini inceleyerek AISI 1020 çeliklerinde martenzitik dönüşümün ancak suda soğutulularak % 5 oranında elde edilebildiğini bildirmiştir. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde mikrosertlik artışı karbon miktarı ve soğuma hızına bağlı olarak oluşan katı çözelti sertleşmesi ve martenzitik yapı oluşumuna bağlı olduğunu göstermiştir.

3. TEMEL BİLGİLER

3.1. Kaynak İşlemi ve Kaynak Yöntemleri

Metallerin kaynağı işlem cinsine bağlı olarak; ergitme kaynağı ve katı hal kaynağı olmak üzere iki grupta incelenmekte ve tanımlanmaktadır [34].

Ergitme kaynağı: Metalik özelliklere sahip, ergime sıcaklıkları aynı ya da birbirine yakın malzemelerin ısı etkisi altında ergitilerek, ilave metal katarak veya katmadan ve ergitmenin bölgesel olarak yapıldığı birleştirme işlemidir.

Katı hal kaynağı: Aynı ya da farklı kimyasal özelliklere sahip iki malzeme çiftinin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, basınç etkisi ile plastik deformasyon ve ekstrüzyonla yapılan birleştirme işlemidir.

3.1.1. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Geleneksel ergitme kaynak yöntemleri; kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve ergime noktası farklı, metalürjik uyumsuzluğu olan malzemelerin birleştirilmesi için uygun değildir. Ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi oldukça zor olan bu malzemeler, katı hal kaynak yöntemleri kullanılarak sorunsuz bir şekilde kaynaklanabilmektedir. Katı hal kaynak yöntemleri ile kaynak sonrası oluşan iç gerilmeler, curuf, gözenekler, gevrek intermetalik fazlar gibi kaynağın kalitesini etkileyen birçok unsur malzemelerin ergime sıcaklığına ulaşmadan birleştirilmeleri sayesinde en az seviyelere inmektedir [35]. Katı hal kaynağı için metalürjik anlamda temiz olan iki yüzeyin, atomik seviyede birbirlerine yaklaştırılması gerekir. Bunu sağlamak üzere kullanılan başlıca katı hal kaynak yöntemleri;

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

Katı hal kaynak yöntemleri içerisinde yer alan en sağlıklı ve en sık kullanılan yöntem ise sürtünme kaynak yöntemidir. Sürtünme ısısı ile gerçekleştirilen sürtünme kaynağı, gelişen teknoloji ile birlikte birçok sektörde kullanılan ticari bir prosestir [35,36].

3.1.2. Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynağının (SK) başlangıcı 15.yy' a kadar gitmesine rağmen konu ile ilgili ilk patent 1891 yılında Amerikalı makinist J.H.Bevington tarafından alınmıştır. Daha sonraları konu ile ilgili W. Richter tarafından 1924 yılında İngiltere' de (British patent no: 572789) ve H. Klopstock tarafından 1929 yılında Almanya'da (Dr-patent no: 477084), birer patent alınmıştır. Sürtünme kaynağının ticari amaçlı kullanılması fikrine bağlı olarak, ilk bilimsel çalışma ise 1956 yılında Chdikov adlı bir Rus tarafından başlatılmıştır. Chdikov çalışmalarında, iki metal çubuğu sürtünme kaynağı ile belli şartlarda birleştirmiş ve patent almıştır. 1959 yılında, matkap, rayba, bıçak ve kalem gibi aletlerde onarım amaçlı kullanılmıştır. 1961 yılından itibaren Amerikada üretilen sürtünme kaynağı makineleri da piyasada kendini göstermeye başlamıştır.

Bugün, geliştirilmiş sürtünme kaynak makineleri, otomotiv sanayiinden uzay sanayiine kadar geniş bir imalatçı kitlesi tarafından kullanılmaktadır. Yöntemin uygulama alanlarının geliştirilmesi ve incelenmesi ise hala devam etmektedir [2,37]. Sürtünme kaynak yöntemi; teknik ve ekonomik avantajları nedeni ile birçok endüstriyel uygulamalarda yüksek ısı dirençli, yüksek mukavemeli çeliklerle birlikte paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

3.1.2.1. Sürtünme

Cisimlerin veya maddelerin, birbirine bağlı olarak hareketinden doğan kinetik enerji kayıpları sürtünme olarak tarif edilir. Temas eden iki cismin ara yüzeylerinde gerçekleşen kuvvetler sürtünmeye sebep olur. Bu kuvvetler, yük, malzeme özellikleri ve temas alanı ile belirlenir. Malzeme özellikleri ve temas alanı nedeni ile sürtünme kuvvetleri doğrudan tahmin edilemezler. Çünkü malzeme özellikleri, yüzeyinin deformasyona uğraması, segragasyonlar içermesi ve oksit tabakası ile kaplı olması gibi birçok faktörü içermektedir. Bununla birlikte gerçek temas alanı atomik mertebede düz değildir ve cismin görünür alanından çok küçüktür.

Sürtünme kuvveti; bir katı ile temas eden cismin diğer cisim üzerinde kaymasını sağlayan teğet durumdaki yüzeysel kuvvettir. Bu kuvvet yüzeylere ait düzlemde gerçekleşir ve yüzeye dik olan kuvvetle orantılıdır. Sürtünme kuvveti aşağıdaki ampirik formül ile hesaplanır [2].

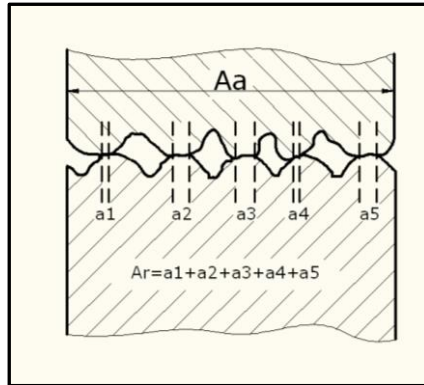
$$F = \varphi * N \quad (3.1)$$

Bu denklemde; **F**: Sürtünme kuvveti (N)

φ : Sürtünme katsayısı

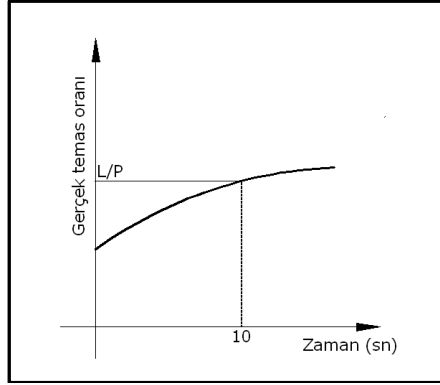
N: Yüzeye dik olan kuvvet (N)

Sürtünen iki katı malzemenin Şekil 3.1’ deki gibi başlangıçta yüzey pürüzleri noktasında temasta olduğunu varsayarak, zahiri ve gerçek temas alanları belirlenir. Karşılıklı etkileşim noktaları, gerçek temas alanı (A_r), yüzeyler arası toplam alan görünür temas alanı (A_a) olarak ifade edilebilir. Sürtünmede etkileşim derecesi, gerçek temas alanının büyüklüğü ile saptanır. Bu nedenle, önce gerçek temas alanının büyüklüğü tespit edilmelidir [2].



Şekil 3.1. Görünür ve gerçek temas alanları [2].

Sürtünme kaynağında, iki yüzey birbirine bastırıldığında, önce yüzey pürüzlerinin temas noktalarında sonra da birçok noktada plastik deformasyonlu temas meydana gelir ve toplam gerçek temas alanı $A_r=A_a$ oluncaya kadar devam eder (Şekil 3.2). Plastik deformasyon bu aşamadan sonra başlar. Plastik deformasyon başlayıncaya kadar, sürtünme sonucu uygulanan mekanik enerji önce pürüzlerde sonra da daha geniş bir alanda ısıya dönüşür [2].

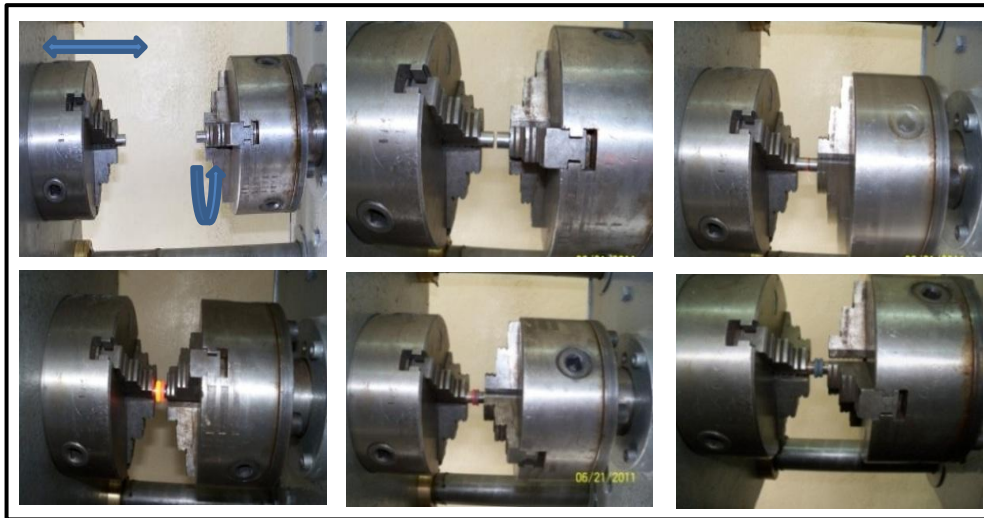


Şekil 3.2. Yükün zamana göre uygulanması durumunda A_r 'nin değişimi [2].

3.1.3. Sürtünme Kaynağının Mekanizması

Günümüzde yaygın olarak kullanılan sürtünme kaynağı hem bir katı hal hem de bir tür basınç kaynağıdır. Bu kaynak; parçaların birbirine sürtünmesi sonucunda yalnızca mekanik enerjiden doğan ısının kullanımı ile gerçekleştirilir. Sürtünme kaynağının temel mekanizmaları; sürtünme, plastik deformasyon, ekstrüzyon ve yeniden kristalleşmedir [2,35].

Yukarıdaki bilgiler ışığında **sürtünme kaynağı**; çalışma parçalarının ara yüzeylerinde, sürtünme yoluyla üretilen mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılarak, malzemelerin plastik deformasyona uğramasıyla gerçekleştirilen bir katı hal kaynak tekniğidir [2,38].



Şekil 3.3. Sürtünme kaynağı işlem basamakları

Şekil 3.3' te sürtünme kaynağı işlem basamakları gösterilmektedir. Burada:

1. Birleştirilecek parçalardan en az biri dairesel harekete sahip olacak şekilde, genelde ayna ve pens yardımıyla eksenel olarak cihaza bağlanırlar.

2. İki parçadan en az biri sabit bir hızda döndürülür. İstenilen dönme hızına ulaşıldığında parçalardan biri diğerine temas edecek şekilde ilerletilir.

3. İş parçaları birbirine temas ettiğinde sürtünme basıncı adıyla adlandırılan eksenel bir itme kuvveti uygulanır. Isıtma fazı veya sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç, plastik deformasyon sıcaklığı oluşuncaya kadar devam eder [2,4]. Basınç etkisi ile başlangıç periyodunda noktasal temasla yerel kaynaklar oluşur ve bunun ardından kaynaklanmış bölgelerin makaslanmasına yol açar. Böylelikle yerel sıcaklık yükselmeleri meydana gelir. Çelikler için bağlantı bölgesinde oluşan sıcaklık 900-1300 °C arasındadır. Bu sıcaklığa çok kısa bir zamanda ulaşılmakta ve bu sıcaklık uygulanan baskı kuvveti altında parçaların birleşmesi için yeterli olmaktadır [34].

4. Sıcaklığın yükselmesi ve ısı iletimiyle çok kısa sürede tüm temas yüzeylerinde bir sıcaklık dengelenmesi meydana gelir. Yerel olarak erime sıcaklığına erişilebilir. Sonuç itibarıyla parçaların sürtünmekte olan yüzeylerinde, ısı açığa çıkar ve basınç etkisi ile yığılma başlar. Sürtünme hareketi sırasında, yüzeyleri kaplayan oksit ve yabancı tabaka kendiliğinden yırtılarak, sürtünme yüzeyleri arasından uzaklaşır.

5. Malzemeler plastikleşerek basınçlı kaynak yapma sıcaklığına eriştiğinde, dönme hareketi frenlenerek aniden durdurulur ve bu sırada eksenel basınç iki kat artırılarak yığılma oluşturulur. Dövülmüş sıcak bölge ara yüzeyden dışarı doğru yönlendirilir ve yumuşayan metal uygulanan basıncın etkisiyle dışarı doğru taşmaya devam eder.

Isıtma fazı sonrasındaki bu aşamada, artan basınç nedeni ile kaynak bölgesindeki metal bir tür termomekanik işleme tabii tutulmuş olur. Dolayısıyla bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir. Bundan dolayıdır ki, diğer yöntemlerle kaynak edilemeyen metal ve metal alaşımları bu yöntemle kaynak edilebilir [2].

6. İlave malzeme kullanmaksızın sıcak işlemeye maruz kalan birleşme bölgesi tüm yüzey ve çap boyunca homojen bir forma ve yüksek kalitede, kaynak dikişine sahip olur [2,9]. Sürtünme ısısı ile yumuşayan malzeme, gerek sürtünme ve gerekse durma sırasındaki basınç etkisi ile kaynak yerinde arzu edilmeyen bir şişkinlik (çapak) meydana getirmektedir. Söz konusu çapak kısmı, kaynak işleminden sonra, kaynaklı parçada çentik etkisi ile kaynaklı bağlantının dayanımının azalmasına neden olur. Bu sebeple çapak kaynak işleminden sonra, herhangi bir talaş kaldırma yöntemi ile ortadan kaldırılır [35,38].

Parçalar arasında kaynak bağı oluşabilmesi için parça yüzeylerinin metalürjik anlamda temas haline gelmesi gerekir. Sürtünme kaynağında bütün temassızlıklar sürtünme yolu ile giderildiği için arzu edilen temas çok iyi gerçekleşir. Kaynak kalitesi, malzemeye uygun seçilen kaynak parametreleri (sürtünme süresi, sürtünme basıç kuvveti, devir sayısı, yığma basıç kuvveti, yığma süresi vb.) ile arttırılabilir [2]. Normal şartlar altında sürtünen yüzeylerde bir ergime meydana gelmez, şayet çok küçük miktarlarda bir ergime oluşmuşsa da kaynak sonu uygulanan yığma işleminden dolayı ergimiş metale ait bir delil bulunmaz. Bu kaynak tekniğinde ilave metal ve koruyucu gaza gerek yoktur [4].

Sürtünme kaynağında, kaliteli bir bağlantının oluşması Darby (1982) tarafından şu şekilde açıklanmaktadır [2].

1. Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.

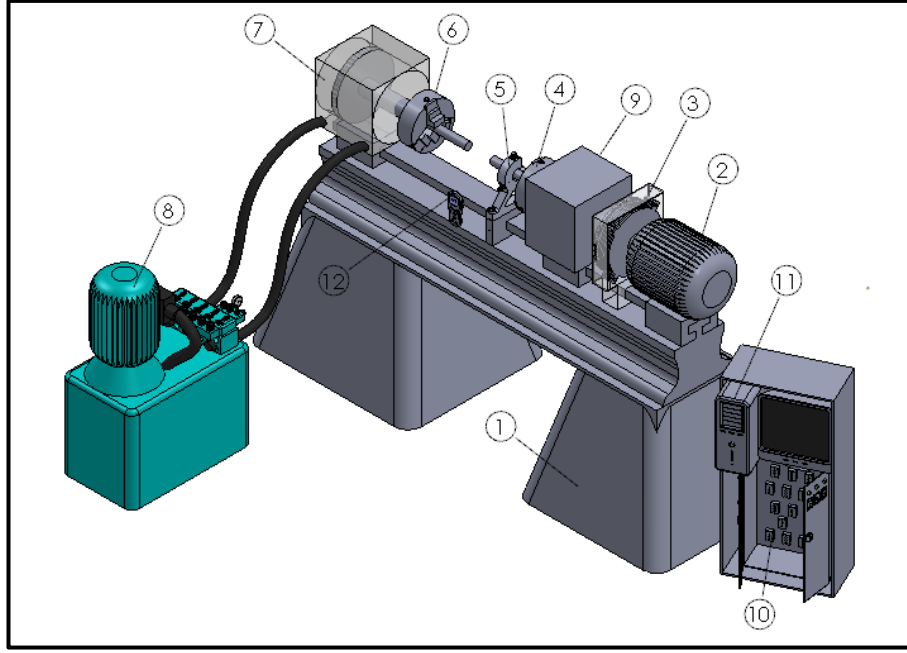
2. Sürtünme kaynağı sırasında kaynak inklizyonlarının büyük bir kısmı elimine edilir.

3. Bağlantı bölgesi, hızlı lokal ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basıç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahip olur.

4. Hızlı lokal ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik relatif olarak geniş ısıtılmamış alanların ısıyı lokal ısınmış alanlardan hızla çekmesi sonucunda ısı tesir altında kalan bölge (ITAB) çok dar olur.

3.1.4. Sürtünme Kaynak Makinaları

Dizayn olarak sürtünme kaynak makineleri torna, matkap gibi metal işleme makinelerine benzemektedir. Şekil 3.4' te tipik bir sürtünme kaynak tezgahı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi bir sürtünme kaynak makinesi, ana gövde, bağlama tertibatları dönme ve yığma mekanizmaları, fren sistemi, güç ünitesi, kontrol üniteleri ve kumanda tablosu kısımlarından oluşmaktadır [4,38]. Bununla birlikte parçaların bağlanması, boşaltılması ve oluşan çapakların alınması otomatize edilebilir. Sürtünme kaynak makinasında numune bağlama aparatları gerekli rijitliğe sahip olmalı, üzerine gelecek momentleri karşılamalı, radyal kaçıklıkları ve titreşimleri elimine edilebilmelidir. Durdurma tertibatlarının güvenilirliği sağlanmalıdır [38].



Şekil 3.4. Sürtünme kaynak makinası ve donanımı

- | | | | | |
|---------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| 1. Gövde | 2. Elektrik motoru | 3. Kavrama | 4. Dönen ayna | 5. Merkezleme yatağı |
| 6. Eksenel ayna | 7. Çift etkili silindir | 8. Hidrolik ünite | 9. Manyetik fren ünitesi | |
| 10. Elektrik panosu | 11. Bilgisayar | 12. Sıcaklık ölçüm cihazı | | |

Günümüzde kullanılan sürtünme kaynak makinalarının bilgisayar kontrollü olması kaynak parametrelerinin daha kolay ve doğru bir şekilde ayarlanmasını sağlamaktadır.

3.1.5. Sürtünme Kaynağı Yöntemleri

Sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjinin sağlanışına göre üç, hareket şekline göre de beş grupta incelenebilir [2,4].

Enerji kaynağına göre;

1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı,
2. Volan tahrikli sürtünme kaynağı,
3. Kombine kaynak yöntemi.

Hareket şekline göre;

1. Dairesel hareketli sürtünme kaynağı,
2. Lineer titreşim hareketli sürtünme kaynağı,
3. Açısal hareketli sürtünme kaynağı,
4. Radyal sürtünme kaynağı,
5. Yörüngesel hareketli sürtünme kaynağı.

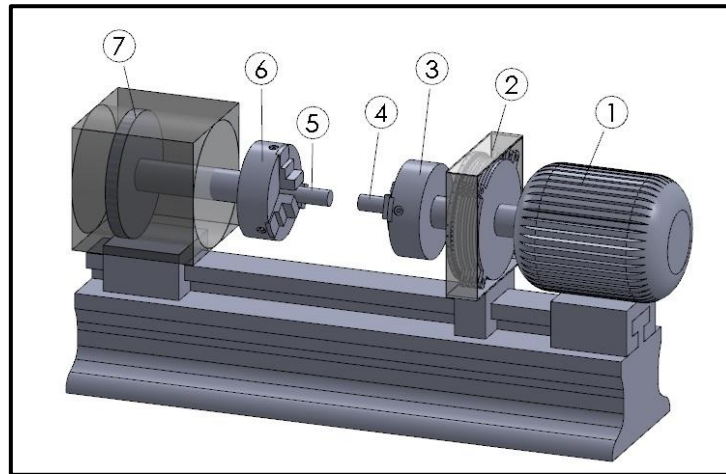
3.1.5.1. Enerji Kaynağına Göre Sürtünme KaynakYöntemleri

3.1.5.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu yöntemde aynı ekseninde bağlanan parçalardan biri dairesel hareketle istenilen devir sayısında döndürülmeye başlandığında diğer parça aksel yönde hareket ettirilerek temas etmeleri sağlanır. Uygulanan basıncında yardımı ile sürtünen yüzeylerde mekanik enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür. Bu işlem yüzeyler yeterince ısınıp plastik şekil değiştirmeye başlayınca kadar devam ettirilir. Daha sonra motor ani bir şekilde durdurulur. Uygulanan aksel kuvvet ara yüzeyde yeterli plastik deformasyonun oluşması amacıyla artırılır ve malzeme soğumaya bırakılır. Basıncın ikinci kademesine yığma veya dövme basıncı denir [2,4]. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağındaki temel kaynak parametreleri [38];

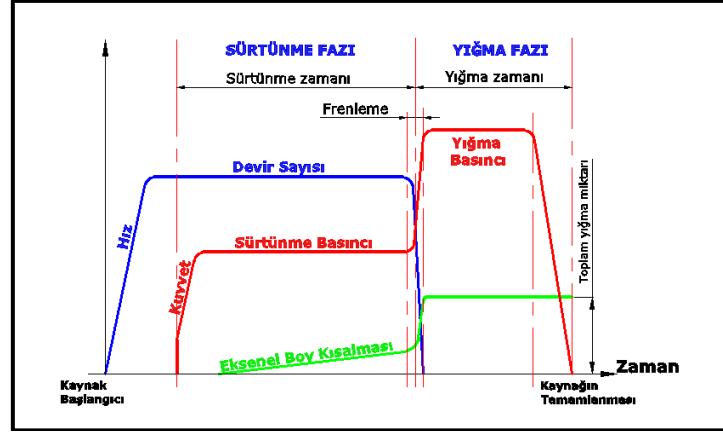
- a. Devir sayısı,
- b. Yüzeye bağlı sürtünme kuvveti,
- c. Sürtünme süresi,
- d. Yüzeye bağlı yığma kuvveti,
- e. Yığma süresi' dir.

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik gösterimi Şekil 3.5' te, zamana bağlı kaynak parametrelerinin değişimi ise Şekil 3.6' da gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterilişi

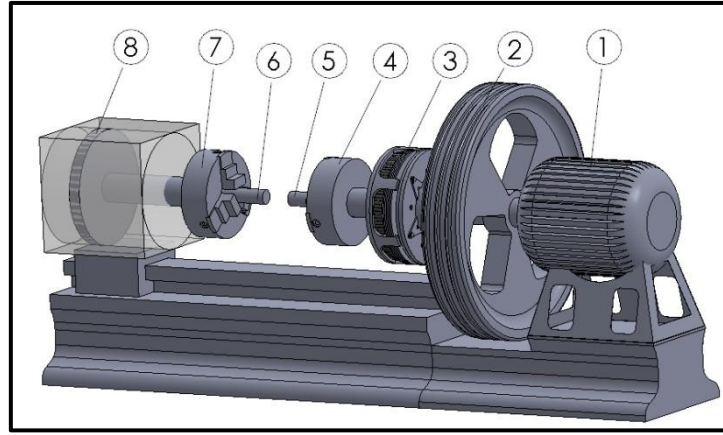
- | | | |
|---------------------|---------------------|---------------|
| 1. Tahrik motoru | 2. Fren | 3. Döner ayna |
| 4. Döner iş parçası | 5. Sabit iş parçası | 6. Sabit ayna |
| 7. Yığma silindiri | | |



Şekil 3.6. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri [2]

3.1.5.1.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Atalet kaynağı olarak adlandırılan bu yöntem sürekli tahrikli sürtünme kaynağındaki mekanizmaya sahip olup, dönen parçayı tutunan mil üzerine bir volan eklenmiştir. Şekil 3.7’ de atalet kaynağı prosesinin şematik şekli görülmektedir.



Şekil 3.7. Volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterilişi

- | | | |
|----------------------|---------------------------|---------------|
| 1. Tahrik motoru | 2. Değiştirilebilir volan | 3. Dönen ayna |
| 4. Dönen iş parçası | 5. Sabit iş parçası | 6. Sabit ayna |
| 7. Yığılma silindiri | | |

Bu yöntemde sürtünme kaynağı için gerekli enerji, volanın ivmelendirilmesi, dolayısıyla dönme enerjisinden kazanılan mekanik enerjinin bir volanda depolanması ile elde edilmiş olur. Daha sonra iki parça temas ettirilir ve bir hidrolik silindir ile belirli bir eksenel kuvvet, gerekli plastik deformasyon oluşuncaya kadar arttırılarak uygulanır. Parçalar bu basınç altında sürtünür. Volan enerjisi ara yüzeydeki sürtünmeyle harcanarak

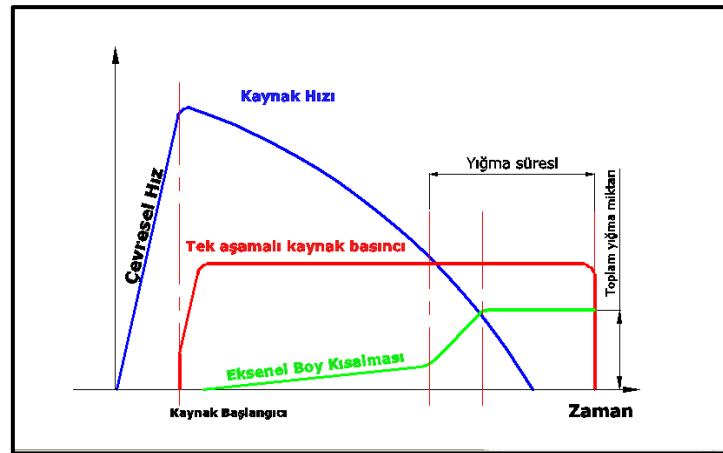
ısı enerjisine dönüşür. Tahrik motorunun devreden çıkarılması ile fren yapmaya gerek kalmadan volanın hızı azalırken kaynak bölgesi ısınır. Bazı durumlarda volan tamamen durmadan basınç arttırılır ve volan durduktan sonra da bir müddet etki ettirilir. [2,4].

Volan tahrikli sürtünme kaynağında, kaynak işleminin basit oluşu, daha düşük enerji ihtiyacı ile çalışması ve frenleme tertibatına ihtiyaç duyulmaması avantaj teşkil ederken, iki kademeli basınç uygulamasına elverişli olmayışı spesifik parametre kontrolü için gerekli donanımına sahip olmaması dezavantajlarıdır [2,4].

Temel kaynak parametreleri [38];

- a. Kaynak işleminin başlangıcındaki, devir sayısı,
- b. Volanın kütlesi,
- c. Yığma basıncı,
- d. Yığma süresidir.

Şekil 3.8’ de volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminde kaynak parametrelerinin zamana bağlı değişimleri görülmektedir [2,4].



Şekil 3.8. Volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri [35,38].

Volan tahrikli sürtünme kaynağında ilk sürtünme aşamasından sonraki ısınma aşamasında parçalarda eksenel kısalma az olur. Enerji volandan alınarak, volanın hızı bu aşamada düşmeye devam eder. Hız ve sıcaklık düşmeye devam ettiği sırada yığma başlar. Hız belli bir seviyeye düştüğünde, volan tarafından dağıtılan enerji, yüzeyler arasında iletilen miktardan daha az olur. Metal sertleşirken moment tekrar daha yüksek bir seviyeye yükselir. Kaynak soğurken hız ve moment sıfıra düşer [35].

3.1.5.1.3. Kombine Sürtünme Kaynak Yöntemi

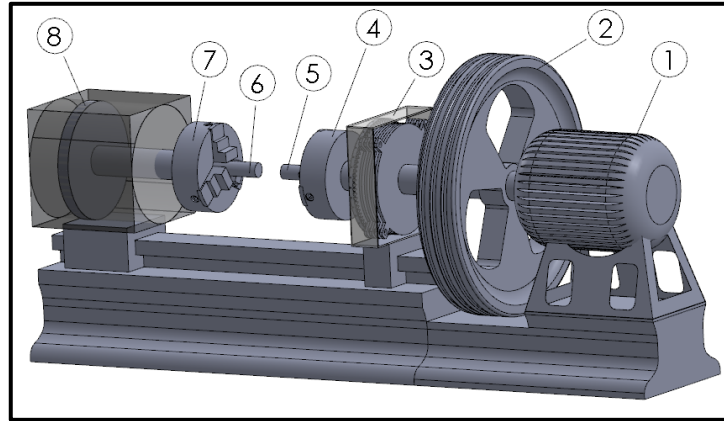
Büyük parçaların birleştirilmesinde avantajlı olan bu yöntem literatürde sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile atalet kaynağının birleşimi olarak bilinir. Kaynak işlemi; sürtünme ve yığma olarak iki aşamadan oluşur.

İşlemin başlangıcında kuru sürtünme hakimdir. Süreç içerisinde oksit tabakalarının parçalanması sonucu çıplak yüzey temasları artar ve 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 hızla azalırken moment de sıfıra düşer [35,38].

İkinci safhada ise, kaynak numuneleri sürtünme ile yeterince ısıtıldığında, atalet momentine sahip olan mil durdurulur. Yığma işlemi için basınç korunur veya artırılır. Bu basınç, kaynak edilecek malzemelerin sıcaklık mukavemetine göre seçilir [35].

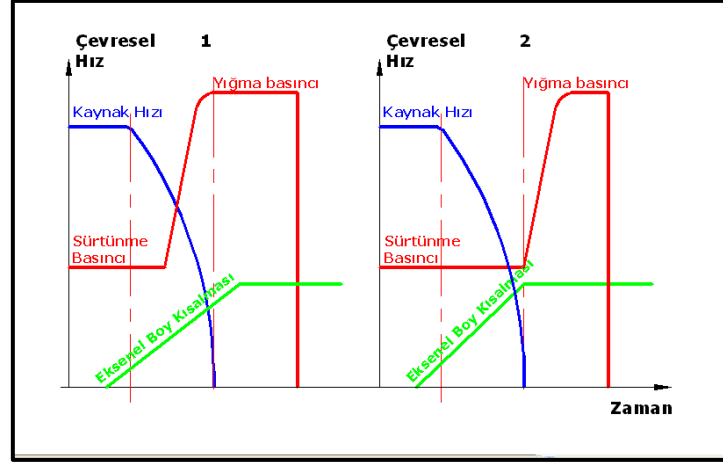
Temel kaynak parametreleri; devir sayısı, yüzeye bağlı sürtünme basıncı, sürtünme süresi, frenlemeye başlama anı, yığılmaya başlama anı yığma basıncı ve yığma süresidir.

Şekil 3.9’ da kombine kaynak işleminin şematik resmi, Şekil 3.10’ da ise kombine kaynak yönteminde, zamana bağlı kaynak parametrelerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kombine sürtünme kaynak yönteminin şematik gösterilişi

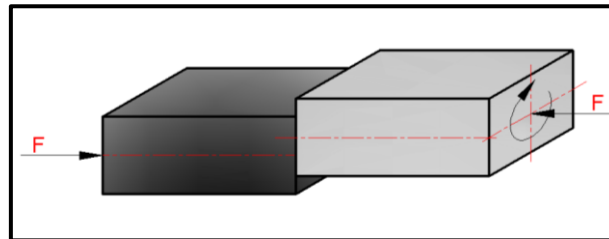
- | | | |
|------------------|---------------------------|---------------------|
| 1. Tahrik motoru | 2. Değiştirilebilir volan | 3. Fren |
| 4. Dönen ayna | 5. Dönen iş parçası | 6. Sabit iş parçası |
| 7. Sabit ayna | 8. Yığma silindiri | |



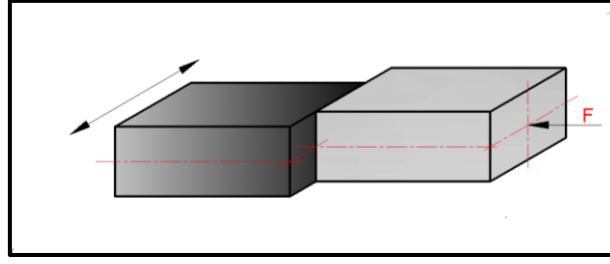
Şekil 3.10. Kombine sürtünme kaynak yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri [35,38].
 1. Dönen parçadaki yığma 2. Frenlenmiş parçadaki yığma

3.1.5.2. Hareket Şekline Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri

Sürtünme kaynağı; bir parçanın döndürülüp diğer parçanın eksenel yönde ötelenmesi ile yapılabileceği gibi, dönen veya sabit duran ara parça kullanımıyla da yapılabilir. Ayrıca bu dönme hareketi yerine 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 3.11). Lineer titreşim hareketinde parçalardan biri uygulanan basınç altında ileri geri titreşim hareketi yapar. Bu yöntem ilk defa Vill, V. I., (1962) tarafından önerilmiştir (Şekil 3.12). Açısal titreşim hareketinde ise parçalardan biri uygulanan basınç altında belirli bir açıyı gören yay parçası yörüngesinde hareket eder [2,4].



Şekil 3.11. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı [4].



Şekil 3.12. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı [4].

3.1.6. Sürtünme Kaynağı Parametreleri

Sürtünme kaynağında, kaynak kalitesini doğrudan etkileyen bu nedenle dikkat edilmesi ve sürekli kontrol altında tutulması gereken birçok parametre bulunmaktadır [34]. Yüzeye bağlı kuvvetlerin, sürtünme sürelerinin ve çevresel hızların oluşturduğu bu parametrelerin geniş tolerans aralıkları vardır. Parametreler, sürtünme kaynağı yöntemine, malzemeye ve kaynak yapılacak parçanın boyutlarına bağlı olarak değişmektedir [4,35].

Sağlıklı kaynaklar, ancak belirli kaynak parametrelerinin kombinasyonları ile elde edilebilir [11,14]. Sürtünme kaynağında aynı malzeme çiftinde, farklı kaynak parametreleri kullanılması ile ısıdan etkilenmiş bölge, kaynak deformasyonu ve boyca kısalma miktarları dolayısıyla kaynak kalitesi farklı olmaktadır (Şekil 3.13) [39].



Şekil 3.13. Farklı kaynak parametrelerinin kullanılması ile ITAB' da oluşan değişiklikler

Yapılan çalışmalar sonucunda yöntem üzerinde en etkin ve optimizasyonu gereken parametrelerden en önemlilerinin; çevresel hız, sürtünme basınç kuvveti, sürtünme süresi, yığma basınç kuvveti ve yığma süresi olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin yanında

dikkat edilmesi gereken parça geometrisi, malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti, malzemenin ısı iletim katsayıları, parça boyutunda meydana gelen kısılma gibi parametrelerde bulunmaktadır [2,4].

Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, kaynak parametreleri ile ilgili aşağıda belirtilen genel sonuçlar çıkartılabilir.

3.1.6.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Parametreleri

3.1.6.1.1. Çevresel Hız

Ara yüzey sıcaklığı çevresel hıza bağlı olarak değişmektedir, dolayısı ile bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrelerden biridir.

Çevresel hızın yüksek seçilmesi durumunda ara yüzeydeki sıcaklık artarken, deformasyon hızının değişimi kaynak süresini kısaltır.

Yüksek seçilen çevresel hızlar ITAB' ın genişlemesine neden olur [34]. Bu durumda kaynak bölgesinde oluşabilecek yüksek ısının önlenmesi için sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin çok dikkatli kontrol edilmesi gerekir. Çelikler için çevresel hız 1,2-1.8 m/s arasında önerilmektedir [2,4].

1,2 m/s altında seçilen düşük çevresel hızlar arayüzeyde yetersiz ısınma sonucunda, üniform olmayan yığmaya dolayısıyla kaynak kalitesini olumsuz etkileyecek kadar büyük momentlerin meydana gelmesine neden olur. Bununla birlikte, farklı metal bağlantıları için düşük hızlar, gevrek bir intermetalik fazın oluşumunu sınırlayabilir. [2,4]. Farklı dış çaplar söz konusu olursa devir sayısının, aynı çevresel hızı sağlayacak şekilde seçilmesi gerekir [38].

Ellis arayüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğunu öne sürmüştür. Bunlarla birlikte V.I. Vill kaynak kalitesi için düşük dönme hızlarını tavsiye etmiş ve numune çapına bağlı olarak orta ve düşük karbonlu çelikler için aşağıdaki ampirik formülü önermiştir [2,35].

$$n = (1.2 - 6.0)10^4/D \quad (3.2)$$

Bu denklemde; **n**: Dönme hızı (dev/dk)

D: Parça çapı (mm)' dir.

3.1.6.1.2. Sürtünme Basınç Kuvveti

Parça ara yüzeylerinde oluşturulacak ısının en kısa zamanda elde edilebilmesi aynı zamanda arayüzeydeki kir ve oksitleri uzaklaştırabilmek için sürtünen parçalar arasında uygulanan ısınma (sürtünme) periyodundaki şekil değişiminin belirlendiği ilk basınç kuvvetidir [38].

Sürtünme basınç kuvveti; parça geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak değişir [34]. Artan sürtünme kuvvetiyle gerekli deformasyon daha kısa sürede sağlanır [2,4]. Sürtünme kuvveti, ara yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeyler üzerinde atmosferin olumsuz etkilerini önleyebilmek için iki yüzeyin yakın temasını sağlayacak ve ara yüzeyde üniform ısınmayı sağlayabilecek büyüklükte seçilmelidir [4,35]. Aslında sürtünme basıncı, kaynak yerinin merkezinden radyal olarak çevreye doğru yeterli miktarda sürtünme momenti elde edilecek değerde olmalıdır. Sürtünme yüzeyindeki halka elemanda ortaya çıkan frenleme momenti sürtünme yüzeyi boyunca toplandığında, sürtünme momenti (M_R Döndürme momenti) için aşağıdaki denklem oluşturulabilir [35,40];

$$M_R = \int_0^r \varphi p 2\pi r^2 dr \Rightarrow M_R = 2/3 (\pi \varphi p r^3) \quad (3.3)$$

Burada; M_R : Dönme momenti (Nmm)
 p : Yüzey basıncı (N/mm²)
 r : Parça yarıçapı (mm)
 φ : Sürtünme katsayısı

Sürtünme momenti, merkezden çevreye doğru radyal olarak artar ve maksimuma ulaşır. Bu denklemde sürtünme kaynağı parametresi olarak bizim değiştirebileceğimiz tek değer basınçtır. Bu değer malzeme yapısına göre doğru bir şekilde seçilmelidir.

Basınç değişkeni, kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel kısalma ile kontrol edilebilir. Basınç etkisi altında sürtünen yüzeylerde oluşan ısı ifadesi ise aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir. Bu denklemlerde oluşan enerji Q_R , kullanılan enerji Q_Z kaybolan enerji miktarı Q_V ile ifade edilmiştir [2,40].

$$Q_R = M_R n t \quad (3.4)$$

$$Q_z = \Delta mc\Delta t \quad (3.5)$$

$$Q_v = kF(T - T_0)t \quad (3.6)$$

Yukarıda verilen (3.4) ve (3.6) denklemlerinde;

n: Devir sayısı (dev/dak)

k: Isı iletim katsayısı (W/m²°C)

F: Yüzey alanı (m²)

T: Sıcaklık (°C)

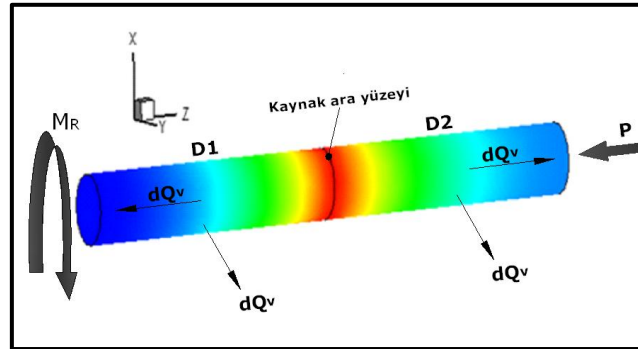
t: Süre (sn)

m: Kütle (kg)

c: Özgül ısı (kJ/kg°C)

Q: Isı (kcal)' dır.

(3.4) ve (3.6) denklemlerinde görüldüğü gibi devir sayısının yüksek olması ile oluşan enerji yükselecektir. Diğer taraftan işlemin kısa zamanda tamamlanması ile kayıp enerji azalacaktır [40]. Şekil 3.14 ile kaynak süresince parçalarda oluşan ısı dağılımının şematik şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Kaynaklı parçalardaki ısı dağılımı

Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliğe uygulanan basıncı iki katına çıkarmak, güç talebini % 50 arttırır. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikte yapılan sürtünme kaynağı için güç gereksinimi, başlangıç durumu için 4,8 kw/cm² 'dir. Daha hızlı enerji girişi ve yüksek basınç, ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) genişliğini etkiler. Metal yer değiştirme oranını hızlandırır ve böylece kaynak zamanını kısaltarak paralel olmayan kenarlı ısı bandı oluşturur. Eğimi düşük olan sıcaklık grandiyentinin iç yüzeyin hızlı soğumasına yol açması ve kaynak yeteneğini azaltan sert yapıların oluşması sebebiyle, hava ile sertleşebilen çeliklerin kaynağında bu durum önemli bir sonuç olarak değerlendirilir [35].

3.1.6.1.3. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresi yeterli çevresel hıza ulaşan parçaların birbiri ile temas ettiği andan itibaren başlayan ve ara yüzeyde plastik şekil verme sıcaklığı sağlanıncaya kadar geçen zamandır.

Isıtma fazı veya sürtünme fazı olarakta adlandırılan bu süreç, esas olarak malzemeye, kaynak ağzının hazırlanmasına kaynak yapılacak parçalardaki gerekli sıcaklık dağılımı ve parça kesitine bağlıdır. Tüm kaynak yüzeylerinin aynı anda ısınmasıyla kısa süreli kaynak periyotları elde edilir [38].

Isıtma fazı, sürtünen yüzeylerdeki olası kalıntı ve pislikler uzaklaştırılıp, yüzeylerde yeterli deformasyon sıcaklığı (kaynak için gerekli olan kaynak sıcaklığı) sağlanıncaya kadar devam etmelidir [34]. Buna karşın malzemeye göre seçilecek olan sürtünme süresinin uygun olmaması durumunda; süre az ise düzensiz ısınmayla beraber yetersiz plastisiteye, ara yüzeyde birleşmemiş bölgeler nedeni ile yetersiz kaynaklanmaya ve kirlenmelerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Sürenin aşırı uzun olmasında düşük iletkenliğe, daha fazla malzeme tüketimine, aşırı yığılmayla birlikte ITAB' ın genişlemesine sebep olur [2,4].

Ellis parametre optimizasyonu ile ilgili yapmış olduğu çalışmada sürtünme süresini t (sn) malzeme çapına D (mm) bağlı olarak aşağıdaki şekilde formülize etmiştir [2].

$$t = 8.255 \times D \text{ (sn)} \quad (3.7)$$

Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise sürtünme süresinin artması ile kaynak bölgesindeki sertlik değerlerinin arttığı, sürtünme sürelerindeki artışın belli sınırlardan sonra malzeme mekanik özelliklerini azalttığı bildirilmiştir [41,31].

3.1.6.1.4. Yığma Basıncı

Sürtünme süresi boyunca uygulanan sürtünme basıncı, sürtünme periyodu sonunda arttırılarak ara yüzeydeki ısıtılmış metal yığılır. Durdurma safhasını içeren bu süreç içinde kaynak yerindeki sıcaklık, hemen hemen sabit değerdedir. Fakat durdurma zaman aralığının bitiminden itibaren bu sıcaklık düşmeye başlar. Bu nedenle dönme hareketi durdurulduğu anda hemen bir yığma basıncı uygulanmalıdır ki kaynaklanacak numuneler

daha fazla soğumadan önce, sıcak işlemle kaynak bağı tam olarak gerçekleştirilmiş olsun. Malzemede soğuma basınç altında gerçekleşmelidir [39]. Yığma basıncı olarak adlandırılan bu periyot ile kaynak bölgesi bir tür termomekanik işleme tabi tutulmuş olur ve bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir. Bu nedenle diğer yöntemlerle kaynaklanamayan metaller ve metal alaşımları sürtünme kaynak yöntemi ile rahatlıkla kaynatılabilir [2].

Özellikle çelikler için sürtünme periyodunu takiben bir yığma basıncının uygulanması bağlantı kalitesini artırır. Seçilen yığma basıncı değerlerinin malzemelerin sıcak akma sınırının altında olması gerekir [34]. Malzeme kombinasyonlarında ise daha düşük mukavemetli malzeme kullanılacak parametreyi belirler [2,38].

Yığma basıncının yüksek olması, malzemede fazla deformasyon oluşturur ve bu aşırı deformasyon, kaynak bölgesinde metalik olmayan inklüzyonların arzu edilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenmesine neden olur. Bu durum kaynaklı bağlantının kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz olarak etkiler. Düşük olması ise elverişsiz şekillendirmeye dolayısıyla yüzeyler arasında tam bir bağlantının sağlanamamasına sebep olur [2,35]. Genel olarak, yığma basınç kuvveti paslanmaz çelikler için sürtünme basınç kuvvetinin iki katı olarak tavsiye edilirken, 1980 yılında yayınlanan Welding Handbook' ta düşük karbonlu çelikler için; sürtünme basıncı 30-65 MPa, yığma basıncı 75-140 MPa, orta ve yüksek karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 70-210 MPa, yığma basıncı 100-420 MPa değerleri arasında verilmektedir [4,42].

Farklı iki malzemenin sürtünme kaynağında, yığma basıncını hesaplarken, üç önemli faktör ortaya çıkmaktadır. Bunlar [2]:

1. Yığma işlemi, plastik şekil değiştirme kurallarına göre meydana gelmektedir.
2. Yığma öncesi sürtünen yüzeyleri etkileyen ısı derinliği, plastik şekil değiştirme oranı ve derecesi ile saptanır. Söz konusu sürtünme etkisiyle meydana gelen ısı derinliği, malzemenin uç formunda yapılacak konstruktif değişikliklerle direkt olarak şekillendirilebilir veya arzu edilen dereceye getirilebilir.
3. Sürtünme kaynağı için kullanılan yığma basıncı değerleri hesaplamaları yığma yapılan diğer kaynak metaodları için de kullanılabilir.

Metal malzemelerin deformasyonu, hidrodinamik analiz ile açıklanabilir. Yığma süreci, iki dairesel düzlem arasındaki vizkoz sıvının akışı ile tarif edilir. Kullanılan vizkozite bağlantısı;

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp \left[b \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

Denklemleri ile verilir. Literatürde teklif edilen akışkan akışının diferansiyel denklemlerinin integrasyonu ile de yığma basıncı kuvveti hesaplanır [2].

$$P_f = \frac{-v \cdot R^2 \cdot \mu_0 \cdot b}{\left[4 \cdot h^3 \cdot \left(2e^{-b} - \sqrt{\frac{\pi}{b}} \cdot \phi \sqrt{b} \right) \right]} \quad (3.9)$$

Burada;

P_f: Yığma basıncı kuvveti (Kg/mm²),

μ: Akışkan malzemenin viskozitesi (gr/sn),

V: Kaliteli bir kaynak bağlantısı için malzemenin yığılma hızı (mm/dk),

R: Deformasyona uğrayan bölgenin derinliği (mm),

μ₀: Sıvı modelin relatif viskozitesi (gr/sn),

ε: Numunenin şekil değiştirme oranı,

b: Metallerin mekanik özelliklerini karakterize eden katsayı.

$$b = \delta B_{(P)} / \delta B_{(0)} \quad (3.10)$$

Bu denklemde;

δB_(P): Metallerin deformasyon bölgesinin sınırlarına karşılık gelen sıcaklıktaki akma noktasıdır. Sürtünme kaynağında bu sıcaklıklar 600-700 °C civarındadır.

δB₍₀₎: Numunenin temas bölgesindeki sıcaklıkta deforme olmuş metalin akma noktası,

Kaliteli bir kaynak bağlantısı için yukardaki eşitlikler yerine konulduğunda gerekli basıncı kuvveti P_f formülü elde edilir [2].

$$P_f = - \frac{R^2 \cdot b \cdot \delta B_{(0)}}{4h^2 [2e^{-b} - \sqrt{\frac{\pi}{b}} \cdot (\sqrt{b})]} \quad (3.11)$$

Tylecote [43] yaptığı çalışmada en önemli parametre olarak eksenel basıncı ele almıştır. Eksenel basıncı ara yüzeydeki sıcaklığı etkilemekte ve gerekli momenti

sağlamaktadır. Ayrıca eksenel basınç ile birlikte yığma basıncı ve çevresel hızı da önemli üç parametre olarak belirlemiştir. Eksenel basınç değerini, yumuşak çelikler için 56.2 MPa, orta karbonlu çelikler için 70.3 MPa olarak önermiştir.

3.1.6.1.5. Yığma Süresi

Yığma süresi, malzeme çiftlerinin ara yüzeyinde gerekli plastik deformasyonun tamamlanabilmesi ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için basınç kuvvetinin arttırılarak uygulandığı süredir.

Yığma süresi doğrudan malzemeyle ilgilidir. Parametre optimizasyonu üzerinde yapılan çalışmalarda bu süre, malzeme soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir [2,4]. Bu da birleştirilecek parça çapına bağlı olarak genellikle sürtünme süresinin iki katı olacak şekilde hesaplanır [34].

Bu parametrelerle birlikte, parça geometrisi, malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti, malzemenin ısı iletim katsayıları, parça boyutunda meydana gelen kısılma gibi özelliklerinde göz önünde bulundurulması gerekir [2,35]. Malzeme kombinasyonlarında kaynak karakteristikleri sıcak mukavemeti daha düşük malzeme tarafından belirlenir [38].

Ellis [6] sürekli tahrikli sürtünme kaynağında kullanılan parametrelerin optimizasyonu üzerine yapmış olduğu değerlendirme sonucuna göre malzeme cinsine bağlı olarak parametre değerlerini saptamaya çalışmıştır. Buna göre Tablo 3.1 oluşturulabilir [2].

Tablo 3.1. Aynı kesitli parçalar için optimum, sürtünme kaynak parametreleri [2].

Malzeme (Çap 20 mm)	Sürtünme Kuvveti (N/mm ²)	Yığma Kuvveti (N/mm ²)	Sürtünme Süresi (sn)	Yığma Süresi (sn)	Çevresel hız (m/sn)
Alaşımsız ve Düşük Alaşımlı Çelikler	20-80	80-200	1-10	2-10	0,5-5
Yüksek Alaşımlı Çelikler	40-100	120-400	3-12	2-10	0,5-5
Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Alaşımlar	60-180	180-600	5-15	2-15	0,5-5
Hafif Metaller	10-80	20-250	1-8	2-5	0,5-4
Ağır Metaller	10-80	20-250	1-8	2-5	0,5-4

3.1.6.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağında Kaynak Parametreleri

Optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi, malzeme veya malzeme kombinasyonlarına, kaynak yüzeyinin boyutlarına bağlı olarak değişir. Kaynak parametrelerinin yığılma mesafesi, ITAB' ın genişliği, sertlik dağılımı ve bağlantı mukavemeti üzerine önemli etkileri bilinmektedir [38].

Birleştirilecek parçaların kesitine ve malzeme cinsine bağlı olarak ihtiyaç duyulan enerji ve basınç değerleri tespit edilir. Bu değerler, kaynak enerjisinin ve yüzeye bağlı sürtünme kuvveti ile yığılma kuvvetinin ön hesabında kullanılır. Daha sonra elde edilen sonuçlar kaynak parametreleri olan volan atalet momenti, başlangıç devir sayısı ve yüzeye bağlı sürtünme ve yığılma kuvvetine dönüştürülür ve ilk kaynakta optimizasyon amacıyla kullanılır. Optimizasyon çalışmaları sonunda; malzemenin sürtünme, deformasyon ve termik davranışlarına bağlı olarak hesaplanan kaynak parametrelerindeki, değişken faktörler (Malzemeye bağlı enerji ve basınç faktörleri ile çevresel hız değerleri) düzeltilerek kullanılır [38].

3.1.7. Malzeme Özelliklerinin Sürtünme Kaynak Kabiliyetine Etkisi

Sürtünme kaynak yönteminde; malzemelerin mukavemet, sıcak mukavemet, deformasyon kabiliyeti, ısı iletkenliği bağlantı kalitesinin artırılmasında önemli etkenlerdir. Bu nedenle kaynak parametreleri, kaynak yüzeyinin değişmesi halinde aynı enerji dönüşümünü ve deformasyonu sağlamak üzere malzemeye uygun olarak seçilmelidir.

Demir ve demir dışı metaller ile farklı termik ve mekanik özelliklere sahip malzeme ve malzeme kombinasyonları sürtünme kaynak yöntemi kullanılarak kaynak edilebilirler. Erime sıcaklığı altındaki sıcaklıklar ve kısa kaynak süresi sürtünme kaynağına bu olanağı vermektedir. Ancak bağlantı özelliklerinin ve yüksek verimlilik avantajlarının sağlanması amacıyla aşağıdaki noktalara dikkat edilmesi gerekir [2,40];

a. Malzemenin mukavemeti: Malzemenin mukavemeti, sürtünme kaynağı sırasında, aksel basınç ve dönme momentiyle aşırı bir deformasyonun oluşumunu önleyecek kadar yüksek olmalıdır. Mukavemet ve sertlik değerlerinin değişimleri kaynak yapılan parçaların boyut toleranslarını önemli şekilde etkiler [38].

b. İç yapı durumu: Malzemenin içyapısı bir sürtünme kaynağı partisi içinde aynı olmalı ve değişmemelidir. Malzemenin sürtünme kaynağına uygunluğu, yapı içindeki düzensizlikler ne kadar az olursa ve bunlar içyapıda ne kadar homojen dağılırsa o kadar iyidir.

c. Boyut sapmaları: Sürtünme kaynak yönteminde malzemelerin boyca kısıalma miktarları; malzemeye ve kaynak karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Kaynak yapılan parçaların boyutlarında meydana gelen değişimlerin daha sonraki üretim toleranslarına uymasına dikkat edilmelidir [38]. Boyca kısıalma miktarları parametrelerin kontrolü ile hassas olarak ayarlanabilir.

Farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin sürtünme kaynağı simetrik olmayan deformasyon miktarlarına yol açar. Yüksek bir kaynak mukavemeti ise relatif olarak simetrik plastik deformasyonu veren farklı malzemelerin kaynağında elde edilebilir [34]. Farklı malzemelerde simetrik bir deformasyon için Vill, parçalar arasında % 15 – 25 oranında daha büyük çaplı olmasını önermiştir [4,40].

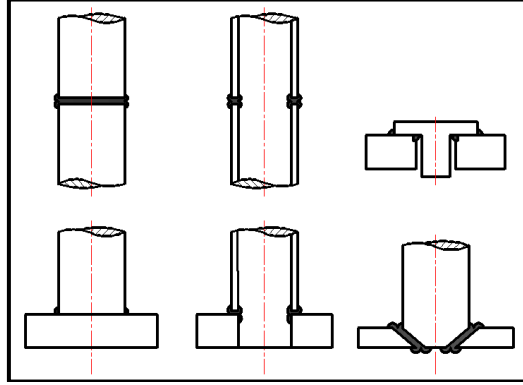
d. Kaynak yüzeyi: Sürtünmeyi önleyecek veya azaltacak hadde ve döküm tabakaları, kalın oksit tabakaları, çekme veya dövme işlemi tozları, yağlama maddeleri, kaplama tabakaları gibi yabancı maddeler kaynak yüzeylerinden uzaklaştırılmalıdır. Kaynaklı parçada boyca kısıalma miktarı az ise yağ, gres, boya, ince pas tabakası da giderilmelidir [40].

Malzeme kombinasyonlarında farklı deformasyon kabiliyetinin dengelenmesi amacıyla sıcakta yüksek mukavemetli parçalar, bir ön tavlama ya tâbi tutulmalıdır [38]. Ağız bölgesindeki su verilmiş sert tabakalar da yumuşatma tavlamaıyla giderilmelidir veya bu tabaka kaynak işlemi sırasında ortadan kalkabilecek şekilde ince olmalıdır [40].

e. Parçaların bağlanması: Kaynak işleminde söz konusu olan eksenel kuvvetlerin ve dönme momentlerin iletilebilmesi için, yeterli uzunluktaki parçalar mümkünse bir destekle bağlanmalıdır. Serbest boy, salınımlarının ve sapmaların önlenmesi için mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır. Bu boy, teorik olarak meydana gelecek çapakları engellemeyecek uzunlukta seçilmelidir (Serbest boy = 1,5 x çap) [38].

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 yapılacak açılı bağlantılarda ise eksenle olacak açının 30°' den büyük olması D.L. Kuruzar tarafından önerilmiştir. Genel literatürde bu açının 30-60°

arasında olması tavsiye edilmiştir. Bazı birleştirmelerde yığmanın yapılması zor olduğundan yığma aralıkları bırakılmalıdır (Şekil 3.15) [40].



Şekil 3.15. Sürtünme kaynaklı parçalara ait bağlantı şekilleri [4].

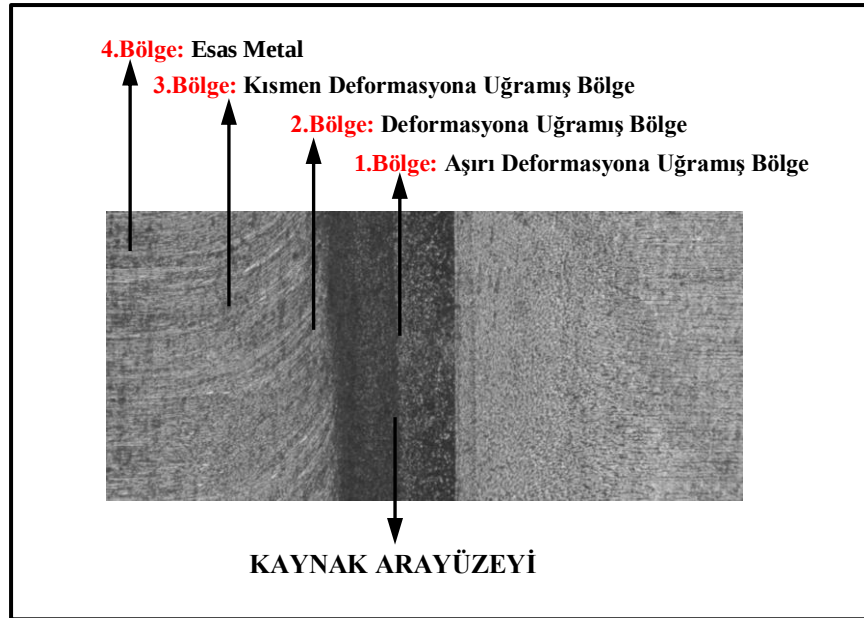
f. Sıcak şekil değiştirme kabiliyeti: Sürtünme kaynağında dövülebilen iyi kuru sürtünme özellikleri olan bütün malzemeler kolaylıkla kaynak edilebilir [34]. Kuru yağlama sağlayan alaşım elementleri bağlantı bölgesinin kaynak sıcaklığına erişmesini engeller [38]. Aynı ısıl davranışı gösteren malzemeler, aynı cins malzemeler gibi kabul edilerek kaynak edilir. Plastik şekil değiştirme yeteneği ve erime sıcaklıkları farklı malzeme çiftleri birleştirilirken kaynak parametreleri ve kaynak yüzey şartları daha yüksek mukavemetli parçada yeterli miktarda plastik deformasyon sağlayacak şekilde seçilmelidir [2].

Malzemelerin yeterli düzeyde sıcak şekil değiştirilebilir olması bağlantının yeterli kalitede olmasını sağlar [38]. Alaşım ve düşük alaşım çelikler için artan sıcak mukavemetlerinden dolayı yüzeye bağlı büyük kuvvetler ve uzun sürtünme süreleri gerekir. Ortaya çıkan sertlik dağılımı uzun sürtünme süreleriyle giderilir [2].

Yüksek alaşım çeliklerin, düşük deformasyon kabiliyetlerinden dolayı yüzeye bağlı büyük kuvvetler ve uzun sürtünme süreleri gerekir. Özellikle "havada su alan çelikler" de kaynak bölgesinin soğuma hızını mümkün olduğu kadar küçük tutmak amacıyla yeterli genişlikte, ısı tesiri altında kalan bir bölge temin edilmelidir [2,38]. Yüksek sıcaklıkta mukavemetli olan alaşımlar yüzeye bağlı küçük kuvvetler ve yüksek dönme hızları gerektirir [2].

3.1.8. Sürtünme Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Özellikleri

Sürtünme kaynağında, birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklik dört bölgeye ayrılarak incelenir. Bunlar; birleşme ara yüzeyindeki temas alanı (aşırı deforme olmuş bölge), deformasyona uğramış bölge (burada meydana gelen deformasyon, çevresel hız ve eksenel yığılma oranının bir bileşimi olarak ortaya çıkar), kısmen deformasyona uğramış bölge ve deformasyona uğramamış her iki taraftaki ana malzemedir [2,34]. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen malzemelerdeki içyapı dönüşümünü gösteren fotoğraf Şekil 3.16’ da verilmiştir.



Şekil 3.16. Kaynak bölgesi ve ITAB içyapı görünümü (x5)

Sürtünme kaynağında bir erime bölgesinin olmayışı, ısı tesiri altındaki bölgenin dar olması ve kaynağın çevresindeki plastik olarak deforme olmuş malzemenin varlığı en belirgin özelliklerini teşkil eder [2].

Aşırı deformasyona uğramış bölge malzemelerin basınç altında birbirine karıştığı ve tamamen deformasyona uğradıkları bölgedir. Her iki malzeme atomlarının karşılıklı olarak birbiri içine difüzyona uğradıkları görülür. Bu bölgede aşırı derecede mekanik bir karışma ve girdap olayı olduğundan, difüzyon olayı daha zorunlu olarak meydana gelmektedir.

Malzemelerin birbirine karıştığı aşırı deformasyona uğramış bölge ile esas metal arasında ısıdan etkilenen bölge bulunmaktadır. Isıdan etkilenen bölge yaklaşık olarak malzemelerin ergime sıcaklığının yarısına kadar yükseldiği ve bu sıcaklığın üzerindeki

bölgelerdir. Aynı zamanda termomekanik etkiyede maruz kalan bu bölge, deformasyona uğramış ve kısmen deforme olmuş iki farklı yapıdan oluşmaktadır (Şekil 3.16). Isıdan etkilenen ancak plastik deformasyonun olmadığı kısımlarda, kısmen deformasyona uğramış bölgenin içinde yer almaktadır. Bu bölgede malzeme sürtünme sırasında oluşan ısıdan etkilenir ve özelliklerinde değişimler ortaya çıkar.

Kaynak yapılan parçaların az miktarda ısı tesiri altında kalması da çok az olan veya hiç mevcut olmayan erime bölgeleriyle yakından bağlantılıdır. Frenleme ve yığılma anında bağlantıda meydana gelen sıcak torsiyon tane küçülmesine yardımcı olur Bir dizi bozucu metalürjik olay, örneğin iri tane oluşumu bu arada önlenir. Kaynak dikişi bölgesindeki yüksek soğuma hızı dönüşüm sertleşmesi yapan çeliklerde martenzit oluşumuna neden olabilir, fakat bu durum uygun ısı girişiyle önlenabilir [38].

Farklı cinsten malzemelerin sürtünme kaynağı sırasında içyapı değişimleri ise aşağıda sıralanmıştır.

a. Farklı cinsten metalik malzemelerin kaynak yapılamamasına neden, birçok malzeme çiftinde gevrek intermetalik fazın oluşumudur. Bu bağlantıların dayanım ve deformasyonu; oluşan intermetalik faz tabakasının kalınlığına ve ince taneli oluşumuna bağlıdır. İntermetalik fazlar sert ve gevrek olduklarından, kalınlıkları belirli genişliği aşınca, bulundukları tabaka boyunca, aşırı bir gevrekleşme gösterirler. Ergime sıcaklığı düşük ise, bazı hallerde kaynak yapma sırasında bile çatlamların meydana gelmesine neden olurlar.

Metaller arası gevrek fazların oluşumu, amaca uygun malzeme çiftlerinin seçimiyle en aza indirilebilir. Böyle bir malzeme çiftinin kaynağının söz konusu olduğu durumlarda, kaynak parametreleri birleşme bölgesinde meydana gelen metaller arası fazların mümkün olduğu kadar karışımını sağlayacak şekilde seçilmelidir [2,35].

b. Yüksek karbonlu alaşımsız çeliklerde, karbon miktarının azalması sebebiyle lokal olarak mukavemet değerlerinin azalması.

c. Ergime sıcaklığı malzemelerin kendilerinden daha az olan ötektik alaşımların oluşumu ve bu ötektikumlardan nedeni ile bazı hallerde kaynak sırasında bile çatlakların meydana gelmesi.

d. İçyapıda rekristalizasyon sonucu tane irileşmesine bağlı olarak yumuşak bölgeler meydana gelmesi [35,38].

e. Çeliklerin martenzitik içyapı dönüşümü. Martenzitik dönüşüm yapan bölgelerde tanelerin belirli bir büyüklük ve sertliği ulaşması ile intermetalik fazlarda görüldüğü gibi gevrekleşmenin olması [38].

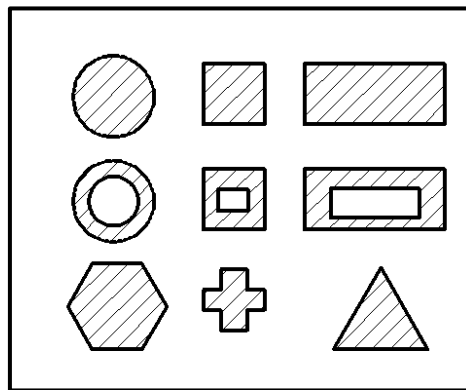
Bu malzeme dönüşümlerinin hepsi de kaynaklı bağlantılarının mekanik özelliklerini, olumsuz olarak etkiler. Sürtünme kaynağının oldukça kısa sürede yapılması ve bu sırada hem sıcaklık yükselirken hem de daha sonraki şişirme sırasında aşırı derecede plastik deformasyonların meydana gelmesi, diğer kaynak yöntemlerine göre malzeme içyapı dönüşümünü azaltıcı yönde etkileyerek bir avantaj sağlar [2,44]. Seçilen kaynak parametrelerine bağlı olarak malzeme içyapıları ve mekanik özellikleri değişmektedir [38].

3.1.9. Uygulama Alanları

3.1.9.1. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri

Sürtünme kaynağı uygulamalarının büyük çoğunluğunu eksenel simetriye sahip dairesel kesitli malzemelerden oluşmasına rağmen teknolojik gelişmelerle, daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kullanılmaktadır (Şekil 3.17) [2,38].

Sürtünme kaynağı cihazındaki dönen aynanın istenilen pozisyonda frenlenmesi ile dönele simetrisi olmayan parçaların da alın kaynağında, meydana gelebilecek açısal hatalar önlenmekte ve birleştirilebilmektedir [35].



Şekil 3.17. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilen parça kesitleri [35].

3.1.9.2. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzeme Türleri

Malzeme karakteristikleri hakkındaki bilgiler, metalik malzemenin ve malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygun olup olmadığı konusunda kesin bilgi vermez. Her yeni malzeme ve malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygunluğu, birleştirilecek parçalar için optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak deneylerle ortaya çıkarılabilmektedir. Başka kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi mümkün olmayan malzemeler ve kombinasyonları, sürtünme kaynağı ile birleştirilebildiklerinden, diğer kaynak yöntemleri için söz konusu olan kaynağa uygunluğun belirlenmesindeki kriterler sürtünme kaynağında kullanılamazlar [38]. Ancak aynı veya farklı özellikteki mühendislik malzemelerinin tamamına yakını sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilir [2]. Buna rağmen aynı özellikteki gereçlerin sürtünme kaynağı daha kaliteli sonuçlar verdiği için tercih edilmelidir.

Bazı metal ve alaşımları ise aşağıda belirtilen metalürjik içeriklerinden dolayı sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmeleri zordur. Bunlar; serbest grafitin sürtünme sıcaklığını sınırlandırmasından dolayı bazı dökme demirler ile % 0,3' ün üzerinde Kurşun (Pb) içeren bronz ve pirinçler [35,38], % 0,13' ün üzerinde Kükürt (S), Kurşun (Pb) içeren çelikler, geçiş bölgesi kırılganlığından dolayı yüksek derecede anizotropik malzemeler, yapısında hazır olarak grafit, Manganez (Mn) serbest Kükürt (S) gibi zayıflatıcı faz içeren malzemelerdir [40]. Bu zorluklar genelde malzemelerin sıcak gevreklik göstermesinden dolayı sürtünme ısısı ve dövmeye yöneliktir. Metallerarası gevrek fazların oluşumu söz konusu ise kaynak parametreleri, birleşme bölgesinde meydana gelen metaller arası fazların mümkün olduğu kadar karışımını sağlayacak şekilde seçilmelidir [2].

3.1.9.3. Endüstride Uygulama Alanları

Seri imalatada da uygun olması nedeni ile aynı veya farklı tür malzemelerden makine parçalarının birleştirilmesinde ve onarımında sürtünme kaynak yöntemi yaygın olarak kullanılır. Özellikle diğer yöntemlerle kaynak yapılmayan veya kaynak kalitesi düşük olan malzeme kombinasyonları söz konusu ise bu yöntem uygulanır [35,38].

Sürtünme kaynağı günümüzde çeşitli endüstrilerde uygulama alanı bulmuştur. Sürtünme kaynağı imalat sektörünün her alanında kullanılmakla birlikte özellikle **otomotiv endüstrisinde** (Supaplar, krank milleri, fren milleri, akslar, vites kolları, turbo

dondurucular, şanzıman parçaları, boru milleri, taşıyıcı aks boruları gibi uygulamalarda çelik alaşımlarının normal karbonlu çeliklerle birleştirilmesinde ve aliminyum ile aliminyum alaşımlarının birleştirilmesinde) **takım endüstrisinde** (Matkapların uçları, helisel matkaplar, freze çakıları, raybalar, çelik kalemler, delik zımbaları vb. elemanların imalatında takım çeliklerinin orta karbonlu çeliklerle birleştirilmesinde), **havacılık, uzay ve savunma endüstrisinde** (Rotorlar, türbinler, miller, itme jetleri, yanma odaları, borular, fittingler vb. malzemelerin yapımında), **elektrik ve elektroteknikte** (Gaz analiz cihazları, alıcı kameralar, kromatografiler için ayırma sütunları, röntgen cihaz tüpleri için döner anod miller, sürekli lehim uçları, devre kontakları gibi geçiş parçaları yapımında) ve petrol arama, sondaj sektöründe kullanılan boruların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte kimya endüstrisinde, gemi inşaat sektöründe ve tarımsal uygulamalarda da verimli bir şekilde sürtünme kaynağı uygulamaları yapılmaktadır [4,45,46]. Şekil 3.18’ de sürtünme kaynağı yöntemi ile imal edilmiş parçalara ait örnek resimler görülmektedir.



Şekil 3.18. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen parçalar [45].

- a. Shaft bağlantı elemanları b. Hidrolik bağlantı elemanları c. Alimünyum alaşımlı cantlar,
d. Tompon şok emiciler e. Alimünyum bağlantı elemanları f. Direksiyon milleri
g. Alimünyum süspansiyon bağlantı elemanları h. Şase bileşeni i. Stator bağlantı elemanları,
i. Vidalı aktülatör j. Bi-metalik perçinler k. Stator pervane ayarlayıcısı p. Kelebek vana
r. Yüksek basınçlı valf gövdeleri c. Yağlama elemanları d. Jeoloji karotları

3.1.10. Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

3.1.10.1. Avantajları

* İşlemin tam otomatik olarak yapılabilmesi kaynak parametrelerinin kontrol edilmesini ve kaynağın yapımını kolaylaştırır [35]. Bununla birlikte pek çok uygulamada otomatik olarak parça yüklenmesi, boşaltılması ve bunun yanında kaynak edilmiş parçaların diğer operasyonlara transferi sağlanabilir [34].

* Sürtünme kaynağı yönteminde, kaynak süresinin diğer yöntemlere göre çok daha kısa süreli olması ihtiyaç duyulan ve tüketilen enerji miktarında azaltmaktadır [4,35].

* Sürtünme kaynağında ergitme yöntemlerindeki gibi zararlı gazlar açığa çıkmaz.

* Kaynak öncesi ayrıca bir temizleme gerekmez. Kaynak süresince sürtünmenin etkisiyle bütün oksit ve diğer yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır [4].

* Kaynak dikişi, havanın zararlı etkilerinden, kaynak süreci içerisindeki yığılma ile korunur [2].

* Kaynak sırasında malzemelerin ergime derecelerinin altında bir sıcaklıkta kaynak yapıldığı için diğer kaynak yöntemi ile kaynak edilemeyen farklı kimyasal bileşimdeki malzeme ve alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılabilir. Diğer kaynak yöntemlerinin kullanılması ile gevrek faz oluşumunun sebep olduğu yetersiz mekanik özellikler sürtünme kaynağı kullanımı ile minimum seviyeye indirilir [39].

* Sürtünme sonucunda meydana gelen ısı bölgesel olduğu için kaynak dikişinin her iki tarafında ısıdan etkilenen bölge çok dardır [4].

* Sürtünme kaynağında kaynaklanan bölgenin dayanımı, birleştirilen malzemelerin dayanımına denk, bazı durumlarda yüksek olabilmektedir [21].

* Kaynak yapılırken ve sonrasında meydana gelen hızlı ısı çevrimler ince taneli bir yapı oluşmasına sebep olur, bu ise mukavemet değerlerini korur [4,35].

* İşlenmemiş malzemelerin gerekli olan yerlerinde pahalı malzemelerin kullanıldığı yerlerde bi-metal uygulamaları ile ham madde maliyetleri düşürülebilir [39].

* Sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olduğu için kaynak bölgesi cüruf v.s. içermez [38].

* İlave metal kullanılmadığı için, bütün kesitte düzgün bir kaynak kalitesi sağlanabilir [35].

3.1.10.2. Dezavantajları

* Sürtünme kaynağını sınırlandırılan en büyük etken parçanın geometrik şeklidir. Günümüzde dönen aynanın istenilen pozisyonda frenlenmesi ile açılmal çarpılmalar önlenabilmektedir ancak bağlantısı yapılacak parçalardan birinin bir eksene göre simetrik olması ve çoğu kez bir eksen etrafında dönebilir olması istenir [4]. Bununla birlikte açılmal birleşimler için pahalı değışikliklerin yapılması gerekir [39].

* Sürtünme kaynağını sınırlandırılan diğerk önemli etken ise kesit alanıdır. Kesit alanının çok büyük olması, motor gücünün ve yığma basıncı değerklerinin çok yüksek olmasına neden olur. Dolayısıyla büyük parçaların birleştirilmesi zordur. Ayrıca büyük kesitli parçalarda homojen bir ısıtma söz konusu olmadığından kaynağın yapımı daha da zorlaşmaktadır [4,35].

* Kaynak sonunda birleştirilen parçalar eksensel kısılmaya uğradıkları için bir miktar malzeme sarfıyatı olmaktadır [38].

* Sürtünme kaynak makinası ve donanımlarının maliyeti yüksektir bununla birlikte iş parçasının boyutları, sürtünme kaynak makinesinin boyutları ile sınırlanmaktadır [35,38].

* Sertleştirilmiş malzemelerde mukavemet düşer [35].

* İş parçaları, aksenal yönde basınca, ısıya ve torka karşı dayanıklı olmalıdır [35].

3.2. Paslanmaz Çelikler

Çok genel bir tarif olarak, % 2,4' ten daha az karbon içeren demire çelik adı verilmektedir. % 2,4' ten fazla karbon içeren alaşımlar ise dökme demir olarak adlandırılır. Bileşimindeki karbon miktarı ve alaşım elementleri arttıkça çeliğın dayanımı yükselir, plastik şekil değıştirme yeteneğı azalır ve kırılğanlığı artarken, akma sınırında, sertliğinde ve yorulma dayanımında önemli artışlar olur. Çeliklere ısıl işlem uygulanarak ve içerdikleri alaşım elementlerinin miktarlarına bağılı olarak mekanik özellikleri büyük ölçüde değıştirilebilir [47,48]. Çeliklerde; demir ve karbonun dışında üretimden gelen mangan, silisyum ve az miktarda fosfor ve kükürt bulunur. Bazı alaşım elementleri ise istenilen özelliklere göre ilave edilebilir ve alaşım elementlerinin miktarına bağılı olarakta çelikler sınıflandırılır. Bu sınıflandırma kapsamında paslanmaz çelikler; içerisinde ağırlıkça, en az % 12 oranında krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Paslanmaz çeliklerde karbon % 0.02 ile 1 arasında olabilir [34].

3.2.1. Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çelikler; içerisinde ağırlıkça en az % 12 oranında Krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan ince fakat yoğun kromoksit tabakası korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru ilerlemesini engeller. Paslanmaz çelikler, esas olarak Fe-Cr, Fe-Cr-C ve Fe-Cr-Ni ikili veya üçlü bileşik sistemlerine sahiptirler. Fakat mikroyapı ve özelliklerini etkileyebilen birçok alaşım elementleri de içerebilirler. Bu çeliklere yüksek korozyon dayanımı sağlayan unsur, yüzeyde meydana gelen kararlı kromoksit tabakasıdır. Bu çok ince tabakanın kalınlığı 1-10 µ mertebesinde [34].

Paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kromun yanı sıra, nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılır. Paslanmaz çelikler içerdikleri katkı elementlerine göre değişen farklı kalitelerde üretilmektedir. Bunlar [49];

1. Östenitik paslanmaz çelikler,
2. Ferritik paslanmaz çelikler,
3. Martenzitik paslanmaz çelikler,
4. Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler,
5. Çift fazlı (Dubleks) paslanmaz çelikler' dir.

3.2.1.1. Östenitik Paslanmaz Çeliker

Mükemmel seviyede şekillendirilebilirlik, korozyon direnci ve kaynaklanabilirliğe sahip olmaları sebebiyle paslanmaz çelikler içinde yaygın olarak kullanılırlar. Bu guruba dâhil alaşımlar, tavllanmış durumdayken manyetik değildir ve su verme yoluyla sertleştirilemezler. Bunun nedeni hem oda sıcaklığında, hem de yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik kafese sahip östenitik içyapılarını korumaları, östenit ferrit dönüşümünün olmamasıdır. Tavllanmış halde süneklikleri, toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri, düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Dayanımları ancak, soğuk şekillendirme ve alaşımlama ile artırılabilir. Orta dereceli ve şiddetli korozif ortamlar için geliştirilmişlerdir. Aynı zamanda kriyojenik (dondurucu) sıcaklıklardan 600 °C' ye kadar yüksek tokluğa sahiptir. Manyetik olmadıkları için manyetik malzemelerin kullanılmadığı uygulamalarda kullanılırlar [49].

200 ve 300 alaşım serilerini içerirler. Bunların içinde mükemmel şekillendirilebilirliği, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımı ile 304 kalite ostenitik elik en yaygın olarak kullanılan paslanmaz çeliktir. Bu eliklerde korozyonu onlemek için, gerekli olan kromun ferrit yapıcı etkisi ostenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir [50].

Yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Tam ostenitik çelikler ısıya ve asitlere dayanıklı, yüksek sıcaklık özellikleri iyi olan malzemelerdir. Ancak, sıcak yırtılma eğilimi gösterirler. Ostenitik paslanmaz çelikler, karbonlu çeliklerden daha yüksek termal genleşme katsayısına ve daha düşük termal iletkenlik katsayısına, daha yüksek elektrik direncine ve daha düşük erime noktasına sahiptirler. Ostenitik elikler ısı etkisiyle sertleşmediklerinden kaynaklı bağlantılar için uygundur. Ancak; ısınan ve soğuyan bölgede karbür çökelmesi oluşmaması için stabilize edilmiş türleri seçilmelidir. Öte yandan ısı iletimleri düşük, genleşmeleri yüksek olduğundan kaynakta çarpılmayı onlemek için, ısı girdisi düşük tutulmalıdır. Ostenit fazı içeren çeliklerde en büyük sorun, krom karbür kelmesidir. Kritik sıcaklıklar olarak nitelenen 400 ile 850 C arasında yüksek enerjili tane sınırları boyunca ayrışarak yan yana dizilen kromca zengin karbürler, malzemenin koroziif ortamlarda bulunması halinde tanelerarası korozyona ve tane ayrılmasına yol açarlar. Bunun nedeni, karbür bünyesine geçen krom nedeniyle, katı çözeltideki krom miktarının korozyona dayanıklılık sınırının ($< \% 12$) altına düşmesidir. Bunu engellemek için çeliğe stabilizatörler (titanyum ve tantal) katılarak, içyapı kararlı hale getirilir ve 1050-1150. C arasında çözme tavı uygulanabilir. Kompozisyon aralığı genellikle $C \leq \% 0,10 - \% 16$, $Cr \leq \% 28 - \% 3,5$, $Ni \leq \% 32 - (Mo \leq \% 7)$ şeklindedir [49,50].

3.2.1.2. Ferritik Paslanmaz elikler

Düşük karbon oranına sahip, ısııl işlemele sertleştirilemeyen Fe - Cr alaşımlarıdır. Her zaman manyetiktirler. 405, 409, 430, 422 ve 446 bu grupta yer alan en tipik ürünlerdir [49]. Ferritik paslanmaz çelikler ergime sıcaklığından oda sıcaklığına kadar hacim merkezli kübik kristal kafes sistemine sahiptirler. Ferritik paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çeliklerden daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük sünekliğe sahiptirler. Oda sıcaklığında korozyon direncinin gerekli olduğu uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılırlar [21,50].

Bu çelikler soğutma hızına bağlı olarak karbür ve nitrür çökelmeleri tane sınırları boyunca aynı hızda, matriste ise rastgele dağılıma sahiptir. Bu yüzden soğuma hızı tane boyutu, süneklik ve tokluk açısından önemli bir faktördür. Yüksek Cr içeriğine sahip alaşımlar, istenilmeyen tetragonal sigma (σ) fazının çökmesiyle gevrekleşebilirler. σ fazı, yaklaşık 440 °C gibi düşük bir oluşum sıcaklığına sahiptir. Yüksek saflıkta ferritik paslanmaz çeliklerde, Cr ve Mo içeriği σ fazının çökme sıcaklığını yaklaşık 1000 °C' ye kadar yükseltir [49,52]. Ferritik paslanmaz çelikler üç grupta sınıflandırılabilir. I. grup standart ferritik paslanmaz çelikler, korozyon ve yüksek sıcaklıklarda hidrojen kırılma hızına karşı dayanıklıdır. Bu alaşımların kaynak işlemi sonrası martenzitik yapının oluşması ve tane büyümesinden dolayı korozyon direnci, tokluk ve sünekliği azalır. II. grup ferritik paslanmaz çelikler daha düşük oranda C ve Cr içerir. III. grup ferritik paslanmaz çelikler ise yüksek Cr ve Mo içerikli ferritik paslanmaz çeliklerdir ve genel korozyon, oyuklaşma korozyonu ve gerilmeli korozyon kırılmasına karşı dayanıma sahiptirler. Bu alaşımlar, kaynak işlemi sonrası korozyona dayanıklı, tok ve sünekliğe sahip olabilmesi için oksijen ile dekarbürize edilerek üretilmelidir. Kompozisyon aralığı; $C \leq \% 0,08$ - $\% 10,5$, $Cr \leq \% 30$, - ($Mo \leq \% 4,5$) dir [21,49].

3.2.1.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Ferritik gruptaki paslanmaz çeliklerle benzer kimyasal analize sahiptirler ancak daha yüksek oranda karbon ve daha düşük oranda krom içerirler. Genelde atmosferik korozyona karşı dirençlidirler. Cr ve C oranları sertleştirme sonrası martenzitik bir yapı elde etmek için dengelenmiştir. Isıl işlemle sertleştirilebilirler ve manyetikler. Kübik hacim merkezli veya sertleştirilmiş halde tetragonal kristal kafes sistemine sahiptirler. 403, 410, 416 ve 420 bu grupta yer alan en tipik ürünlerdir [50,52].

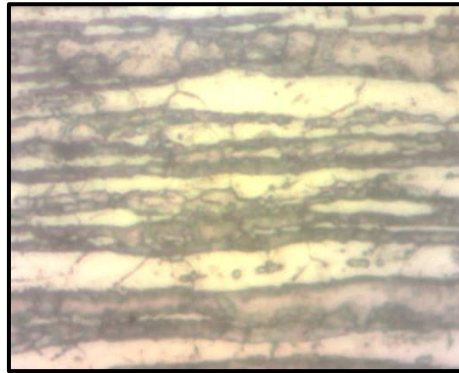
Martenzitik paslanmaz çelikler, normal şartlarda 275 MPa' lık bir akma dayanımına sahiptir. C içeriğine bağlı olarak sertleştirme ve temperleme sonrası 1900 MPa' lık akma dayanımı elde edilebilir [49,50]. Buhar türbinleri, jet motorları ve gaz türbinlerinde kullanılmaktadır. C içeriği artırılarak paslanmaz çelik, çatal-bıçak takımı, makaslar, yaylar, valfler, şaftlar vb. alanlarda da kullanılabilir. Kompozisyon aralığı; $C \leq \% 1,2$ - $\% 11,5$, $Cr \leq \% 17$, - ($Mo \leq \% 1,8$, $Ni \leq \% 6$, $V \leq \% 0,2$) şeklindedir. Özellikle yağ ve gaz endüstrisinde kullanılan $\% 13$ Cr ve düşük C içerikli çelikler süpermartenzitik paslanmaz çelikler olarak adlandırılırlar [49,50].

3.2.1.4. Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Alüminyum gibi katı çözeltiliye girme ve yaşlandırma (çökeltme), ısıtma işlemi ile çeliğe sertleşebilme olanağı sağlayan alaşım elementleri içerirler. Bu çelikler ayrıca; Cu, Al, Ti, Nb ve Mo gibi elementlerin biri veya birkaçı kullanılarak çökelme sertleşmeli martenzitik, yarı östenitik ve östenitik tip çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere alt gruplara ayrılırlar. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, 585-795 MPa akma gerilmesine sahiptirler ve sertleşebilir 400 serisi paslanmaz çeliklerden daha üstün korozyon direncine sahip Fe-Cr-Ni alaşımlarıdır [49,52].

3.2.1.5. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Yaklaşık olarak, eşit miktarda kübik yüzey merkezli östenit ve kübik hacim merkezli ferrit içeren bir mikroyapının oluşturulması ile elde edilirler (Şekil 3.19). Böylece her iki fazın karakteristiği ile beraber östenitik çeliklere kıyasla daha iyi gerilme korozyonu dayanımına; ferritik çeliklerle kıyaslandığında ise daha iyi tokluk ve sünekliğe sahip olurlar. Ayrıca iki fazın bir arada bulunması halinde tavlama durumunda bile 450 ile 690 MPa akma dayanımı gösterirler ki, bu değer, fazların tek başına bulunduğu türdeki çeliklerin akma dayanımının yaklaşık iki katıdır [49,53].



Şekil 3.19. Dupleks paslanmaz çelik mikroyapısı

Östenitik kalitelere oranla daha düşük, karbon çeliklerine göre daha yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir [49,54]. İçerdiği yüksek krom ve molibden nedeni ile korozyon dayanımı özellikle stres korozyon dayanımı, korozyon yorulması ve malzeme erozyonu dayanımı ile birlikte yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte

karbon miktarı düşük, alaşım elemanlarının dağılımının homojen olması nedeniyle tanelerarası korozyon direncinçleri yüksektir [55].

Çift fazlı mikro yapı, % 21 - 25 Cr ve % 5 - 7 Ni içeren çeliğin 1000 – 1050 °C sıcaklıkta tavllanması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir. Bu bileşimlere ait kaynak metalinin genellikle ferritik yapıda olma eğilimi vardır. Çünkü dolgu metali ferrit olarak katılacak ve sadece belirli bir miktarda ostenit dönüşümü oluşacaktır. Birçok kaynak dolgusuna tavlama işlemi uygulanması mümkün olmadığından, dolgu metalinin Ni oranı % 8 – 10' a yükseltilerek kimyasal analiz modifiye edilir ve bu sayede kaynak metalinin mikro yapısında daha fazla östenit bulundurması sağlanır [49].

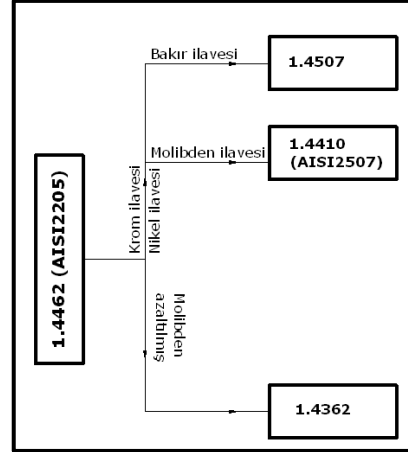
Bu malzemeler asitler ve sudan kaynaklanan klora karşı direncin gerektiği orta dereceli sıcaklık (-60 ile +300) alanlarında kullanılırlar. 300 °C üzeri ve -60 °C altı uygulamaları, bu sıcaklık aralığındaki çok düşük toklukları nedeniyle uygun değildir [21]. Bu çelikler daha çok deniz suyu uygulamalarında, arıtma tesislerinde, petrol&gaz uygulamalarında ve kimyasal teçhizat imalatında yaygın kullanım alanına sahiptir [54].

Bu alaşımlar manyetiktir ve ısıl işlemle sertleştirilemezler. Kompozisyon aralığı $C \leq 0,03$ - % 21, $Cr \leq 26$ - % 3,5, $Ni \leq 8$, $N \leq 0,35$, ($Mo \leq 4,5$) şeklindedir [49, 50]. Azot, dayanım arttırmakta ve kaynaklanabilirliğe de yardımcı olmaktadır. Nitrojen ilavesi çekirdeklenme ve çatlak korozyon dayanımını artırmaktadır [54,57]. Numaralama sistemi 200, 300 veya 400 ile tanımlanan grupların hiç birine girmez.

Dubleks paslanmaz çelikler ferrit yapıcı elementlerin oranına bağlı olarak % 10' a kadar delta-ferrit içerirler. İlk önce katılacak bu faz, içyapının ince taneli olmasını sağlar. Sıcak çatlama duyarlılığını artıran P (Fosfor), S (Kükürt), Si (Silisyum) gibi elementler düşük miktarlardadır ve büyük ölçüde ferrit kafesi içinde çözünerek ostenit fazından uzaklaşarak bu çeliklerde sıcak çatlama tehlikesini azaltır [53,55].

DPÇ' lerin sahip olduğu yüksek alaşım içeriği ve ferritik bir matris yapısı, gevrekleşmesine karşı hassasiyeti, mekanik özellik kaybını ve özellikle de tokluğu düzeltir. Başlıca dört ana kalitesi vardır; euronorm derece olarak 1.4462, 1.4507, 1.4410 ve 1.4362 şeklinde sınıflandırılırlar (Şekil 3.20).

Ferritik ve östenitik kalitelerin birçok avantajlarını birleştiren AISI 2205 çeliği en yaygın kullanılan dubleks paslanmaz çeliktir. Yüksek korozyon dayanımı ve mukavemet için AISI 2205 DP çelikler kullanılmaktadır.



Şekil 3.20. Dupleks paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması [49].

Farklı üreticilerin aynı tür malzemeleri farklı değerlere sahip olabilir. Bununla birlikte AISI 2205 DP çelikler için ortalama özellikleri ve farklı standartlardaki gösterilişleri aşağıdaki tablololarda verilmiştir. Ancak bu malzemelere ait orijinal değerler için malzeme sertifikalarına bakılmalıdır. Tablo 3.2’ de AISI 2205 DP. çeliğin farklı standartlardaki gösterilişleri, Tablo 3.3’ te kimyasal kompozisyonu gösterilmiştir [54].

Table 3.2. AISI 2205 çeliğinin farklı standartlara göre sınıflandırılması [58].

AISI	UNS No	Old British		Euronorm		Swedish SS	Japanese JIS
		BS	En	No	Name		
2205	S32205	318S13	10088-2	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	2377	SUS329J3L

Tablo 3.3. AISI 2205 DPÇ. kimyasal kompozisyonu [58].

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
Min	-	-	-	-	-	21.0	2.5	4.5	0.08
Max	0.030	2.00	1.00	0.030	0.020	23.0	3.5	6.5	0.20

AISI 2205 DPÇ korozyon dayanımı; östenitik paslanmaz çelikler içinde en yaygın kullanım alanına sahip AISI 316 çeliğinden daha iyi olup, östenitik kalitelerin bile başarısız olduğu alanlarda dahil olmak üzere birçok yerde iyi bir performans göstermektedir. AISI 2205 çeliğinin düşük karbon içeriği taneler arası korozyona karşı ve yüksek krom ve molibden içeriğinden dolayı da tekdüze, çekirdeklenme ve çatlak korozyonuna karşı yüksek bir dayanım göstermektedir [54].

AISI 2205 DPÇ östenitik kalitelerin tersine ılık klorit ortamlarda stres korozyon kırığına karşı da daha az duyarlıdır ve stress korozyon kırığına karşı iyi bir direnç göstermektedir. Bununla birlikte yüksek mukavemeti, mükemmel korozyon dayanımı ile birleştiğinde, bu kalite yüksek bir korozyon yorulması dayanımına sahip olmaktadır [54].

AISI 2205 DPÇ ısı iletim kapasitesi; karbonlu çeliklere göre daha düşüktür. Bununla birlikte AISI 2205 çeliğinin yüksek ısılarda da iyi bir korozyon dayanımına sahip olmasına rağmen, diğer dubleks paslanmaz çelikler gibi bu kalite de 300 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda, kısa bir süre bile maruz kalsalar kırılma eğilimi vardır. Eğer kırılma gerçekleşirse, bunu gidermenin tek yolu tamamını tekrardan tavlamaaktır. AISI 2205 DPÇ 1020 – 1100 °C aralığında tavllanır ve hızlı soğutulur. Bu işlemle hem çözelti tavlama işlemi, hem de stres giderme işlemi birlikte uygulanmış olur. AISI 2205 DPÇ, tavlانیp 1050 °C' den hızlı soğutulduğunda, mikroyapısının yaklaşık % 50' sini ferrit oluşturmaktadır. Yüksek tavlama sıcaklıkları veya düşük soğutma hızları da sıkça ferrit oranının artmasına neden olur [54].

AISI 2205 DPÇ kullanım alanları; ısı değıştiriciler, basınç tankları boruları ve tüpleri, kimyasal proses, taşımacılık, stoklama, petrol ve gaz dağıtımı ile proses ekipmanları, deniz ve diğer yüksek klorit ortamlarda, püre ve kağıt kazanları, kağıt makineleri gibi birçok endüstri alanlarıdır [54].

3.2.2. Paslanmaz Çeliklerde İçyapı

Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangan' dır. Krom ve nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler. Beş ana grup altında toplanan paslanmaz çeliklere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 3.21' de gösterilmiştir. Şekil 3.21 incelendiğinde, östenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı östenit tanelerinden meydana gelirken, ferritik paslanmaz çeliklerin yapısı ince ferrit tanelerinden oluşmaktadır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin yapıları ise ferrit tane yapısı içerisindeki karbür dağılımları şeklinde görülmektedir. Duplex paslanmaz çeliklerin yapısı ise östenit matris içerisinde uzanmış ferrit levhalarından meydana gelmektedir [59].

Paslanmaz çeliklerde karbon % 0,02 ile 1 arasında olabilir, düşük karbon mikrarları daha tipiktir, yüksek oranlar martenzitik çeliklerde söz konusudur. Çünkü bu paslanmaz çeliklerde karbonun varlığında krom karbür oluşur ve genellikle tane sınırlarında krom karbür olarak çökelir, bu nedenle kafes içinde çözünmüş krom miktarı % 12' lik sınırın altına düşebilir ve malzemenin korozyona dayanıklılık özelliği kaybolur. Dolayısıyla çelik bileşimindeki karbon yüzdesi yükseldikçe, krom miktarı artırılmalı veya karbür yapma eğilimi kromdan fazla olan elementler katılarak krom karbürün meydana gelmesi ve kafeste çözünmüş kromun azalması engellenmelidir (stabilize etme) [53].

3.2.3. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Termofiziksel Özellikleri

Her bir paslanmaz çelik grubuna ait ortalama fiziksel özellikler Tablo 3.4' te verilmiştir. Bu tabloda elastisite modülü, yoğunluk, ısı genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik, özgül sıcaklık, elektriksel direnç, manyetik geçirgenlik ve ergime aralığı gibi veriler yer almaktadır [49].

Paslanmaz çeliklerin ısı iletimi özelliği karbon çeliklerinden farklıdır. Örneğin düşük karbonlu AISI 1020 çeliğinin ısı iletim katsayısı 51,9 W/mK iken AISI 2205 dubleks paslanmaz çelikte 19,9 W/mK' dir. Bu değer karbon çeliğinin ısı iletim kabiliyetinin yaklaşık üçte biri kadardır. Bu durum kaynak sırasında oluşan sıcaklığın kaynak bölgesinde daha uzun süre kalacağı ve dolayısı ile bazı zorluklarla karşılaşılabilceği anlamına gelmektedir [49,58].

Yüksek kromlu paslanmaz çelikler genellikle karbon çelikleri ile aynı genleşme katsayısına sahiptir. Östenitik tip paslanmaz çeliklerde ise bu değer karbon çeliklerinkinden % 50 daha fazladır. Bu konu sadece kaynakçıyı değil aynı zamanda konstrüksiyonu yapan mühendisi de yakından ilgilendirmektedir [49].

Alaşımsız karbon çeliklerinin elektrik iletme direnci düşüktür. Paslanmaz çeliklerde ise bu değer karbon çeliklerinkinden 4-7 kat daha yüksektir. Bu nedenle paslanmaz çelik örtülü elektrodlar konvansiyonel elektrodlerden daha çabuk kızarırlar. Paslanmaz çelik elektrodların alaşımsız ve düşük alaşımlı demir elektrodlerden boy olarak daha kısa imal edilmelerinin ve % 25 kadar daha düşük akım şiddeti ile yüklenmelerinin temel nedeni de budur [49].

Tablo 3.4. Paslanmaz çeliklere ait ortalama fiziksel ve termofiziksel özellikler [49,58].

Fiziksel özellikler (Ortalama)	Östenitik Paslanmaz Çelikler	Ferritik Paslanmaz Çelikler	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	Çökelme İle Sertleşebilen. Paslanmaz Çelikler	Dubleks Paslanmaz Çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200	200
Yoğunluk (gr/cm³)	8.0	7.8	7.8	7.8	7.8
Isıl Genleşme (µm/m°C)	16.6	10.4	10.3	10.8	14.7
Isıl İletkenlik (W/m*k)	15.7	25.1	24.2	22.3	19
Özgül Isı (J/k°K)	500	460	460	460	450
Elektrik Direnci (µΩcm)	74	61	61	80	85
Manyetik Geçirgenlik	1.02	600-1100	700-1000	95	600-1100
Ergime Aralığı (°C)	1375-1450	1425-1530	1425-1530	1400-1440	1375-1530

3.2.4. Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Paslanmaz çeliklerin tavllanmış durumdaki nominal mekanik özellikleri Tablo 3.5’ te yer almaktadır. Östenitik tip paslanmaz çelikler, ferritik tip paslanmaz çeliklere oranla genellikle daha yüksek çekme dayanımına ve uzamaya, ancak buna karşın daha düşük akma dayanımına sahiptirler. Kesit daralması değeri her iki tip paslanmaz çelik türü için de hemen hemen aynıdır [49,52].

Tablo 3.5. Paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri [52,54,58].

Mekanik özellikler	Ferritik Paslanmaz Çelikler	Östenitik Paslanmaz Çelikler	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	Çökelme İle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler	Dubleks Paslanmaz Çelikler
Çekme Dayanımı (N/mm²)	415-650	550-1275	483-1965	613-1655	620-1020
Akma Dayanımı % 0,2 (N/mm²)	275-550	207-965	207-1896	255-1551	450-690
Uzama %	20-30	4-60	2-30	6-40	15-25
% Kesit Daralması	50-65	60-70	10-65	25-76	25-70
Sertlik (HV)	155-250	143-240	163-220	163-220	293-337

3.2.5. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Edilebilirliği

Kaynak edilebilir terimi, bir malzemenin iş ortamındaki performansının iyi olması ve sağlıklı kaynakların yapılabilmesi anlamına gelir. Bu sebeple kaynak edilebilirlik; dayanım, süneklik, çentik darbe dayanımı gibi mekanik özellikler ve kırılma, gerilmeli korozyon kırılması, genel korozyon dayanımı ve korozif özellikleri kapsar [21].

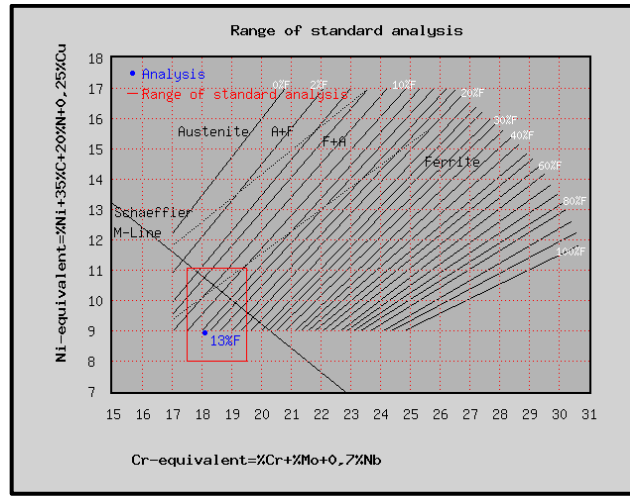
Genel olarak paslanmaz çeliklerin kaynağı için, uygulamadaki tüm kaynak yöntemlerinin uygun olduğu söylenebilir. Ancak uygun cihazların varlığı, kaynak edilecek malzemenin kalınlığı, kaynak pozisyonu, paslanmaz çeliğin türü vb. faktörlere bağlı olarak bir kaynak yöntemi diğerine tercih edilir. Bu faktörlerin incelenmesi sonucunda, paslanmaz çeliklerin kaynak edilmelerinde örtülü elektrodların kullanımının halen ön planda olduğu anlaşılr. Paslanmaz çeliklerin kaynağında, fiziksel ve metalurjik özellikleri gibi kaynak kabiliyetini etkileyen karakteristiklerinin bazı problemlere neden olabileceği unutulmamalıdır. Bu problemler, oluşturulacak konstrüksiyonların servis ömrü açısından da önem taşırlar. Bu karakteristikleri şöyle sıralayabiliriz.

- Paslanmaz çeliklerin düşük ısı iletme katsayıları,
- Yüksek ısı genleşme katsayıları,
- Yüksek elektrik iletme direnci,
- Soğuk şekillendirmeye karşı hassasiyet,

- Korozyona karşı hassasiyet

• Kaynakta izlenen yapısal değişimler (tane irileşmesi, MX çökeltileri, M_2X çökeltileri, M_3C karbürü, M_7C_3 karbürü, $M_{23}C_6$ karbürü, M_6C karbürü, Sigma (σ) fazı, Laves fazı, Z fazı, Kapa (χ) fazı, Chi (G) fazları, delta ferrit, 475 °C kırılmalılığı),

Schaeffler ve De Long tarafından daha önce geliştirilen yapısal diyagramların yerine şimdi, WRC-92 diyagramı geçmiştir. Bu diyagramlar kimyasal bileşim üstüne ferrit tahmininin doğruluğunu geliştirerek kaynak metali verisini büyük ölçüde sağlamlaştırmıştır. WRC-92 diyagramı aşağıda Şekil 3.23' te gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Paslanmaz çeliklerin WRC-92 diyagramı [34].

Paslanmaz çeliklerin benzer olmayan metallerle kaynağında uygun kaynak yöntemleri ve dolgu metalleri kullanıldığında düşük alaşımlı çeliklerde başarılı bir şekilde birleştirilebilirler. Genel bir kural olarak, kaynak metalinin dayanımı ve korozyon özellikleri bağlantıdaki en zayıf bileşene eşit olmalıdır. Buna ilave olarak, birleşme bölgesinde kaynak metalinin özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek, intermetalik bileşikler ve diğer fazlar bulunmamalıdır. Ayrıca, mikroyapı çatlamlara karşı dirençli olmalıdır.

3.2.5.1. Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Edilebilirliği

Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti genellikle ferritik paslanmaz çeliklerden daha iyi, fakat östenitik paslanmaz çeliklerden daha kötüdür. Bu alaşımların kaynak dikişleri çoğu uygulamada herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan dahi istenilen

düzeyde mekanik mukavemet ve korozyon direnci sağlarlar. Kaynak dikişi katılaştığı anda tamamen ferritiktir ancak, soğuma sırasında ferritin bir kısmı östenite dönüşür ve kaynak dikişinde dubleks yapıda olur. Isıdan etkilenen bölgede yeterli östenit oluşumu sağlayabilmek için çok hızlı soğumadan kaçınılmalıdır. Soğuma hızını etkileyen önemli faktörler; ısı girdisi, kaynak prosedüründe belirtilen minimum ve maksimum kaynak parametreleri, ön tav ve pasolar arası sıcaklıklardır. DP çeliklerde ısı girdisinin 500-25000 J/cm olması tavsiye edilir [55].

Aşağıdaki kısıtlamalara uymak kaydıyla, elektron ışın ve lazer kaynağı hariç bütün standart yöntemlerle iyi sonuç verir:

- Kaynak yapılacak malzeme kaynak öncesinde ısıtılmamalıdır. Mekanik özellikler olumsuz yönde etkilendiğinden tavsiye edilmez [21,54, 55].
- Kaynak sonrası ısıtıl işlemler ise dolgu metali kullanılmadan yapılan kaynaklar veya ana malzemeye benzer bileşime sahip dolgu metaliyle yapılan kaynaklar dışında yapılmaz [21].
- Malzemeye uygulanacak ısı girdisi düşük tutulmalıdır. Tavsiye edilen ısı girdisi sınırı 1.7 kJ/mm dir [52,54].
- Malzemede soğumanın geçişler halinde olmasına, özellikle 150 °C' nin altındaki sıcaklıklara özen gösterilmelidir [54,55].
- Dolgu malzemesi olarak AISI 2209 kalite kullanılmalıdır. Kendi kendine kaynaklanmadan kaçınılmalıdır [54].
- DP çeliklerin kaynağında en çok kullanılan koruyucu gaz Ar (Argon) gazıdır. Fakat Ar kaynak bölgesinde N (Azot) kaybına neden olur. Bu nedenle koruyucu gaza N ilave edilebilir. Tersten ve kök korumalarda kullanılan saf N gazı çok fazla östenit oluşumuna neden olduğu için tavsiye edilmez [55].
- Kaynak sonrası ısıtıl işlem genellikle gerekli değildir ve önerilmez.

Yüksek miktardaki alaşım elementleri nedeni ile DP çeliklerde, karmaşık faz dönüşüm mekanizmaları aktif hale gelmektedir. 600-1200 °C aralığında çözünen ferrit fazından östenitin yanı sıra çökelti ve intermetalik bileşikler oluşmaktadır. Bunlara 700-900 °C aralığında çökelen altıgen yapılu nitrürler (Cr₂N), 475 °C gevrekleşmesi, sigma (500-950 °C) ve chi intermetalik bileşiklerinin oluşumları örnek gösterilebilir. Bu oluşumlar malzemede gevrekliğe sebebiyet vermektedir. Faz dönüşümleri ve çökelti, malzemenin tokluğunun azalmasına ve korozyon direncinde kayıplara neden olabilmektedir [52].

DPC' lerin birçok ısı döngüye maruz kalması nedeni ile gerçekleşen faz dönüşümleri, delta ferrit miktarının değişmesine neden olmaktadır. Bu durum en çok ısıdan etkilenen bölgede sorun teşkil etmektedir. Tokluk ve korozyon direnci özelliklerinin korunabilmesi; ısı girdisi, pasolar arası sıcaklık ve kaynak dikişi genişliği gibi parametrelerin uygun seçilmesi ile sağlanan kontrollü soğuma ve tavlama süreçlerine bağlıdır. Östenit oluşumu arttırıldığında sigma ve chi çökelmelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, kaynak metali ve ana malzemede $Cr_{23}C_6$ karbürlerinin de çökeldiği bilinmektedir. Tane sınırlarında meydana gelen $Cr_{23}C_6$ çökeltilerinin sigma çökeltileriyle aynı olumsuz etkileri oluşturduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [52].

Sıcak haddelenmiş plaka ve sac, soğuk haddelenmiş plaka, sac ve rulo, dövme, çubuk, boru ve işlem görmüş bağlantı elemanları ve flanşlar olarak bulunabilen dupleks paslanmaz çelikler kaynaklı halde 300 °C kaynaklı halde ise 250 °C sıcaklıklara kadar güvenle kullanılabilirler [53].

DP çelikler sıcak çatlamaya karşı hassas değildirler ve -60 - +300 °C aralığında mükemmel tokluk ve iyi süneklik gösterirler. Kaynak kabiliyetleri açısından 500-950 °C arasında bırakıldığında sigma fazı ile gevreklemeye karşı hassas oldukları unutulmamalıdır [50].

Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında, bir erimenin olmadığı ve çok kısa sürelerde gerçekleştirilen sürtünme kaynak yönteminin kullanılması ile meydana gelebilecek bu metalürjik değişiklikler hızlı soğumanında etkisi ile elimine edilebilmektedir.

DPC' lerin katı hal kaynak karakteristikleri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda korozyon ve mekanik özelliklerin ana malzemeyle benzer olduğu belirtilmektedir. Sürtünme kaynağı üzerine yapılan çalışmada, kaynak bölgesi korozyon direncinin, ark kaynağıyla yapılan kaynaklardan daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Katı hal kaynak yöntemlerinde özellikle ergimenin olmaması lokal segragasyon etkilerinin ortadan kaldırılması açısından büyük öneme sahiptir [21].

3.3. Yorulma Olayı

Uygulamalarda statik zorlamalara ender olarak rastlanır. Kaynaklı parçalar dahil olmak üzere makine parçaları kullanım sırasında genellikle değişken zorlamalar ve titreşimler altında çalışmaktadır. Değişken zorlamalar altında çalışan metalik parçalarda, oluşan gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takiben kırılma olayına neden olurlar. Söz konusu bu değişken zorlamalarda hasar oluşturma koşulu aranmaksızın, zaman içinde bulundukları bölgede gerilme ve şekil değiştirmeler elastik sınırı aşacağı için genel olarak yorulma zorlamaları diye adlandırılır. Makine parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık % 90 - 95' i söz konusu bu yorulma zorlamaları ile meydana gelmektedir [60]. Bu nedenle konstrüksiyonların yorulma dayanımları statik dayanımlarından daha önemlidir. Ancak yükün ani olarak uygulandığı darbeli zorlamalar sonucu meydana gelen gerilmeler yorulma gerilmeleri ile aynı gerilme tipi değildir. Darbeli zorlamalar sonucu oluşan hasar ile yorulma hasarları ve malzeme iç yapısında oluşturduğu değişiklikler birbirinden farklıdır [48,61,62].

İlk defa 1850 - 1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenen yorulma olayındaki değişken gerilmeler, yükün veya gerilmenin zamana göre yönünü veya değerini değiştirmesiyle oluşan gerilmelerdir. Sürekli olarak tekrarlanan ve değişebilen yüklere karşı yapılacak hesaplarda, statik yüklere karşı konstrüksiyon hesabı yapılırken kullanılan akma sınırı yerine, yorulma mukavemeti kullanılır [60,61].

Yorulma mukavemeti (S veya σ); parçayı belli bir çevrim sayısı (N) kadar tatbik edildikten sonra parçanın kırılmasına neden olan gerilmedir. Söz konusu gerilmeler çekme, basma, eğme, burma gibi basit, ya da bu gerilmelerin bileşkesi olan ve parçaya dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetlerle birlikte ısı genleşme ve büzölmelerden doğan ısı gerilmeler de olabilir. Kırılmaya götüren mekanizma ise söz konusu gerilmenin ya da yükün döngü sayısı birikimine bağlıdır. Çünkü değişen zorlamada malzemenin iç yapısında meydana gelen değişiklikler, N ile simgelenen yük değişme sayısına göre farklılık gösterir dolayısıyla S değeri daima N değerine bağlıdır [60,63].

Yorulma deneylerinde malzemenin farklı sabit gerilmeler altında iken kaç çevrim sonunda çatlayacağı veya kırılacağı da S - N eğrileri elde edilerek tespit edilir [60].

S - N eğrileri elde edilirken; gerçek zaman ölçeğinde, kırılmanın olmadığı bir gerilmenin altındaki gerilmeye dayanma sınırı denir. Bir malzemenin yorulma özelliklerini

belirlemede, dayanma sınırı civarındaki deney verileri çok önemlidir. Dayanma sınırına ulaşmak için gereken çevrim sayıları malzemelere göre farklılık gösterir. Genellikle 1 milyon veya 10 milyon çevrim, dayanma sınırına ulaştığı düşünülen çevrim sayıları olarak kabul edilir [60].

Yorulma deneyleri geniş dağılımlıdır ve istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar için önemli sayıda numunenin test edilmesi gerekir. Bu ise S-N eğrilerinin elde edildiği deney zamanının uzun olmasına neden olur. Deney frekansını arttırarak, deney zamanları azaltılabilir. Ancak, deney frekansını arttırmak kullanılan malzemede yanlış simülasyon, ısı birikimi ile mekanik bozulma gibi bazı problemlerin artmasına neden olabilir. Bu nedenle deney şartlarının gerçek kullanım şartlarına mümkün olduğunca yakın ve benzer olmasına dikkat edilmelidir [60]. Buna rağmen deneyler laboratuvarlarda standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterebilir. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenlerle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılmazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olur [47]. Son yıllarda ise özellikle önemli parçaların yorulma özelliklerini elde edebilmek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir [60].

Yorulma özellikleri tamamen malzemenin kendine özgü özelliklerinden değil, numunenin özelliklerinden de etkilenmektedir. Yapılan deneylerde, şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makine parçasının bulunduğu ortam ve malzemenin içyapısı gibi değişik iç ve dış etkenler yorulma dayanımını değiştirmektedir [60,62]. Bu nedenle, yorulma deneylerinde aşağıdaki bilgilerin belirtilmesi gerekir [64];

I. Deneye tabi tutulan malzeme ve metalürjik özellikleri. Malzeme üretim standartları ve varsa uygulanan ısı işlemler

II. Deney numunesinin şekil ve boyutları ile yüzey durumu ve yük uygulama noktası

III. Deney cihazının tipi, çalışma prensibi ve uygulanan gerilme ile frekans,

IV. Deneyin yapıldığı ortamın koşulları ve sıcaklığı,

V. Bazı hallerde malzemenin diğer mekanik özellikleri ile metalografik yapısı.

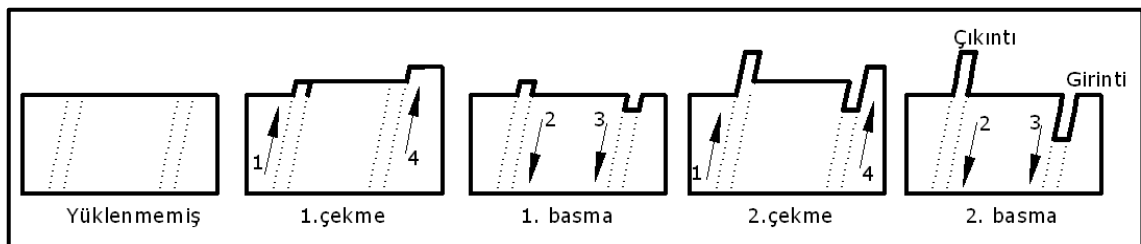
Bir malzeme çekme deneyine tabi tutulursa, akma noktasını geçtikten sonra malzeme kesitinde belirgin bir daralma ve boyunda uzama görülecektir. Fakat aynı malzeme yorulma testine tabi tutulduğunda, bazı durumlarda belirgin bir plastik deformasyon meydana gelmeden de, malzeme içinde çatlak oluşumu meydana gelecek ve bu çatlaklar test devam ettikçe ilerleyip malzemenin kırılmasına neden olacaktır. Plastik şekil değişimlerin de önemli rolü olan yorulma olayının; çatlakların oluşması, çatlakların ilerlemesi ve malzemenin kopması şeklinde üç kademedan meydana geldiği düşünülmektedir. Sürekli değişen yük altında oluşan çatlak, çatlakların yayılması ile devam eder ve kalan kesit alanı yükü taşıyamayacak bir değere ulaştığında hasar meydana gelir [60].

3.3.1. Yorulma Çatlakları Oluşumu ve İlerlemesi ile Meydana Gelen Yorulma Kırılması

3.3.1.1. Çatlak Oluşumu

Küçük gerilme genliklerinde bile dislokasyon hareketleri sonucu mikro bölgelerde plastik şekil değişimleri meydana gelir. Bu dislokasyon hareketleri belirli bir enerji girişi (histerezis) ile bağlantılı olduğundan, söz konusu enerji yardımıyla bazı içyapısal değişimler, özellikle çökeltilerin çözünmesi veya yeniden oluşması aktive edilebilir [61].

Yüzeyden dışarı çıkan dislokasyonlar ve bununla ilgili olan basamak oluşumu, yorulma zorlamaları için karakteristik kayma bantlarını ortaya çıkarır. Bu kayma bantları atom mertebesindeki bir hatanın civarında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler nedeni ile de meydana gelebilir. Zorlanmanın yön değiştirmesi ile farklı kayma düzlemlerindeki dislokasyon hareketleri aktive olduğundan, kayma bantları, girinti ve çıkıntılar içerir (Şekil 3.24). Girintiler çatlak başlangıç noktaları olarak etki ederler ve bu nedenle yorulma çatlakları çoğunlukla yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar [60,61].



Şekil 3.24. Girinti ve çıkıntılarının oluşumu (1-4 aktif kayma düzlemleri) [61].

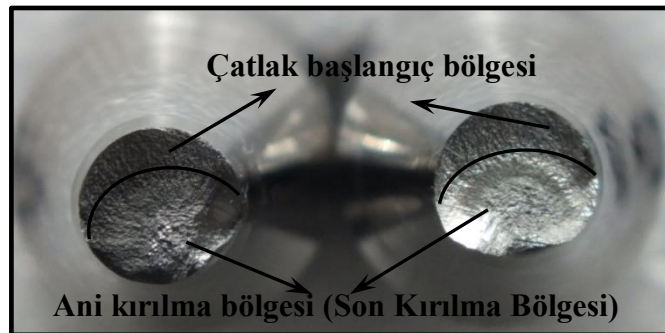
Çatlağın başlaması dolayısıyla yorulma olayı için genellikle şu üç ana faktör gereklidir; [47,61]

1. Yeteri derecede yüksek bir çekme gerilmesi,
2. Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi ve dalgalanması,
3. Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı.

Bu ana faktörlerin yanında çok sayıda yan faktörler de sayılabilir. Örneğin; yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, gerilim konsantrasyonu frekans, mikro yapı (tane boyutu, faz dağılımı, inklüzyonlar vb.) gibi başka sebeplerde çatlak başlangıcına neden olabilir. Gerilme yığılması ne kadar fazla ise, yorulma çatlağının başlama zamanı da o kadar kısa sürede olur [48,61]. Alüminyum alaşımlarındaki bazı istisnalar dışında yorulma çatlağı hemen hemen her zaman en büyük normal gerilmeye dik yönde oluşur [47,61].

3.3.1.2. Yorulma Çatlağının İlerlemesi

Yorulma çatlağının ilerlemesi sırasında oluşan bölge, makroskopik olarak düz ve pürüzsüzdür. Çatlak zamanla yavaş ilerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucu yorulma kırılması yüzeyi parlak görünür. Zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi gibi durumlarda, çatlak ilerleme hızlarının değişimine bağlı olarak oluşan (çatlak uçlarındaki oksidasyonun farklı şiddette olmasından ileri gelen) ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer, “duraklama çizgileri” bulunabilir. Çatlak ilerlemesi sırasında kırılma yüzeyinde oluşan mikroskobik incelikte ki çevrim çizgileri ile duraklama çizgileri karıştırılmamalıdır [61,65]. Şekil 3.25’ te yorulma sonunda hasara uğramış bir kırık yüzey fotoğrafı ve yorulma kırılması özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Yorulma çatlak başlangıcı ve yorulma kırık yüzey görünümü

Çatlağın oluşumu ve çatlağın ilerlemesi aşamaları arasındaki sınırı belirlemek yani hangi boyuttaki bir ayrılmanın çatlak olarak kabul edileceğini tanımlamak zordur. Gözlemler, yorulma çatlağı ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Yorulma ömrü içinde çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin payları farklı olabilmektedir. Tok malzemelerde çatlak oluşumu ömrün yaklaşık % 10' unu, çatlak ilerlemesi ise % 90' ını kapsar. Gevrek malzemede ise bu oranlar tam tersi olabilir [48,61].

Her gerilme seviyesinde bir 'kritik çatlak uzunluğu' vardır. Malzemede mevcut çatlakların herhangi biri bu büyüklükte ise kırılma oluşacaktır. Makine elemanlarının birçoğunda bu çatlaklar sonradan meydana gelir. Bu nedenle mevcut çatlakların işletme şartlarında kritik çatlak büyüklüğüne kadar büyümesinin söz konusu olup olmadığının bilinmesi gereklidir. Dolayısıyla kırılma tokluğu yanında, malzemelerin kırılma hasarlarına karşı dayanılıklarını belirleyen önemli bir diğer faktör de, kritikaltı bölgede çatlak ilerleme özellikleri olmaktadır. Bu özellik çatlak ilerlemesi ile malzemenin yük taşıma kapasitesindeki düşme hızını, dolayısıyla makine elemanının ömrünü belirlemektedir. Ayrıca çatlağın kritik büyüklüğe ulaşmasının hangi sürede olacağını bilmesi hangi aralıklarla çatlak kontrollerinin yapılmasının uygun olacağını ortaya çıkaracaktır [66].

3.3.1.3. Yorulma Kırılması

Çatlak her bir yükleme periyodunda belirli bir miktar ilerler. Çatlağın büyümesi dolayısıyla kesitte meydana gelen alan küçülmesi veya çatlağın doğurduğu gerilme yoğunlaşması ya da "çentik etkisi", plastik şekil değiştirme ile sünek kırılmaya veya klivaj yoluyla kırılmaya götürebilir. Kırılma, çatlakta olduğu gibi ilerleyen bir karakter arz eder ve bu açıdan diğer tür kırılmalardan, özellikle pratik olarak ani sayılan gevrek, klivaj kırılmasından farklıdır [63]. Yorulma kırılmasındaki kırık yüzey, pürüzsüz olan yorulma çatlağı ile pürüzlü ve yarıklı son kırılma bölümlerinden oluşur [61].

Hasar yüzeyleri incelenerek yorulma çatlağı yüzeyinin son kırılma yüzeyine göre konumu ve her iki yüzeyinin büyüklüğü yardımıyla kırılmaya neden olan zorlamanın türü, zorlamanın yaklaşık seviyesi, malzemenin çentik duyarlılığı gibi sonuçlar elde edilebilir. Sonuç olarak yorulma kırılmaları plastik şekil değiştirme, çekme gerilmesi ve çevrimli gerilmenin aynı andaki etkisi ile meydana gelmektedir. Çevrimli gerilme ve şekil değiştirme çatlaklarının başlamasında, çekme gerilmeleri ise oluşan bu çatlakların ilerlemesinde etkili olmaktadır. Bu doğrultuda yorulma mekanizmasına tesir eden temel

faktörlerden biri plastik deformasyondur. Plastik deformasyona karşı malzemenin direncinin artırılması beraberinde yorulma mukavemetinde artmasını sağlar [61]. Ayrıca düşük çevrim sayılarında yorulma ömrü plastik deformasyon bileşeni baskın iken yüksek çevrimli yorulma ömründe elastik deformasyon bileşeni baskındır [29].

3.3.1.4. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma;

Basınçlı kaplar, deniz, taşıma araçları, nükleer ve uzay araçları da dâhil olmak üzere imalatla kullanılan yapısal bileşenlerin birçoğu kaynaklı birleştirmelerle yapılmaktadır. Geniş uygulama alanlarında, farklı yükleme koşulları altında tekrarlı yüklere maruz kalan kaynaklı bağlantılar hasara duyarlıdır. Çünkü kaynak işlemi çeliğin mikro yapısını etkiler, ve birçok durumda çeliğin mekanik özelliklerinin azalmasına neden olur [26,36].

Tekrarlı yükler altında çalışmak zorunda kalan kaynaklı bağlantıların hasar analizleri yapıldığında yorulma hasarlarının tek başına en bozucu hataları içerdiği görülmektedir. Yorulma dayanımını etkileyen birçok faktörün, kaynaklı bağlantılar üzerinde olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla kaynaklı bağlantılarda çatlak oluşumu ve çatlağın büyüme süreci düşük yük seviyelerinde ilerleyebilir. Özellikle makine sanayiinde kullanılan parçaların sürekli tekrarlanan yüklere maruz kalıyor olması kaynaklı bağlantıların yorulma karakteristiklerinin göz önüne alınmasını ve standartlara uyulmasını zorunlu kılar [26,36].

Kaynaklı bağlantılarda oluşan yorulma hasarları çoğunlukla kaynak bölgesine çok yakın kısımlarda oluşmaktadır. Yüksek gerilmelerin meydana geldiği kaynak başlangıç ve bitiş noktaları, çatlağın başladığı ve ilerlediği bölgelerdir. Kaynaklı bağlantılardaki yorulma ömrü yerel gerilmelerin bileşenlerine bağlı olarak değişmektedir [26].

Bununla birlikte yorulma dayanımları malzemelerin mikroyapıları, sertlikleri ve statik çekme dayanımları ile ilişkilidir. Genellikle sertlik ve çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma sınırı da yükselir. Dolayısıyla kaynaklı bağlantılarda da yorulma dayanım sınırı mikroyapı, sertlik ve çekme özellikleri ile ilişkili olarak değişmektedir [30]. Kaynaklı bağlantılardaki ısı girdisi kaynak metalinin sertliğini de değiştirmektedir. Sertlik değeri yüksek olan malzemelerde yorulma dayanımı yüksek, sertlik değeri düşük malzemelerde ise yorulma dayanımı düşük çıkmaktadır [61].

Bir kaynaklı bağlantının yorulma ömrünü etkileyen temel değişkenler şunlardır: Uygulanan stress genliği, malzeme özellikleri ve geometrik gerilme konsantrasyon

faktörüdür. Diğer değişkenler ise kaynak başlangıç ve bitiş noktalarındaki gerilme/gerinme konsantrasyonudur [26].

Kaynak hataları gerilme konsantrasyonu oluşturmakta ve bunlar çatlak büyümesinin başlangıç noktaları olabilmektedir. Özellikle kaynaklı bağlantılardaki boşluk ve gözenekler çatlak ilerlemesi ile yorulma dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Kaynaklı bağlantılarda meydana gelecek intermetalik fazlarda kaynaklı bağlantının yorulma ömrünü azaltmaktadır. Yüksek çevrim yorulma ömrünün, tanecik boyutu, ikincil fazın hacim oranı ve çözünen atomlar veya çökeltilerin miktarı olarak mikroyapı değişkenlerinden büyük ölçüde etkilendiği bilinmektedir [29]. Kaynaklı bağlantılardaki yorulma hasarları; malzeme mikroyapısı ile yük altında malzeme deformasyonuna bağlı olarak meydana gelen elastik-plastik şekil değiştirme ve bağlantı hasar modları ile değerlendirilmelidir [26,30].

Genellikle kaynaklı bağlantıların yorulma hasar yaklaşımları “küresel yaklaşımlar” ve “yerel yaklaşımlar” olarak katagorize edilmektedir. Kritik kesit üzerinde normal gerilmeler veya dış kuvvetler varsa mukavemet değerlendirmeleri küresel yaklaşım olarak adlandırılırken, enerji temelli yaklaşımlar yerel yaklaşımlar olarak adlandırılmaktadır [26].

Benzer yüklere maruz kaynaklı birleştirmeler yorulma gerilmeleri karşılaştırıldığında, yorulma ömürlerini ifade etmek amacıyla S-N eğrileri üzerinde 10^5 - 10^7 çevrim sayıları kullanılmaktadır [30].

Farklı malzeme türleri ile yapılan kaynaklı bağlantılarda yorulma çentik faktörü ne kadar yüksek ise yorulma ömründe o derece düşük çıkmaktadır. Bu nedenle farklı malzeme çiftlerinin kullanıldığı çentikli kaynaklı numunelerin yorulma dayanımları ana malzemelerin çentik duyarlılığından daha fazla olacak ve yorulma dayanımları düşecektir [30]. Ancak daha önce yapılan çalışmalarda sürtünme kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımının kullanılan kaynak parametrelerine bağlı olarak ana malzeme yorulma dayanımından daha yüksek değerlerin elde edilebileceği bildirilmiştir.

3.3.1.5. Kaynaklı Bağlantılarda Yorulma Çatlaklarının İlerlemesi

Kaynaklı bağlantılarda çatlak ilerlemesi uygulanan yüke ve çatlak konumuna göre değişir. Bir çatlak ilerlemesine dik yönde etki eden çekme kuvvetleri çatlak açmaya çalışır ve bu nedenle çatlak çok kolay şekilde ilerletecek yükleme durumudur. Bununla birlikte kaynaklı bağlantıların iç kısmındaki bir çatlak yorulma ömrü açısından parça

yüzeyindeki çatlak veya yüzeydeki kaynak hatalarına oranla daha düşük öneme sahiptir. Çünkü yorulma çatlakları genellikle en büyük gerilmenin meydana geldiği yüzeyde başlar.

Sürtünme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde yorulma ömrünün % 20-30' unun çatlak büyümesi için harcandığını bilinmektedir. İlk küçük çatlakların numune eksenine dik doğrultuda oluştuğu ve ilerleyerek büyüdüğü tespit edilmiştir [12]. Kaynaklı birleştirmelerde boyutlarının artmasına paralel olarak mevcut kaynak hataları; mikroçatlaklar ve bunların büyümesi artmaktadır. Bu ise yorulma dayanımını azaltıcı yönde etki etmektedir [27].

3.3.2. Yorulma Deney Türleri ve Yorulma Deney Cihazları

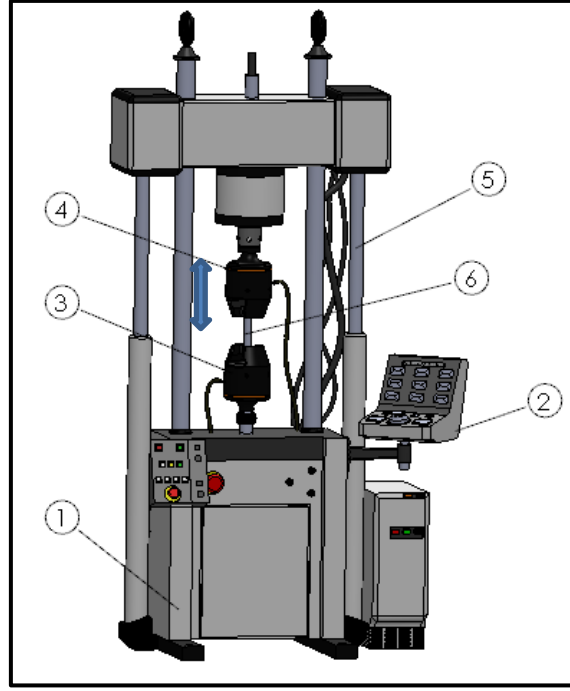
Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Genellikle eksenel (çekme-basma ve eğilme), burulma ve bileşik zorlamaları meydana getiren deney makinelerinde, bu gerilmeler deney numunelerine uygulanır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar bir kriter olarak kabul edilmekte ve teknik yorumlar yapılmaktadır [47,60].

Deneylerde kullanılan makinelerin deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500...15000 d/d (8...250 Hz.) arasındadır [65]. Deneylerde kullanılan gerilmeye göre başlıca yorulma deney türleri ve yorulma deney makinaları şunlardır [60];

1. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi,
2. Eğme gerilmeli yorulma deneyi,
3. Burulma gerilmeli yorulma deneyi,
4. Bileşik gerilmeli yorulma deneyi.

3.3.2.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi:

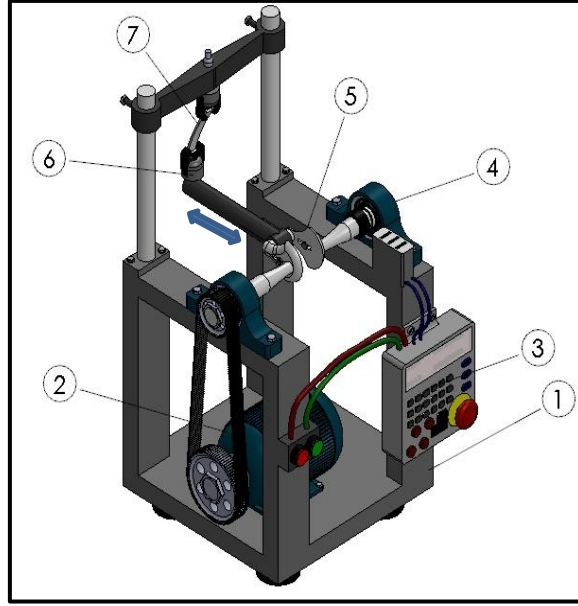
Eksenel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune enince de üniform olarak dağılır. Şekil 3.26' da eksenel gerilme uygulayan cihaza ait resim görülmektedir [47].



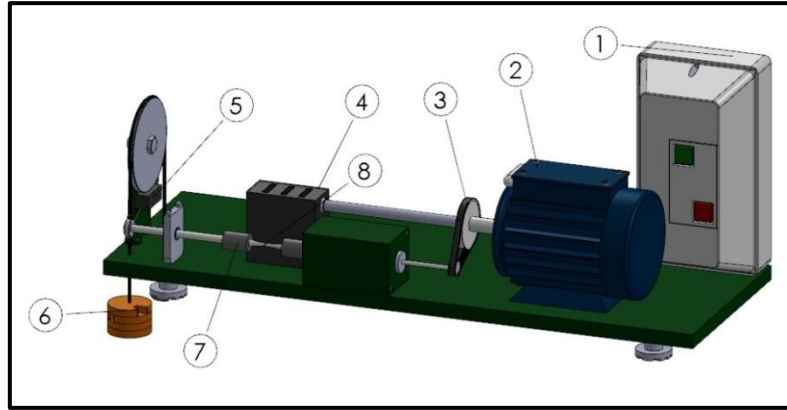
Şekil 3.26. Eksenel çekme-basma gerilmeleri uygulayan yorulma cihazı
1. Gövde 2. Kontrol ünitesi 3. Sabit çene 4. Eksenel hareketli çene
5. Eksenel kızaklar 6. Deney çubuğu

3.3.2.2. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu deneyde kendi arasında düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi ve dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi olarak ikiye ayrılır. Birinci deney türünde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır [47]. Şekil 3.27’ de tekrarlanan eğme gerilmeli deney düzeneğine ait şematik bir resim verilmiştir. İkinci deney türünde ise kullanılan dönen eğme gerilmeli yorulma deney makinaları, eğilmeye maruz kalan ve aynı zamanda dönen bir elemanın kesitinde, yükleme sabit olsa dahi, tam değişken gerilemelerin meydana geldiği ($\sigma=0$) zorlama tarzı elde edilir. Dönen eğme gerilmeli deney düzeneği Şekil 3.28’ de gösterilmiştir [60].



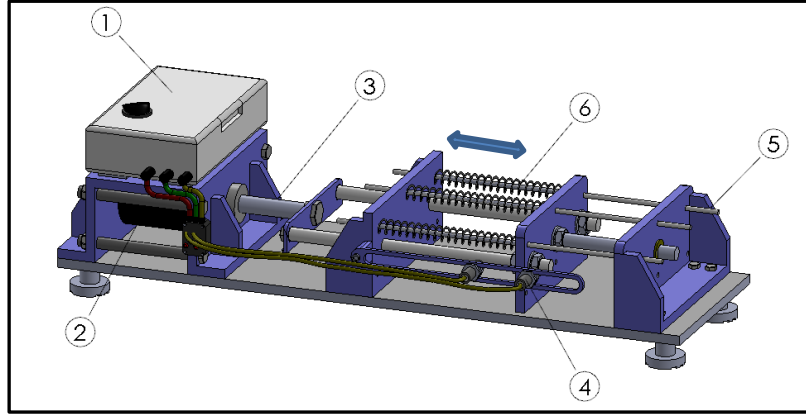
Şekil 3.27. Düzlemsel eğilme gerilmeli deney cihazı
 1. Gövde 2. Motor 3. Kontrol ünitesi 4. Yataklar
 5. Ayarlanabilir krank 6. Tutma çeneleri 7. Deney çubuğu



Şekil 3.28. Döner eğme gerilmeli yorulma deney cihazı
 1. Kumanda paneli 2. Motor 3. Dişli 4. Sayaç
 5. Motor ve sayacı durdurma ünitesi 6. Ağırlıklar 7. Tutma çeneleri 8. Parça

3.3.2.3. Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma işlemi uygulanmaktadır. Şekil 3.29' da yaylar için tasarlanmış bir yorulma deney cihazı görülmektedir [47].

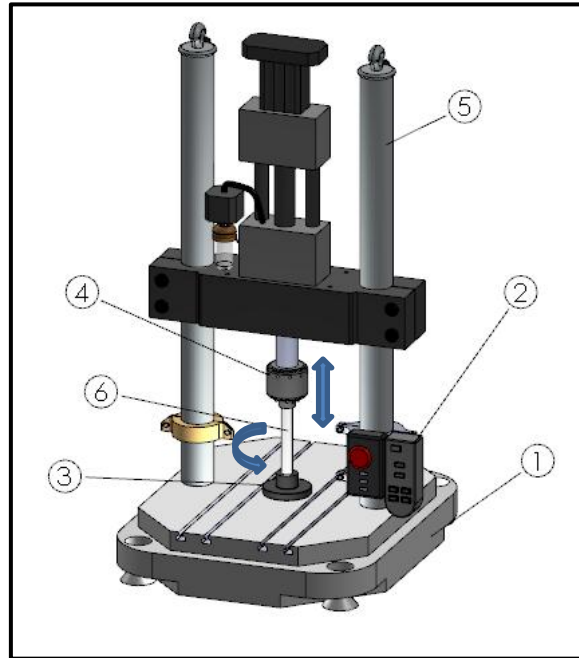


Şekil 3.29. Burma gerilmeli yorulma deney cihazı

- | | | |
|-----------------------|----------------------|----------------------------|
| 1. Kumanda paneli | 2. Pnömatik silindir | 3. Kuvvet dağıtım elemanı |
| 4. Manyetik sensörler | 5. Yay klavuz pimi | 6. Deney numunesi (yaylar) |

3.3.2.4. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

Yukarıda sayılan farklı gerilme türlerinden ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda, bileşik gerilmeler söz konusu olur [47]. Şekil 3.30’ da bileşik gerilmeli yorulma deney cihazına ait şematik bir resim gösterilmektedir.

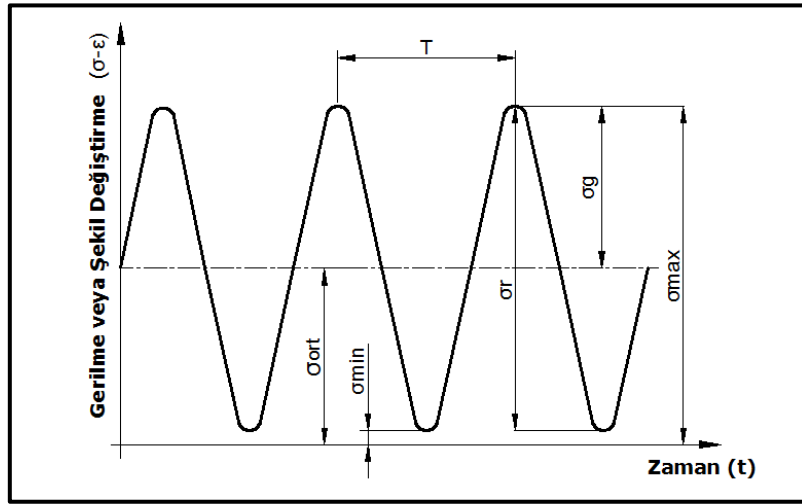


Şekil 3.30. Bileşik gerilmeli (Basma-Burma) yorulma deney cihazı

- | | | | |
|-------------|-------------------|---------------|-----------------------|
| 1. Gövde | 2. Kumanda paneli | 3. Sabit çene | 4. Basma-Burma çenesi |
| 5. Kızaklar | 6. Deney numunesi | | |

3.3.3. Yorulma Deneyi ile İlgili Terimler

Yorulma testi, genellikle sinüzoidal yükleme ile yapılır. Burada yorulma yükünün durumu, Şekil 3.31’ de gösterilen parametreler ile tarif edilir. Maksimum ve minimum gerilmenin belirlenmesiyle, gerilme dağılımı (σ_r), gerilme genliği (σ_g), ortalama gerilme (σ_m) ve gerilme oranı (R) ile gerilme parametrelerine karar verilir [67].



Şekil 3.31. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme (Gerilme-Zaman eğrisi) [68].

T	: 1 çevrim (Periyodu)
σ _{min} (σ _a)	: Gerilmenin en küçük değeri (Alt gerilme)
σ _{max} (σ _ü)	: Gerilmenin en büyük değeri (Üst gerilme)
σ _{ort} (σ _m)	: Ortalama gerilme
σ _g	: Gerilme genliği
ε	: Birim şekil değiştirme

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.12)$$

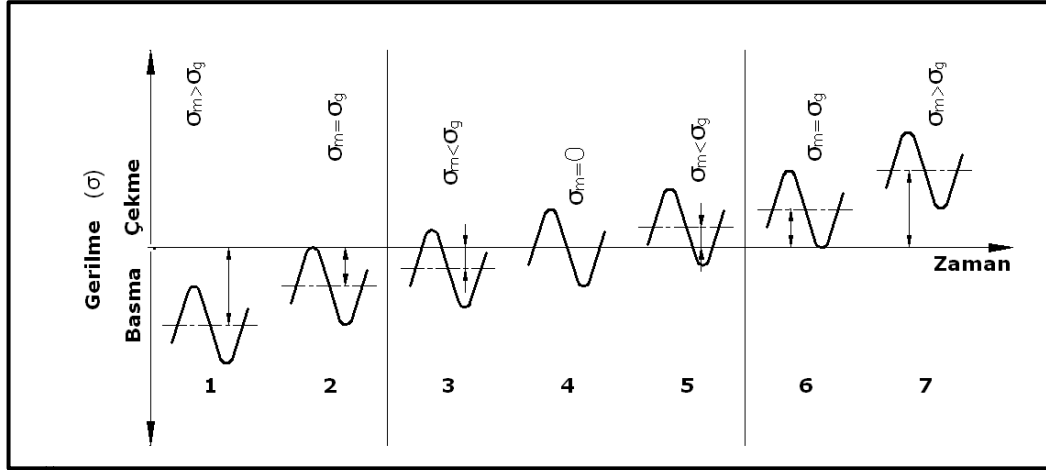
$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.13)$$

$$\sigma_g = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.14)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.15)$$

Herhangi bir yük genliğindeki, verilen bir çevrim ömrü için yorulma mukavemeti, ortalama gerilmeye bağlıdır. Aynı seviyedeki yorulma ömrü için, ortalama gerilme (σ_m) arttıkça, gerilme genliği (σ_g) (yorulma mukavemeti) azaltılmalıdır.

R ile gösterilen gerilme oranı, en küçük gerilmenin en büyük gerilmeye oranıdır. R değeri, çevrimsel gerilmenin tipini gösteren değerdir. Yorulma deneyinde, değişen basma ve çekme gerilmeleri halinde gerilmeler simetrik olabileceği gibi asimetrik de olabilir. Farklı gerilme halleri (R değerlerini) için yükleme tipleri Şekil 3.32’ de görülmektedir [57].



Şekil 3.32. Yorulma deneyinde farklı gerilme değişimlerini gösteren örnekler [68].
 1-2: Basma gerilmesi 3 ve 5: Asimetrik çekme-basma gerilmesi değişimi,
 4: Eşit çekme-basma gerilmesi 6-7: Çekme gerilmesi

Mümkün olabilecek bütün yük değerlerindeki yorulma ömrünü hesaplamaktan kaçınmak için, genellikle ampirik (deneysel) bir metot olan ve “goodman” olarak isimlendirilen eğri kullanılır. Goodman çizgisi olarak isimlendirilen bu değer, yorulma mukavemetinde verilen (verilen bir yorulma ömrü için gerilme genliği) ortalama gerilme oranı ile lineer bir azalma gösterir. Goodman diyagramı, aşağıdaki formülde belirtildiği gibi, gerilme genliği (verilen bir ömür için/yorulma mukavemeti), ortalama gerilmenin sıfır olduğu yorulma mukavemetiyle (σ_g^0 =tam ters yükleme), ortalama gerilmeyle (σ_m) ve çekme mukavemetiyle (σ_{TU}) ilişkilidir. Goodman ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [60].

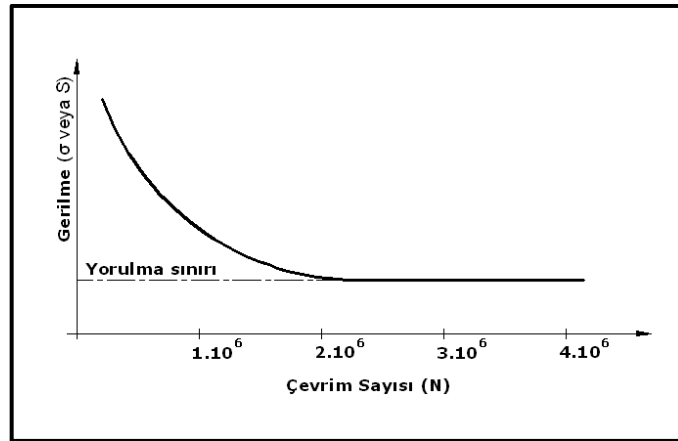
$$\frac{\sigma_g}{\sigma_g^0} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{TU}} \quad (3.16)$$

Çelik gibi metaller için yorulma ömrünü sonsuz hale getiren bir gerilme vardır (malzeme bu gerilme altında yorulma ile hasara uğramaz) bu gibi durumlarda yorulma sınırı denilen bir değere başvurulur.

3.3.3.1. S – N Diyagramı (Wöhler Diyagramı);

S-N diyagramı, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösterilmesinde kullanılan en genel metottur. Ortalama gerilme (σ_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına veya kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (σ_g) deney süresince sabit tutulur [47].

Tipik bir S-N eğrisi Şekil 3.33’ te gösterilmiştir. Eğrinin yatay asimptota karşılık gelen gerilme düzeyi yorulma sınırı olarak bilinir. Yorulma sınırının üstündeki gerilmeler, yeterli çevrim sayısına ulaştığında hasara yol açar [63]. Yorulma sınırının üzerinde istatistiksel olarak saptanan N çevrim sonunda numunenin çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değerine ise yorulma dayanımı (σ_N) denir [47].



Şekil 3.33. Tipik bir S-N (Wöhler eğrisi) [68].

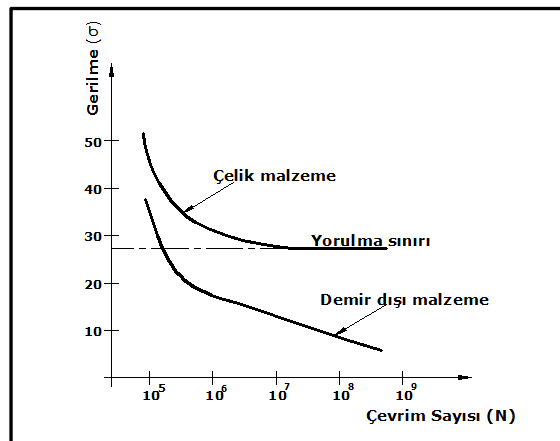
Gerilme eksenini olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya en büyük gerilme (σ_{max}), ya en küçük gerilme (σ_{min}) ya da gerilme genliğinden (σ_g) biri kaydedilir. Çevrim sayısı eksenini olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır. S - N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir [47].

3.3.3.2. Yorulma Sınırı

İstatistiksel metodlarla tayin edilen gerilme koşulları altında bir malzemenin sonsuz sayıdaki gerilme periyodlarına dayanabileceği en büyük gerilme değeri yorulma sınırı (σ_D) olarak kabul edilir [68]. S-N diyagramında eğrinin asimptotik durum aldığı gerilme “yorulma sınırı” nı göstermektedir. Bu gerilmenin altındaki gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir. Yorulma sınırının üstündeki gerilmeler, uygun bir döngü sayısına ulaştığında, hasara yol açar. Yorulma sınırının altındaki alan, deney parçalarının kırılmadan kaldıkları koşulları gösterir. Bununla birlikte yorulma sınırının malzemenin genel bir niteliği olmadığı bilinmelidir çünkü bazı malzemeler ve uygulama ortamları yorulma dayanımı sınırına ulaşmayı olumsuzlaştırır [60,63,69].

$$\sigma_D = \sigma_m \mp \sigma_a \quad (3.17)$$

Çelikler için bu durum yaklaşık 10^6 ile 10^8 değerleri arasında değişir. Pratik bakımdan bir görüş birliği sağlamak amacı ile N_D değerinin 10^7 olarak alınması tavsiye edilmektedir. Bununla birlikte demir içermeyen alaşımlar, yorulma sınırı göstermeyebilirler. Aynı durum yüksek sıcaklık veya korozyif ortamın birlikte bulunması halinde, çeliklerde de görülebilir (Şekil 3.34) [63]. Bu nedenle, uygun devir sayıları yorulma limiti olarak kabul edilir ve pratikte $N < N_0$ olması halinde elemanın ömrü sonlu, $N \geq N_0$ olması halinde ise, elemanın ömrü sonsuz olarak ifade edilir [60,67]. Belli bir malzemeye, deney yöntemine ve başka elementlere bağlı olarak, farklı yorulma alanları oluşabilir [63].



Şekil 3.34. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S-N eğrisi [47]

Değişken zorlanmanın etkisi ancak $N \geq 10^3$ yük değişme sayısından sonra başlar. Bu sebeple $N=0$ ile $N=10^3$ değerleri arasındaki zorlama statik zorlama olarak kabul edilir [60].

Pratik amaçlar için σ_N yorulma mukavemetinde σ , belli bir N yükleme döngü sayısı için ele alınmış gerilme kademesidir. Örneğin kaynaklı çelik parçalarda farklı birleşme şekillerinin yorulma mukavemetlerinin kıyaslanmaları çoğu kez $N=2 \times 10^6$ döngü sayısı için saptanmış σ_N değerleri olarak yapılırlar [63].

3.3.4. Yorulma Deneyinin Yapılışı

Yorulma testi, malzemelerin tekrarlı veya dalgalı yüklemeye maruz kaldıklarında, nasıl davranacaklarını belirlemek amacıyla yapılan dinamik bir testtir. Bu test, istenen gerilmelerin malzemeye devirsel yükleme yoluyla aktarılması prensibine dayanmaktadır.

Sabit bir ortalama gerilmenin üzerine (σ_m =sabit) başka deneme çubukları ile ve her defasında değişik gerilme genliği ile elemanın kopuncaya kadar olan N sayıda yük değişimi tespit edilir. σ_g genlik değeri düşey eksen, N değeri ise yatay eksen olmak üzere bir eksen takımında deney sonuçlarını grafik olarak temsil etmekle, malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren Wöhler diyagramları elde edilir. Belirli bir gerilme oranı için yapılmış ve farklı gerilme değerlerindeki kırılmayı gösteren birçok teste dayanır. Kullanılacak deney parçalarının sayısı istenilen bilgiye göre değişebilir. Bu amaçla benzer şekillerde hazırlanmış en az 6 ile 12 numune alınır. Numunelere farklı gerilmeler uygulanarak çatlamanın veya kırılmanın görüldüğü (N) çevrim sayısı tespit edilir. Burada numunenin tamamen kopması veya önceden belirtilen belirli boyuttaki çatlak kriter olarak alınır [37,60].

Uygulanan gerilmenin büyüklüğü, test edilen numuneye bağlı olarak değişir. Test devam ederken malzeme üzerine gelen gerilme, malzemenin akma gerilmesinin altında iki değer arasında değişir ve bu gerilmeler malzeme kırılana ya da istenen devre ulaşılan kadar uygulanmaya devam eder. Bu iki değer arasındaki R ile ifade edilen gerilme oranı ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R=1$ olması durumunda, statik bir yüklemeye, $R= -1$ olması durumunda, tam değişken bir yüklemeye, $R=0$ olması durumunda dalgalı değişken bir yüklemeye, $-1 < R < 1$ olması durumunda ise malzeme genel değişken bir yüklemeye maruz kalır [67].

$S - N$ eğrisini elde etmek için genellikle aşağıdaki deney sırası tavsiye edilir; [47,48].

1. Önce bir veya iki numuneye küçük çevrim sayısında çatlama (veya kopma) gösterecek şekilde nispeten yüksek gerilmeler uygulanır.

2. Daha sonra bir numuneye çok büyük çevrim sayısında çatlayacak (veya kopacak), bir diğerine “yorulma dayanımı sınırı” içine girecek şekilde gerilme uygulanır.

3. Sonunda arada kalan gerilmeler için deney yapılır.

Bir malzemenin yorulma sınırı için çekme dayanımı ve Brinell sertlik değerlerinden faydalanılarak yaklaşık değerler seçilebilir [47].

- Demir – Çelik grubu malzemelerde;

Yorulma Sınırı $\sim \pm 1/2$ Çekme Dayanımı

$\sim \pm 0,18$ Brinell Sertlik Değeri

- Demir Dışı metal ve alaşımlarda;

Yorulma Sınırı $\sim \pm 1/3$ Çekme Dayanımı

Çelik gibi malzemelerde sınır gerilmeler akma değerine ulaştınca, çatlakların doğması yorulmadan çok plastik şekil değiştirmelerden olur. Bu gibi durumlarda sürekli dayanım sınırları akma gerilmesiyle sınırlandırılır, diğer bir deyişle akma gerilmesinden daha büyük değerler sınır olarak alınmaz. Nispeten yüksek gerilmelerin uygulandığı ilk deneylerde çekme dayanımının yaklaşık $2/3$ ’ ü değerinde bir gerilme seçilir [47].

Numune cihaza yerleştirilirken büyük özen gösterilmeli ve deney sırasında oluşabilecek titreşimler deney parçasının eksenliği ve deney makinesinin tahrik mili dar sınırlar içinde tutularak önlenmelidir. Parçaya herhangi bir yük uygulanmadan önce eşmerkezlilik toleransı $\pm 0,013$ mm aralığı dışında olmamalıdır. Çalışma esnasında simetri ekseninin sapma yapmamasına dikkat edilmelidir. Gerilme, deneyde öngörülen değerde, hassas olarak uygulanmalı, darbe ve başka türde gerilmelerin oluşması önlenmelidir. Gerilme deney süresince sabit tutulmalıdır [47,64].

Deneylerin 1000-9000 dev/dk hız aralığında yapılması tavsiye edilir. Deney makinalarında yük uygulanmadan önce istenilen hıza ulaşılmalıdır. Yük istenilen değere darbesiz olarak, mümkün olduğunca hızlı bir şekilde azar azar arttırılarak veya sürekli olarak uygulanmalıdır [64].

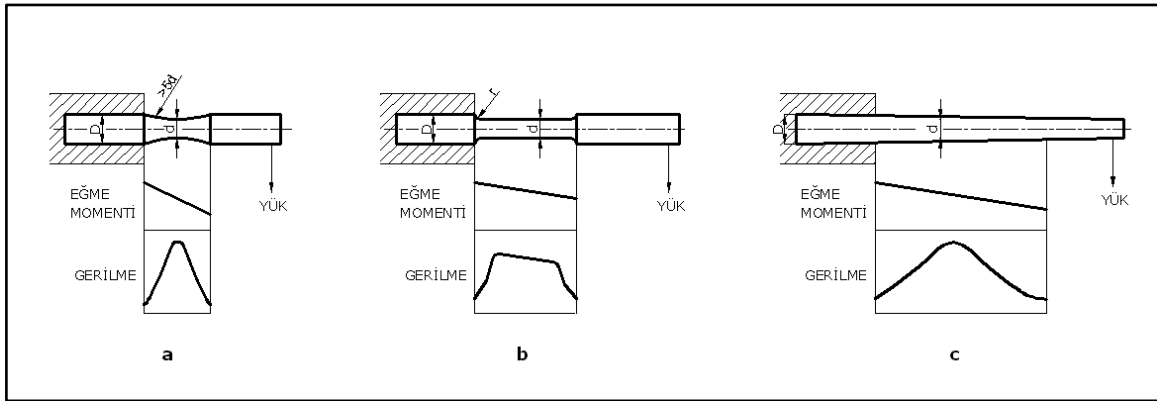
3.3.5. Yorulma Deney Numuneleri

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir.

3.3.5.1. Dairesel Kesitli Numuneler

TS ISO 1143' e göre metaller-dönen çubuk eğme yorulma deneyi için Şekil 3.35' te şematik olarak çeşitli durumlar için eğme momenti ve anma gerilme diyagramları ile birlikte gösterilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir. Bu numuneler;

- Toroit şekilli
- Bir veya her iki uçta teğetsel dolgulu silindirik,
- Konik olabilir.



Şekil 3.35. Dönen eğmeli yorulma deney numuneleri (Tek nokta yüklemeli) [64].

a. Toroit, b. Paralel, c. Konik deney parçaları

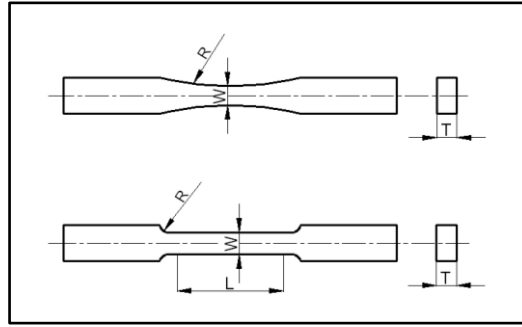
Şekil 3.35' te (a) ve (b) şekilleri ile gösterilen numuneler için daraltılmış kısmın çapı için 4 ile 12,5 mm arasında bir değer seçilmektedir. Numunenin cihaz çeneleri arasına giren kesitin, daraltılmış kesite oranı en az 1,5 olmalıdır. Çentik etkisini minimuma indirmek için daraltılmış kesitin her iki ucundaki kavisli bölgede (r) eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın (d) çapının en az 5 katı olmalıdır [47,64].

Toroit şekilli bir numune, eksenî boyunca geçen kesitleri simetrik R yarıçaplı iki daire yayı ile çevrelemekte ve bu suretle numunenin tam ortasında kesit en küçük değerini almaktadır. Bu numune şekli cisimde gerilme yığılmasının minimum olmasını sağlar böylece yorulma mukavemetinin maksimum değeri elde edilebilir [64].

3.3.5.2. Dikdörtgen Kesitli Numuneler

Bu numunelerde kesitin daraltılması tek boyutta ve genellikle aynı genişlikte yapılır (Şekil 3.36). Dairesel kesitli numunelerde olduğu gibi, cihazın çeneleri arasında kalan

kesitin daraltılmış kesite oranı en az 1,5 olmalıdır. Daraltılmış uzunluğun her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı, daraltılmış kısmın (W) genişliğinin en az 8 katı olmalıdır. Daraltılmış kısımda (W) genişliğinin (T) kalınlığına oranı 2 ile 6 arasında olmalı ve daraltılmış kısmın kesiti tercihen 20 ile 650 mm² arasında seçilmelidir. Daraltılmış kısmın (L) uzunluğu daraltılmış kısımdaki (W) genişliğinin en az 3 katı olmalı, basma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda ise 4 katını geçmemelidir. Diğer özellikler dairesel kesitli numunelerle benzer durumdadır [47].



Şekil 3.36. Eksenel gerilmeli yorulma deney numuneleri [47].

Yorulma deneyi numunelerinin hazırlanmasında herhangi bir kesme veya makine ile işleme, deney parçasının metalürjik yapısını veya özelliklerini değiştirmemelidir. Talaş kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Talaş kaldırma işleminden sonra numune hassas bir şekilde taşlanmalı daha sonra ince zımpara kâğıtları ile parlatılmalıdır. Parlatma işleminde son zımpara kâğıdının 600 kalite su geçirmez silisyumkarbür olması yeterli görülmüştür. Numune uzun zaman saklanacak ise, parlatılmış yüzey korozif olmayan bir yağla kaplanarak korunmalıdır. Numune hazırlama işleminden sonra yüzey kalitesinin 20x büyütmeli bir mercek altında kontrolü tavsiye edilir [47,64].

3.3.6. Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler

Yorulma olayına etki eden birçok faktör vardır. Bunların bazıları, kimyasal bileşim, yüzey durumu, ısıtma işlemi gibi malzemeye bağlıdır. Diğerleri ise uygulamaya bağlı yani, yüklerin tipi (değişken veya sabit genlikli yükleme) veya çevrenin etkisi (hidrojen nem oranı vb) olarak yorulma ömürlerini etkilemektedir. Bu faktörleri aşağıdaki gruplar altında incelemek mümkündür [29,47].

3.3.6.1. Yüzey Özelliklerinin Etkisi

Yüzey pürüzlülüklerin giderilmesi, malzemenin yorulma dayanımını artırmak için alınması gereken en önemli tedbirdir. Çünkü eğme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en yüksek gerilme yüzeyde oluşur. Bu durum yorulma olaylarında çatlak oluşumunun genellikle yüzeyde başlamasına neden olur. Dolayısıyla yüzey durumundaki her değişiklik, metalin yorulma ömrünü etkiler. Yüzeyde başlayan yorulma çatlakları daha sonra çentik etkisi göstereceğinden gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlakların hızla ilerlemesine yol açar [65,70]. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını arttırmak, büyük ölçüde yüzey çatlaklarının oluşumunu engellemekle diğer bir ifade ile yüzey özelliklerinin artırılması ile mümkündür. Öyleki aşınma veya korozyon sonucu yüzeyin bozulması yorulma dayanımını olumsuz yönde etkiler [27,61,70].

Özellikle sert malzemelerde yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımını büyük ölçüde arttırmaktadır. Yüzeyi parlatılmış bir numunenin yorulma dayanımı sınırı, kaba işlenmiş bir numuneye oranla % 15 – 40 daha yüksektir [47]. Yüzey düzgünlüğü yanında, çeliklerde yüzey sertliğinin, sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemleri ile artırılması da çatlamaya karşı direnci arttıracığından, yorulma dayanımının artmasını sağlar. Yüzeyde 1 mm' lik bir tabakada tavlama ve sıcak işleme esnasında karbon azalması, yüzeyde yumuşak tabaka oluşumuna neden olacağından yorulma dayanımını düşürür ve küçük gerilmelerde dahi çatlak oluşur. [47,65].

Murti ve Sundersan [46] isimli araştırmacılar, sertleşme kabiliyeti çok iyi olan 22 mm çaplı, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş HSS-C45 çelik çifti için çentik darbe ve yorulma dayanımı testleri yardımıyla parametre optimizasyonu yapmışlar. Deney çalışmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğü hassasiyetinin artırılmasıyla yorulma mukavemetinin arttığını bildirmişlerdir.

3.3.6.2. Malzeme Cinsinin, Bileşiminin ve Yapısının Etkisi

Genellikle malzemenin statik çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma dayanımı sınırı yükselir. Çeliklerde alaşım elementleri statik çekme dayanımını arttırarak, yorulma dayanımını da arttırmaları. Çekme dayanımını arttırmadan sadece yorulma dayanımını arttıran alaşım elementi yoktur. Alaşım elementlerinin (karbon hariç) çeliklerin yorulma dayanımını arttırması çeliklerin içyapısını değiştirmelerine bağlıdır. [28,70].

Özellikle uygun su verme ve menevişleme işlemleri ile statik çekme dayanımı ve sertliği artırılan çeliklerin yorulma dayanımı da artmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik parçalarda alaşım elementleri çeliklerin su alma derinliğini artırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını ve buna bağlı olarak yorulma dayanımlarının yükselmesini sağlayabilir [47].

Sünek malzemelere uygulanan son mekanik işlemlerin de yorulma dayanımına etkisi vardır. Soğuk işlem ile sertliği ve yüzey düzgünlüğü artırılan malzemenin yorulma dayanımı, sıcak işlem görmüş aynı malzemeye oranla daha yüksektir. Çünkü tane boyutu malzemenin yorulma davranışını büyük oranda etkiler. Tane boyutu, tavlama sıcaklığı ve soğuk şekil değiştirme oranı ile değişir. Tane irileşmesi gibi olaylar yorulma dayanımını olumsuz yönde etkiler ancak sürünme olgusunun ortaya çıkmasıyla birlikte, iri taneli yapıların yorulma dayanımlarının, küçük taneli yapıların yorulma dayanımlarından fazla olduğu gözlenir [67,70]. Bununla birlikte tane yönlenmesi ve yönlenmeye bağlı yükleme durumlarının yorulma dayanım değerlerini değiştirdiği bilinmektedir [10].

Malzeme yapısındaki inklüzyon ve segregasyonlar yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü azaltmaktadır. Inklüzyonların boyutları arttıkça yorulma hızını ve çatlak başlama ihtimalini artırmaktadır. [70].

3.3.6.3. Gerilmelerin Etkisi

Hiçbir bozukluk içermeyen, yüzeyi parlatılmış uniform kesitli bir malzemede, akma noktasının altındaki gerilme değerlerinde dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar zamanla yüzeyde çıkıntı ve çöküntülerin oluşmasına dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olur [67].

Ayrıca içyapıda bulunan çentik, çatlak gibi kusurların etrafındaki gerilme yığılmaları, ortalama gerilmeden daha büyük ve tehlikelidir. Bu nedenle malzeme içindeki bu hataların giderilmesi gerekmektedir. Aksi durumda tekrarlı zorlamalar etkisiyle oluşan plastik şekil değiştirme sonucu, malzeme pekleşir, gevrekliği artar ve ani yorulma yırtılması meydana gelir [67].

Yorulma deneylerinde gerilme türünün etkisi önemlidir. Genellikle eksenel gerilme ile düzlemsel eğme gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine çok yakındır. Burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda ise yorulma dayanım sınırı daha düşüktür [70].

Uygulamada parçaya gelen gerilmeler deneylerdeki gibi sabit genlikli ve sabit periyotlu değillerdir. Böyle bir durum göz önünde bulundurulursa, zaman zaman aşırı gerilmelerin uygulandığı görülür. Aşırı gerilmeler de yorulma ömrünü kısaltır. Ancak bu konuda karar verebilmek için istatistiksel analizlerden faydalanılır [47].

3.3.6.4. Çentik Etkisi

Parça kesitinde çentik, delik ve ani şekil değişimlerinin bulunması gerilme konsantrasyonunu artırıp çatlak oluşumun kolaylaştıracağından yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Aynı zamanda korozyona uğramış veya işlenmemiş yüzeylerde de oluşabilecek gerilme konsantrasyonlarının çentik etkisi gösterdiği kabul edilir Çentik etkisi çentiğin şekil ve boyutlarına bağlı olarak değişir. Tablo 3.6’ da çentik tür ve boyutlarının yorulma sınırına etkisi görülmektedir [70].

Tablo 3.6. Çentik tür ve boyutlarının yorulma dayanım sınırına etkisi [47].

Çentik Şekli ve Boyutu	Yorulma Sınırının Azalması (%)
25 mm yarıçaplı yiv	5
6 mm yarıçaplı yiv	10
Küçük kavisli çıkıntı	25
90° açılı çıkıntı	50
90° açılı V çentik	65

Yapılan çalışmalarda kaynaklı bağlantılardaki çentiklerin konumlarına bağlı olarak yorulma dayanımının değiştiği bildirilmiştir [12]. Kaynak hatalarının çentik etkisi oluşturarak yorulma dayanımının azalmasına neden oldukları bilinmektedir.

3.3.6.5. Çevrenin ve Korozyonun Etkisi

Değişken gerilmeler altında çevrenin kimyasal etkisi daha şiddetli olur, bununla birlikte yorulma olayından önce malzemenin korozyona uğraması, yorulma ömrünü azaltır. Burada, korozyonun neden olduğu yüzeydeki çok küçük oyuklar (pürüzler) çentik etkisi yaparak malzemenin yorulma dayanımının büyük oranda düşmesine neden olurlar. Yorulma çatlakları, korozif olmayan bir ortamdakine göre daha az sayıda tekrar sonucu oluşur. Yorulma çatlakları oluşuktan sonra, saldırgan ortam çatlak ilerleme hızını da

arttırır [27,65]. Korozyonun kimyasal etkisi ile yorulmanın mekanik etkisinin aynı anda oluşması yani “Korozyonlu Yorulma” da yorulma dayanımında çok büyük düşüşler görülür. Korozyonun buradaki etkili rolü çatlak teşekkülü ve çatlağın ilerlemesini hızlandırmasıdır [27,47,70].

Korozyon, yorulma deneyinde uygulanan frekansın etkisini de değiştirmektedir. Normal deneylerde 10000 dev/dk’ nın altındaki frekanslarda, deney sonuçları frekanstan etkilenmemektedir. Korozi ortamlarda, frekansın etkisini azaltmak için mümkün olduğu kadar yüksek hızlarda çalışılmalıdır. Küçük hızlarda, deney zamanı uzayacağından korozyon daha etkili olacak ve frekansın etkisini dolaylı olarak etkileyecektir [47].

3.3.6.6. Sıcaklığın Etkisi

Deney sıcaklığının değişmesi yorulma dayanım değerlerini değiştirmekle birlikte 200 °C’ ye kadar sıcaklığın bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir. Ancak daha fazla yükselirse sıcaklığın artmasına paralel olarak yorulma mukavemetide azalır [65,70]. Bununla birlikte oda sıcaklığının altında ise malzemenin çentik hassasiyeti artacağından yorulma dayanımı olumsuz olarak etkilenir [61,70].

Cr, Ni ve Mo çeliklerinde 400 °C’ ye kadar yorulma mukavemetlerinde bir değişiklik olmaz. Metastabil içyapıya sahip alaşımlar, yüksek sıcaklıkta ayrışma yolu ile içyapı değişimine uğrarlar. Bu ayrışma olayı yorulma mukavemetini etkiler [65]. Sadece düşük karbonlu çeliklerde 200 – 300 °C arasında yorulma dayanımında artış görülür. Bu olay düşük karbonlu çeliklerin deformasyon yaşanmasına uğrayarak çekme dayanımlarının artmasına bağlıdır [47].

Deney sıcaklığı belirli bir sıcaklığa yükseldiğinde yorulma olayı ile birlikte bulunan sürünme olayı daha etkili olur. Kopma, yorulmadan çok sürünme sonucunda gerçekleşir. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulmada kırılma tane içinde (transgranüler), sürünmede tane sınırında (intergranüler) olmaktadır [47,70].

Makine parçalarının kullanımı esnasında sıcaklık değişimlerine uğramaları, ısısal gerilmelere yol açarak yorulma olayını hızlandırabilir. Sıcaklığın ΔT kadar değişmesiyle malzemede oluşan gerilme; [47]

$$\sigma = E.E.\Delta T \text{ dir.} \quad (3.18)$$

Şeklinde ifade edilir. Bu denklemde ϵ lineer ısı genleşme katsayısını, E ise elastisite modülünü ifade etmektedir. Şayet bir defalık ani sıcaklık değişimi malzemenin çatlamasına yol açmışsa bu olaya “Isıl (Termal) Şok” adı verilir. Ama çatlama çok sayıda tekrarlanan ısısal gerilmeler sonucunda oluşmuşsa bu olaya “Isıl (Termal) Yorulma” adı verilir [47].

3.3.6.7. Frekansın (Deney Hızının) Etkisi

500 ile 10.000 dev/dk’lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir. Ancak çok yüksek frekanslarda plastik şekil değiştirme için daha az zaman kaldığından genellikle yorulma mukavemeti yaklaşık % 10 kadar artar. Ayrıca yüksek frekanslarda sönümlenme etkisi ile malzeme çok fazla ısınabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Düşük frekanslarda ise sürenin uzaması sebebiyle korozyon etkisi artabilmektedir dolayısıyla çok düşük deney hızlarında da yorulma dayanımı sınırının azaldığı kabul edilmektedir [65,67]. Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa, deney parçalarında toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney parçalarında malzeme bünyesindeki farklı mekanizmalara bağlı böyle bir toparlanma olayı görülmez [48].

3.3.6.8. Artık Gerilmeler

Akma noktası üzerinde yük yüklenmiş ve boşaltılmış, soğuk şekillendirilmiş, dövülmüş ve kaynatılmış parçalarda bazı gerilmeler kalmaktadır. Bu gerilmelere artık gerilme denir. Bu artık gerilmeler, malzemelerin tekrarlı yüke maruz kalması esnasında, malzeme içindeki yerel gerilmeleri artıracığından, malzemenin yorulma dayanımını olumsuz yönde etkiler [67]. Ancak numune yüzeyinde oluşturulan basma yönünde kalıcı iç gerilmeler yorulma dayanımı sınırı ve yorulma ömrünü arttırırken, çekme gerilmesi azaltmaktadır. Yüzeyde kalıcı basma gerilmelerini oluşturmada kullanılan ticari yöntemlerden biri yüzeylerin küçük pasolarla haddelenmesidir. Diğer bir yöntem ise yüzeyin aşırı hıza sahip çok küçük çelik bilyalar kullanılarak dövülmesidir [47]. Artık gerilmelerin kaynaklı parçalardaki yorulma çatlalarının büyümesinde etkili olduğu yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [7].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışmanın Amacı

Farklı bileşime sahip iki metalik malzemenin geleneksel ergitme yöntemleri ile birleştirilmesi güç ve problemlidir. Ayrıca, metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi durumunda, birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim ve işlem şartlarına bağlı olarak malzeme ve yerel geometrik etkilerin oluşturduğu süreksizliklerde meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte kaynaklı bağlantılarda oluşan hasarlar incelendiğinde, büyük çoğunluğunun yorulma zorlanmaları ile kaynak bölgesinden başlayarak meydana geldiği bilinmektedir. Bu nedenle kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının tespit edilip uygun parametrelerle imalat yapılması özel önem arzemektedir.

Bu amaçla; bu çalışmada düşük karbonlu ve düşük alaşımlı AISI 1020 çelik malzeme ile ferritik ve östenitik paslanmaz çeliklerin birçok avantajını biraraya getirerek yüksek korozyon dayanımı ve yüksek mukavemet özelliklerini birarada bulunduran ve piyasada yaygın olarak kullanılan AISI 2205 DPÇ çifti farklı işlem parametreleri kullanılarak katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme ve yorulma deneyleri ile birlikte mikroyapı incelemeleri tamamlanmış ve kaynaklı bağlantıların hasar süreçleri analiz edilmiştir. Deney sonuçları, literatür ışığında değerlendirilerek üretim parametrelerinin bu iki malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine olan etkileri belirlenmiştir.

4.2. Kaynak Öncesi İşlemler

4.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Malzemeler Ø12X6000 mm' lik çubuklar halinde ticari olarak, AISI 1020 çeliği Kalyon Çelik Dış Ticaret Ltd. Şti.' den, AISI 2205 DPÇ ise Anıl Paslanmaz Çelik Sanayi

ve Ticaret Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. Her iki çelik çiftine ait kimyasal kompozisyon Tablo 4.1' ve Tablo 4.2' de sırasıyla verilmiştir.

Tablo 4.1. AISI 1020 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu

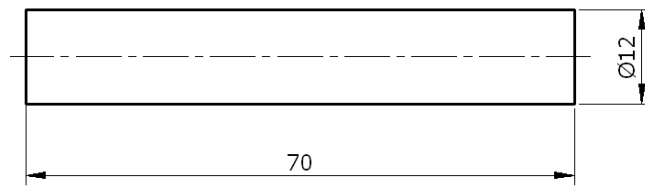
AISI 1020	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
	0,207	0,441	0,102	0,007	0,006	0,095	0,019	0,078	0,017	0,1

Tablo 4.2. AISI 2205 çelik malzeme kimyasal kompozisyonu

AISI 2205	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu
	0,018	1,686	0,309	0,026	0,003	22,333	3,379	4,932	0,191	0,097

4.2.2. Sürtünme Kaynak Numunelerinin Hazırlanması

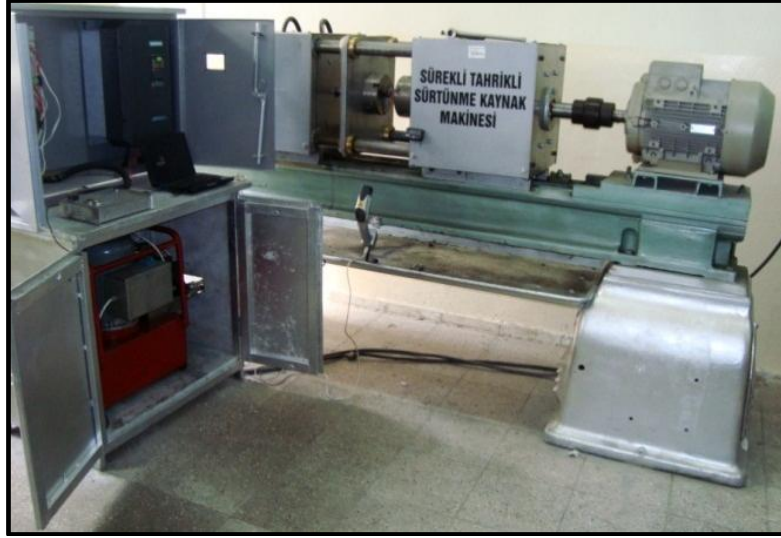
Piyasadan Ø12X6000 mm' lik ölçülerde temin edilen çubuklar 72 mm şerit testere makinesinde kesilmiş olup bu numunelerin alın yüzeyleri kir pas ve oksit tabakasından arındırılmak amacıyla 70 mm boyunda ve 12 mm çapında torna tezgâhında işlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Sürtünme kaynak numuneleri

4.2.3. Sürtünme Kaynak Tezgâhı

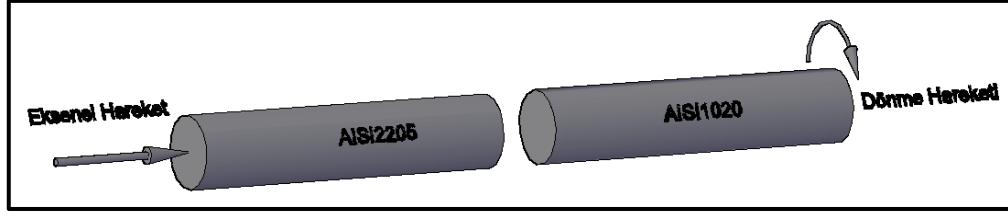
Tasarım ve imalatı araştırmacı tarafından yapılmış olan, elektronik kontrol ünitesine sahip sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâhı kullanılarak kaynaklar yapılmıştır. Tezgâhta devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi istenilen düzeyde ayarlanabilmektedir. Deneylerde kullanılan tezgah fotoğrafı Şekil 4.2' de görülmektedir.



Şekil 4.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgahı fotoğrafı

Tezgâh 11.1 Kw' lık Simens marka DC tahrik motoru ve bu motoru kontrol eden 11.1 Kw' lık Simens marka invertör ile çalışmaktadır. Dönerli torna aynasını kumanda eden tahrik motoru devir sayısı, 0 - 5 V arası DC gerilime sahip hız kontrol ünitesi tarafından 0 - 3500 dev/dk aralığındaki devir sayılarında çalışabilecek şekilde kontrol edilmektedir. Ayrıca, sürtünme kaynağında önemli bir parametre olan frenleme ve frenleme süresi, invertör üzerinden tahrik motoruna uygulanan DC gerilim ile kontrol edilebilmektedir. Diğer ayna 120 mm' lik tek piston ve 350 bar basınca kadar bu pistonu tahrik edecek hidrolik sistem yardımı ile eksenel olarak hareket etmektedir. İleri geri hareketi bu aynada oluşabilecek titreşim ve eksenel kaymaları önlemek amacıyla aynanın dört adet mil üzerinde hareket etmesi sağlanmıştır.

Sürtünme kaynağı işlemi esnasında birleştirilecek malzemelerin arayüzeyinde oluşan sıcaklığın tespiti amacıyla, 250-1800 °C arasında sıcaklık ölçümü yapabilen IGA 15 PLUS marka sıcaklık ölçer lazer ısı detektörü tezgah üzerine monte edilmiştir. Cihazın; kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzeyine odaklı, 70 cm uzağa sabitlenerek, 0.5 sn aralıklarda yapılan ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarılması ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti etkisi ile parçaların ayna içinde kaymasını, burkulma ve eksen kaçıklıklarını önlemek amacıyla aynaların iç kısımlarında 35 mm mesafede dayamalar yerleştirilmiştir. Deneylerin tamamında AISI 2205 çeliği sabit aynaya bağlanırken, AISI 1020 çeliği dönen ayna tarafına bağlanmıştır. Parçaların tezgahta bağlanma düzenleri şematik olarak Şekil 4.3' te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Malzeme çiftinin birleşme düzenini gösteren şematik resim

4.2.4. Sürtünme Kaynak Parametreleri

AISI 2205 ve AISI 1020 malzeme çiftinin sürtünme kaynakları için yaklaşık parametre değerlerinin tespit edilmesinde önce literatür çalışması tamamlanmış daha sonra yapılan ön çalışma ile kaynaklı bağlantılar için olabilecek en uygun değerler aralığı belirlenmiştir. Bu kapsamda devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi yığma basıncı ve yığma süresi kaynak parametreleri değişken olarak seçilmiş olup, bu değişkenler 3x3x3x1x1 şeklinde, Tablo 4.3' te verilen düzende deneysel tasarım yapılmıştır.

Tablo 4.3. Sürtünme kaynağı deneylerinde kullanılan parametreler

Numune No	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Devir Sayısı (dev/dk)	1300								
Sürtünme Süresi (sn)	8			6			4		
Sürtünme Basıncı (Mpa)	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Yığma Basıncı (Mpa)	60	80	100	60	80	100	60	80	100
Yığma Süresi (sn)	4	4	4	3	3	3	2	2	2
Numune No	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Devir Sayısı (dev/dk)	1500								
Sürtünme Süresi (sn)	8			6			4		
Sürtünme Basıncı (Mpa)	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Yığma Basıncı (Mpa)	60	80	100	60	80	100	60	80	100
Yığma Süresi (sn)	4	4	4	3	3	3	2	2	2
Numune No	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27
Devir Sayısı (dev/dk)	1700								
Sürtünme Süresi (sn)	8			6			4		
Sürtünme Basıncı (Mpa)	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Yığma Basıncı (Mpa)	60	80	100	60	80	100	60	80	100
Yığma Süresi (sn)	4	4	4	3	3	3	2	2	2

4.3. Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler

4.3.1. Metalografik İncelemeler

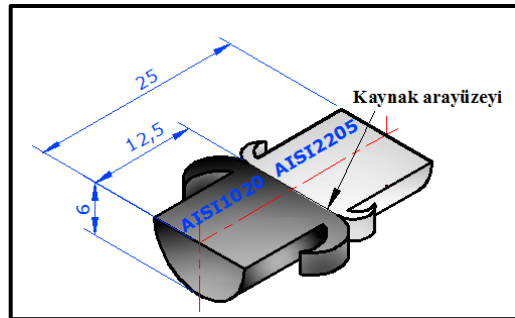
Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların yüzey karakteristiklerini belirlemek amacıyla Fujifilm marka HS10 model fotoğraf makinası kullanılarak makroskobik yüzey fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Metalografik incelemelerde kullanılan numuneler

Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi amacıyla numuneler; birleşme arayüzüne dik doğrultuda, 25 mm boyunda soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiştir. Daha sonra merkezdeki yapıya ulaşabilmek amacı ile numuneler orta eksenine kadar, soğutma sıvısı kullanılarak frezede işlenmiş ve yüzeyler düzlem haline getirilmiştir.

Birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin belirlenmesi amacıyla geleneksel temizleme ve parlatma yöntemi kullanılmış olup soğutma sıvısı kullanılarak hazırlandıktan sonra; sırasıyla 80, 120, 240, 600, 800 ve 1200 mesh' lik zımpara ile zımparalanarak 3 μm ' lik elmas pasta ile parlatılmış ve dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Metalografik incelemeler ve mikrosertlik ölçümleri için hazırlanan numune boyutları Şekil 4.5' te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Metalografik incelemeler için hazırlanan numune boyutları

Dağlama işleminde AISI 1020 çeliği için % 2 NHO_3 + % 98 alkol karışımı kullanılarak 5 sn süre ile nital dağlama yapılmıştır. AISI 2205 DPÇ için % 25 NHO_3 + % 75 saf su karışımında 7,5 V altında 30 sn süre ile elektrolitik olarak dağlama işlemi yapılmıştır.

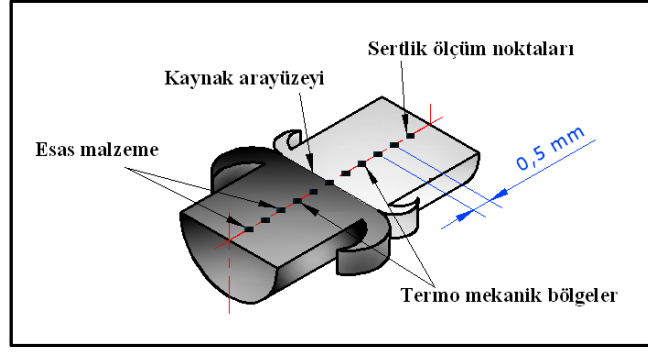
Kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi ve mikroyapı üzerindeki etkilerinin araştırılması amacı ile her bir numune için taramalı elektron mikroskobu ile incelemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda kırık yüzeyler üzerinde oluşan yorulma çatlak başlangıç ve ilerleme özellikleri incelenmiş, özellikle çatlak başlangıcında önemli görülen fotoğraflar alınmıştır. Bu amaçla Fırat Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL marka JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

Kaynaklı numunelerin mikroyapı analiz çalışmalarında, EDS analizleri ile kaynak bölgesinde oluşan fazların kimyasal içerikleri belirlenmiştir. Bu amaçla Fırat Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL JEM-2100F EDS analiz test cihazı kullanılmıştır. Kaynaklı bağlantıların ara bölgesinde oluşan fazların tespiti için X-Ray analizleri, Fırat Üniversitesi, Metalurji Malzeme Mühendisliğine ait cihaz ile yapılmıştır.

4.3.2. Mikrosertlik Analizi

Kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen sertlik değişimlerini belirlemek amacıyla mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü yapılacak numunelerin yüzeylerinin metalografik olarak hazırlanması gerektiğinden, bu ölçümlerde de daha önce SEM ile incelenmek için hazırlanarak, parlatılıp dağlanan numuneler kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler Şekil 4.6' da şematik olarak gösterilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri, 1,961 N yük, 10 sn' lik yükleme hızında uygulanarak, numunelerin tam orta ekseninden ve kaynak kesitine dik olacak bir hat üzerinde 0,5 mm aralıklarda tamamlanmıştır. Ölçümlerde iki standart uçtan bir olan 136°' lik tabanı kare piramit uç kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan Shimadzu marka mikro sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

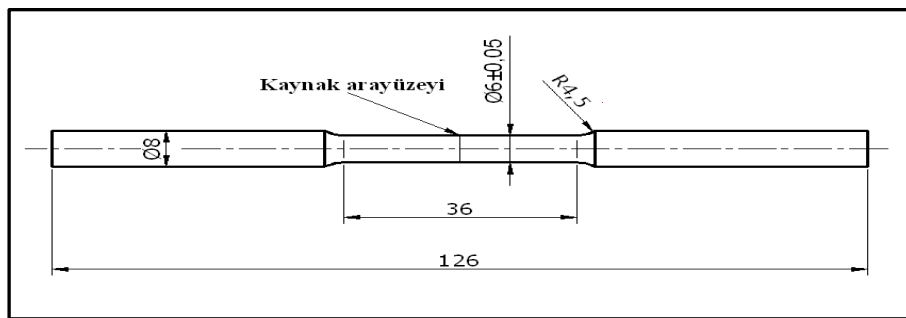


Şekil 4.6. Mikrosertlik ölçüm yapılan noktaların şematik gösterimi

4.3.3. Çekme Deneyi

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin oda sıcaklığında akma ve kopma dayanımlarını tespit etmek aynı zamanda dinamik yüklemelerde, istenilen yorulma tipine göre uygulanacak yükleri belirlemek amacı ile çekme deneyleri yapılmıştır.

Çekme deney numuneleri; metalik malzemelerin çekme deneyi metodu oda sıcaklığında belirlenecek mekanik özellikleri ile enine çekme deneylerinde kullanılan deney numunelerinin ölçülerini ve deney prosedürlerini kapsayan TS EN ISO 6892-1/Mart 2011 Türk Standartına uygun olarak hazırlanmıştır. Tüm deneyler oda sıcaklığında tamamlanmıştır. 6 mm çapında, 126 mm boyunda silindirik olarak imal edilen çekme deney numunelerine ait ölçüler Şekil 4.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme deney numunelerine ait ölçüler

Deney numuneleri yüzeylerindeki fazla kaynak metali giderilecek şekilde talaş kaldırma işlemine tabi tutulmuştur. Numune hazırlamanın son aşamalarında, yüzeyde çekme sertleşmesi veya aşırı malzeme ısınmasından kaçınmak için gerekli tedbirler alınarak, talaş kaldırma ve taşlama işlemi yapılmıştır. Yüzeyler, paralel uzunluk “Lc”

boyunca, çizik ve çentiklerden tamamen temizlenerek pürüzsüz bir test yüzeyi elde edilmiştir. Şekil 4.8’ de çekme deney numunesine ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 4.8. Çekme deney numunesi

Deney numuneleri, standartta uygun olarak kademeli ve sürekli olarak yüklenmiştir. Deneyler, tüm numuneler için Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Shimadzu marka universal (250 KN) çekme deney cihazında video ekstensometre kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde her bir parametre için üçer adet numune kullanılmış ve ortalama değerler alınmıştır.

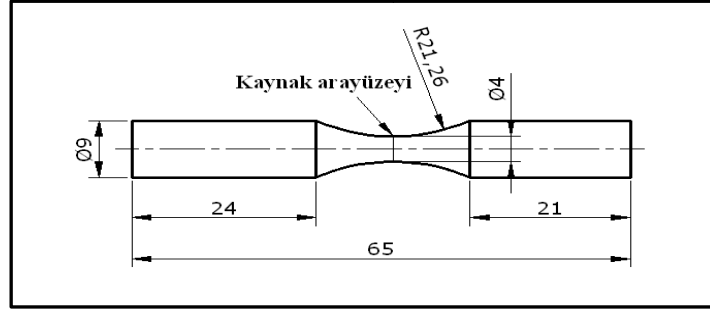
Deney sonuçları, standartta uygun olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları yazılırken kırılma yeri ve konumu kayıt edilmiştir. Ayrıca deney numunesi kırıldıktan sonra, kırık yüzeyler muayene edilmiş ve deneyi kötü yönde etkileyebilecek herhangi bir kusurun varlığı, bu kusurların tipi, boyutu ve miktarı birlikte tespit edilmiştir. Kırık numunelerin ve kırık yüzeylerin fotoğrafları çekilerek birlikte gösterilmiştir.

4.3.4. Döner Eğmeli Yorulma Deneyi

Endüstriyel uygulamalardaki birçok malzeme, çekme mukavemetinin çok altındaki tekrarlı gerilme veya şekil değişimlerine maruz kalmaktadır. Bu yüzden malzemelerin kullanılabilirliğine yorulma özellikleri ile daha iyi karar verilebilir [60].

Yorulma özelliklerinin tespiti için yapılan deneyler, anma çapı 4 – 12,5 mm arasında olan deney parçaları üzerinde bilerek gerilme konsantrasyonu verilmeksizin dönen çubuk eğme yorulma deneylerine ait şartları kapsayan ve Mart 2002’ de yürürlüğe girmiş olan TS ISO 1143 no’ lu standartta uygun olarak yapılmıştır. Yorulma deneylerinin sonuçları atmosferik şartlardan etkilenir bu sebeple kontrollü şartlar gerektiğinden, ISO/R 554 Madde 2.1’ deki şartlara bağlı kalınarak deneyler tamamlanmıştır.

Yorulma numuneleri kaynaklı bağlantılarda kaynak parametrelerinin etkisinin incelenebilmesi amacıyla TS ISO 1143 standardına uygun olarak toroit şekilli yapılmıştır. En küçük çapı 4 mm olan toroit şeklindeki numune boyutları Şekil 4.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Yorulma deney numunelerine ait ölçüler

Deney numunelerinin tümü CNC torna tezgâhında işlenip, yüzeyde çentik etkisine neden olabilecek çiziklerden temizlenmesi amacı ile 800, 1000 ve 2000 numaralı zımparalar ile aksel olarak zımparalanmış ve elmas pasta ile parlatılmıştır. Numuneler $R_a=0,025 \mu\text{m}$ yüzey kalitesinde hazırlanmıştır. Yüzey kalitesi ölçümleri Mitutoyo SJ-201P marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile her bir numune için ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 4.10’ da yorulma deneyi için hazırlanmış numune fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4.10. Yorulma deney numunesi

Yorulma testleri Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan ve frekansı 100 Hz (5952 dev/dk) olan, HI-TECH marka dönerek eğmeli yorulma test cihazı kullanılarak, oda sıcaklığında tamamlanmıştır. Kullanılan deney cihazı üzerindeki numaratör saniyede 100 çevrim yapmakta ve 1 numara ilerleyecek şekilde çalışmaktadır. Deney parçaları, yorulma cihazına numuneleri çevresel olarak sıkarak ve numunelerin eşeksenlik ayarının yapıldığı 6 adet civata ile bağlanmıştır. Şekil 4.11’ de yorulma deney cihazına ait fotoğraf görülmektedir.



Şekil 4.11. Yorulma deney cihazı

Her deney parçasında, uygulanan yükün meydana getirdiği gerilmeler dışında meydana gelebilecek diğer gerilmelerin önlenmesi gerekmektedir bu nedenle eksen kaçıklıkları bağlanan her bir numune için ayrı ayrı TS ISO 1143’ de belirtilen 0,013 mm’ lik değere uygun olacak şekilde dijital bir komparatör yardımı ile ölçülerek ayarlanmıştır. Böylece merkezkaç kuvvetinin etkisiyle ikincil gerilmelerin oluşmaması veya ihmal edilebilir seviyede kalması sağlanmıştır.

Yorulma deneyindeki en önemli kriter uygulanan gerilme değeridir. Deneye tabi tutulan malzemelere, çekme mukavemetlerinin $2/3$ ü ($2/3 \sigma_c$) ile “yorulma sınırı” ($1/2 \sigma_c$) arasında kalacak şekilde gerilmeler uygulanmıştır. Çalışılan numunelerde, AISI 1020 çeliğinin çekme dayanımının 610 MPa olduğundan AISI 1020 çeliği için uygulanacak yük aralığı;

Çekme dayanımının $2/3$ ’ üne tekabül edecek gerilme $2/3 \sigma_c = 406.667 \text{ MPa}$

Yorulma sınırı tespiti için kabul edilecek ön gerilme $\sigma_c/2 = 305 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştır.

Çekme dayanımı 956 MPa olarak bulunan AISI 2205 DPÇ için uygulanacak yük aralığı 498-640 MPa olarak hesaplanmıştır. Kaynaklı numunelerde kaynak arayüzeyinin bağlantının orta noktasında olması nedeni ile AISI 1020 çeliğine uygulanacak yük değerleri ile yüklemeler yapılmıştır. Bu nedenle kaynaklı numunelerde yorulma deneyleri

305 – 407 N/mm² arasında gerilme değerlerini oluşturan yüklerle deney yapılması gerekmektedir.

Söz konusu gerilmeleri, yorulma numunesi üzerinde oluşturmak için uygulayacak yük değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmış ve “sabit gerilmeli” yorulma tipi kullanılmıştır. Yorulma deneyleri sırasında en küçük çapı 4 mm olan deney parçasına, uzaklığı (moment kolu) 125,7 mm olan yükleme noktasından ağırlık asılarak parça eğilmeye zorlanmıştır (Şekil 4.10). Kritik kesitteki eğilme gerilmesi uygulanan yüke bağlı olarak kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir [47,60,71].

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W} = \frac{P.L}{\frac{\pi.dD^3}{32}} = \frac{32.P.L}{\pi.D^3} = \frac{32.125,7.P}{\pi.4^3} = 20P \quad (4.1)$$

Burada; σ : Numunenin en dış noktasındaki gerilme;

W: Kutupsal atalet momenti,

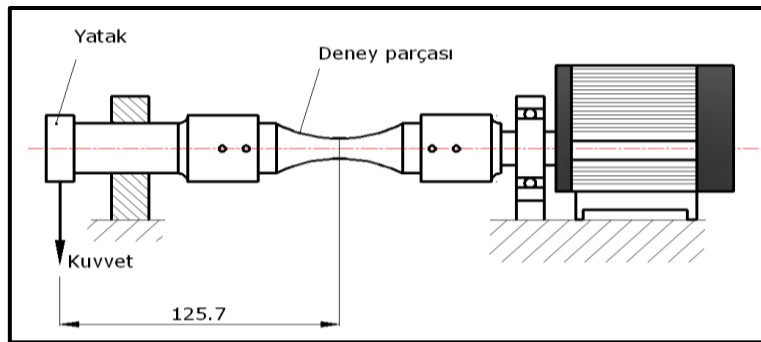
M_e: Eğilme momenti,

P: Numuneye uygulanan toplam yük,

L: Moment kolu (yük tatbik noktası ile yatak mesnet arasındaki mesafe),

D: Numunenin en düşük çapıdır [47].

Yukardaki eşitlikten anlaşılacağı gibi yükleme koluna asılan ağırlığın 20 katı deney parçasındaki eğme gerilmesini vermektedir. Uygulanacak 305-407 MPa aralığındaki gerilme değerleri yaklaşık 15 - 20 N’ luk yükler uygulanarak elde edilmiştir. Ancak yorulma sınırını da gözlemlemek için 9 N – 24 N arasında yükler kullanılarak deneyler tamamlanmıştır (Şekil 4.12) [60].



Şekil 4.12. Yorulma deney cihazında numune yükleme şekli

Bütün numune yapılarının yorulma sınırının tespitinde, deneysel veriler kullanılarak S-N diyagramları (Wöhler eğrileri) çizilmiştir. S-N diyagramında numunelerin kullanım dağılımı sonlu ömür dayanım bölgesinde az, sürekli dayanım bölgesinde mümkün olduğunca çok sayıda olmuştur.

Deneyler yorulma test cihazında periyodik olarak basma ve çekme yüklemesi yapılarak uygulandığı için malzemelerin yorulmasında en kötü hal olan “tam değişken” ($R = -1$) yükleme halinde, her bir kaynaklı bağlantı için S-N eğrileri oluşturup uygulanan “gerilme-çevrim” den oluşan ömür denklemleri elde edilmiştir. Yorulma grafiğlerinin tamamı logaritmik ölçek ile çizilmiştir [60].

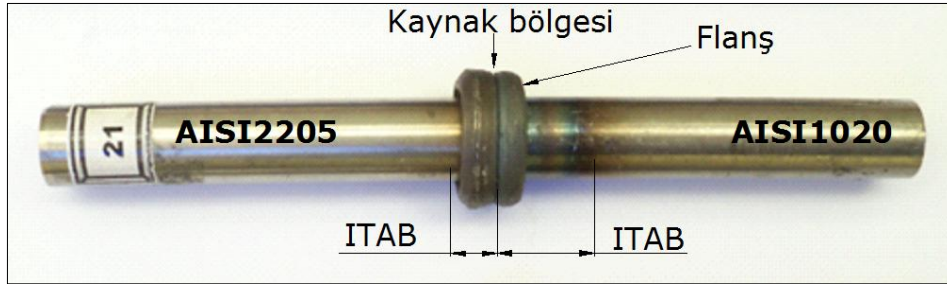
Ana malzeme ve kaynaklı bağlantılarda, uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise literatüre uygun olarak deney 10^7 çevrim sayısını geçince durdurulmuştur. Yorulma deneyleri sırasında bir gerilme seviyesinde kopmayan numuneler diğer bir gerilme seviyesinde kullanılmamıştır [28,60]. Kaynaklı bağlantıların yorulma deneylerinden önce kullanılan ana malzemelere ait yorulma deneyleri yapılarak S-N eğrileri elde edilmiştir. Deneylerden sonra yorulma numunelerine ait kırık yüzey makro fotoğrafları ve taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntüleri incelenmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI ve YORUMLANMASI

5.1. Kaynaklı Numunelerin Makroskobik Değerlendirilmesi

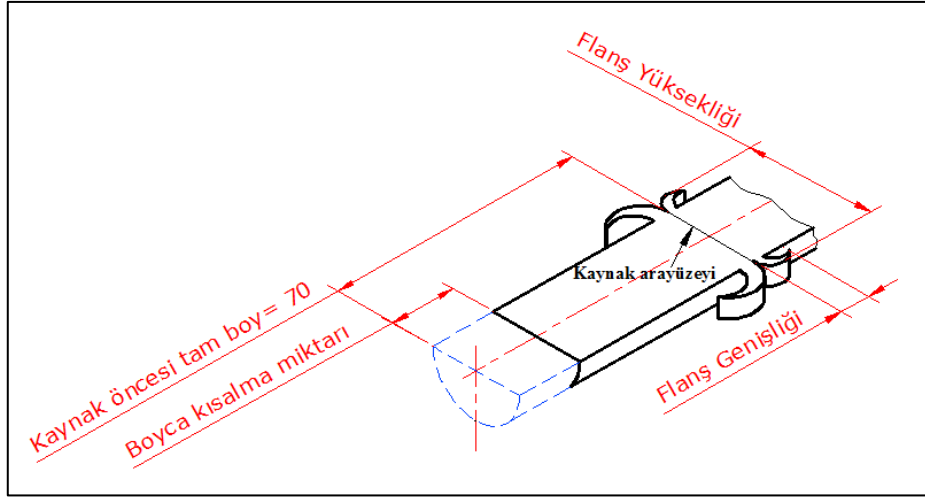
Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen parçalarda kaynak arayüzeyinden dışarı taşan malzeme bir flanş oluşturmakta ve buna bağlı olarak malzeme boyca kısalmaktadır. Farklı işlem parametreleri kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı bağlantıların, yüzey ve dışarı taşan metalin profilindeki değişim Şekil 5.1’ de şematik resim esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinden alınan makro fotoğraflar değerlendirildiğinde; temelde benzerlik göstermesine rağmen dışarı taşan malzemenin profili ve miktarında önemli farklılıklar olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynaklı bağlantılarda ısıdan etkilenen bölgeler bağlantı kalitesi bakımından önemlidir. Kaynaklı bağlantılara ait makro fotoğraflar incelendiğinde ısıdan etkilenen bölge AISI 1020 tarafında net olarak gözlenirken düşük ısı iletim katsayısına sahip AISI 2205 tarafında bu bölgenin varlığı net olarak görülmemektedir (Şekil 5.1).



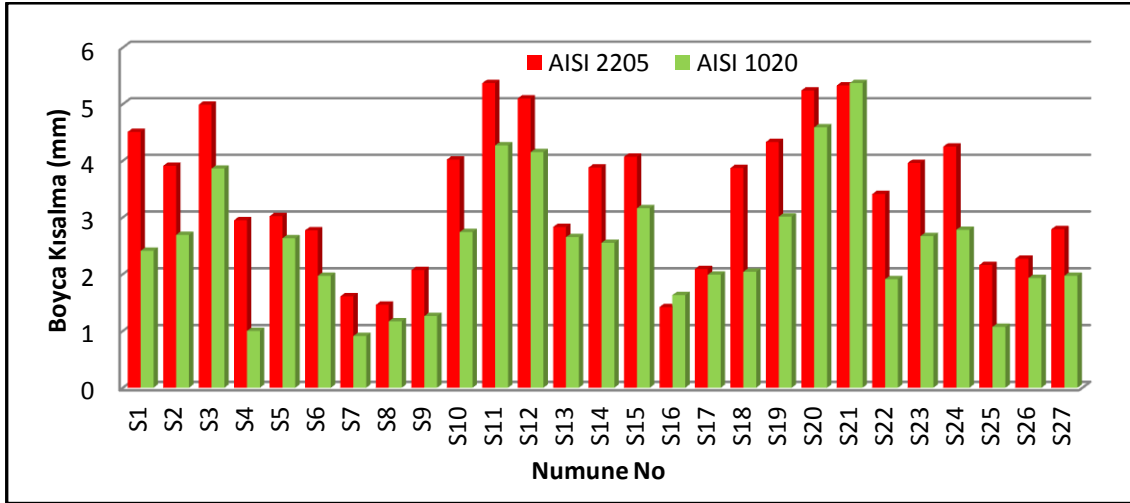
Şekil 5.1. Kaynak bölgesinde oluşan flanş ve IEB’ nin gösterimi

Kaynaklı numunelerin her birinde oluşan boyca kısaltmalar ve flanş miktarları Şekil 5.2’ de verilen düzende ölçülmüştür.



Şekil 5.2. Boyca kılmalma miktarı ve flanş geometrisine ait özellikler

Sürtünme kaynağı parametrelerine bağlı olarak oluşan ortalama boyca kılmalma miktarları AISI 2205 ve AISI 1020 eliklerini ayrı ayrı gösterecek biçimde Şekil 5.3’ te grafik halinde verilmiştir. Ayrıca, ölçülen değerler Tablo 5.1’ de kullanılan kaynak parametreleri ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Ortalama boyca kılmalma miktarlarının grafik olarak gösterimi

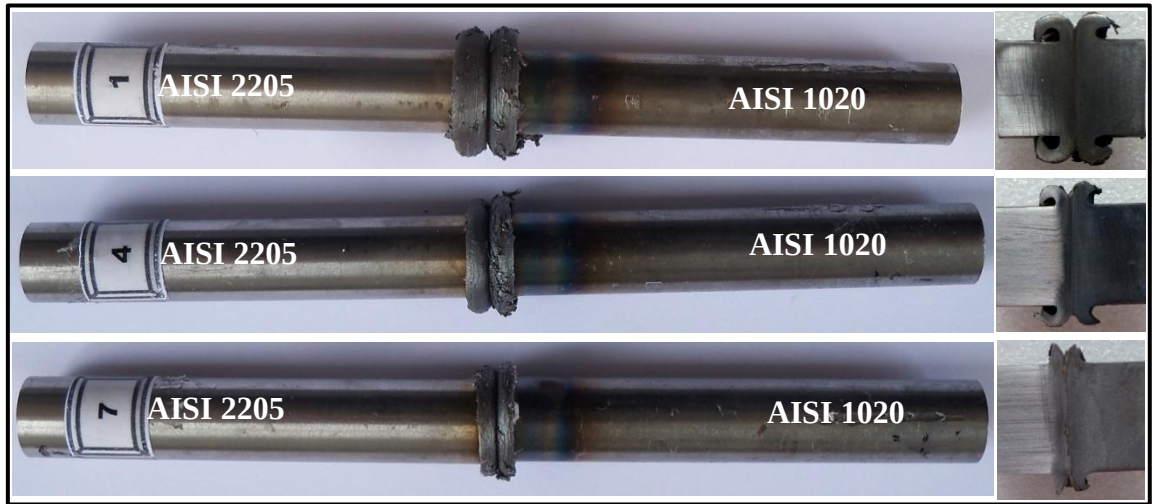
Tablo 5.1. Kaynak parametrelerine bağı olarak boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Sürtünme Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı(Mpa)	Yığma Basıncı(Mpa)	Yığma Süresi (sn)	AISI 2205	AISI 1020
S1	1300	8	30	60	4	4,51	2,41
S2			40	80	4	3,91	2,69
S3			50	100	4	4,99	3,86
S4		6	30	60	3	2,95	1,00
S5			40	80	3	3,02	2,63
S6			50	100	3	2,77	1,97
S7		4	30	60	2	1,61	0,91
S8			40	80	2	1,46	1,17
S9			50	100	2	2,07	1,26
S10	1500	8	30	60	4	4,02	2,74
S11			40	80	4	5,37	4,27
S12			50	100	4	5,10	4,15
S13		6	30	60	3	2,83	2,65
S14			40	80	3	3,88	2,55
S15			50	100	3	4,07	3,16
S16		4	30	60	2	1,42	1,63
S17			40	80	2	2,09	1,99
S18			50	100	2	3,87	2,04
S19	1700	8	30	60	4	4,33	3,01
S20			40	80	4	5,24	4,59
S21			50	100	4	5,33	5,37
S22		6	30	60	3	3,41	1,91
S23			40	80	3	3,96	2,67
S24			50	100	3	4,25	2,78
S25		4	30	60	2	2,16	1,07
S26			40	80	2	2,27	1,93
S27			50	100	2	2,79	1,97

5.1.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

Sürtünme kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen, kaynaklı bağlantılar üzerinden alınan yüzey ve arayüzey fotoğrafları, değişen sürtünme süresi esas alınarak değerlendirilmiştir.

1300 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı, üç farklı sürtünme süresi, (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S4 ve S7 no' lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası yüzey ve ara yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.4' te verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarında artış kaydedilmiştir. Ayrıca dışarı taşan malzemenin profili, literatürde belirtilen şekle paralel görünüm arz etmektedir.



Şekil 5.4. S1, S4, S7 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

Bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey makro fotoğrafları incelendiğinde; S7 no' lu numune hariç diğer her iki kaynaklı numune arayüzeyinde boşluk, bağlantısız bölgelerin olmadığı kusursuz birleştirmeler görülmektedir. 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S7 no' lu numunede, arayüzeyde plastik deformasyon için gerekli olan sıcaklığa ulaşmada, sürtünme süresinin yetersiz olduğu bunun sonucunda düzgün bir arayüzeyin oluşmadığı bu numuneye ait arayüzey makro fotoğrafından açıkça görülmektedir. N.Özdemir [2] yapmış olduğu çalışmada dışarı taşan malzeme miktarı şekli ve boyutlarının tamamen sürtünme süresine bağlı olarak değiştiğini vurgulamıştır. Şekil 5.4 incelendiğinde, sürtünme süresindeki kademeli değişimin boyca kısalma miktarı, dışarı taşan malzemenin şekil ve boyutları ile arayüzey düzgünlüğü üzerinde önemli rol oynadığı

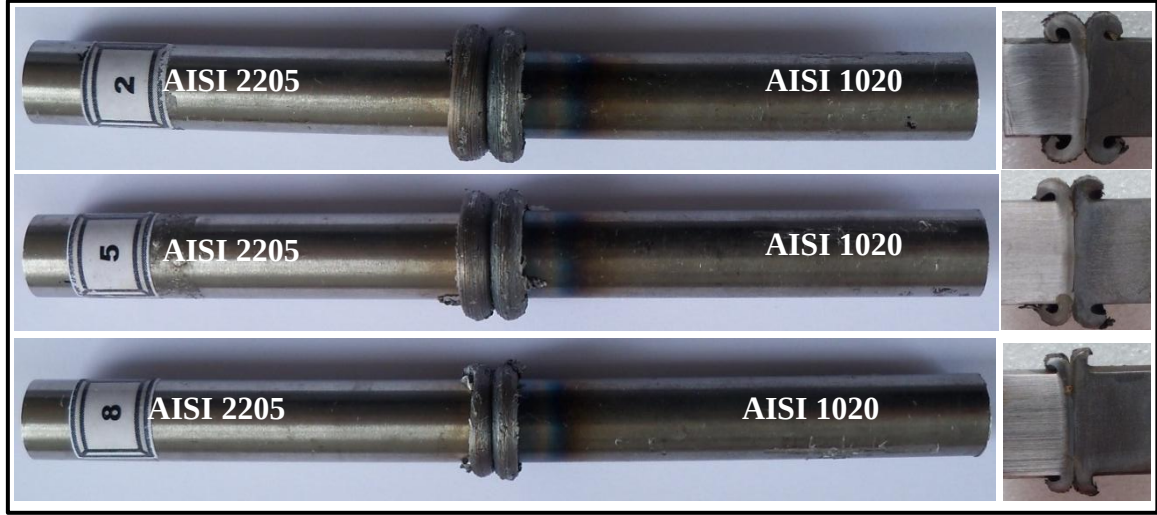
açıkça görülmektedir. Bu durum, artan sürtünme süresine bağlı olarak arayüzeyin yüksek sıcaklık tesiri altında kalma süresi ve deformasyon derecesinin artması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak ısıdan etkilenen bölgenin (IEB) AISI 1020 tarafında arttığı açıkça görülmektedir. AISI 2205 tarafında IEB' nin net olarak görülüyor olması tamamen bu malzemenin ısı iletim katsayısının düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Farklı ısı iletim katsayılarına sahip AISI 2205 ve AISI 1020 çelik çifti kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden dışarı taşan malzeme miktarını belirlemek için yapılan boyca kısalma değerleri Tablo 5.2' de ayrı ayrı verilmiştir. Tablodan da açıkça görüldüğü gibi boyca kısalmanın, en fazla AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında meydana geldiği görülmektedir. Her ne kadar AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısı AISI 1020 çeliğinden yaklaşık olarak üç kat daha düşük olsa da, AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin sertliği (328 Hv) AISI 1020 çeliğin sertliğinden (182 Hv) % 56 daha fazla olması, arayüzey sıcaklığının, deformasyon derecesi üzerindeki etkisini dengelendiği düşünülmektedir.

Tablo 5.2. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S1	1300	8	30	60	4	4,51	2,41
S4		6			3	2,95	1,00
S7		4			2	1,61	0,91

1300 dev/dk devir sayısı 40 MPa sürtünme basıncı ve 8, 6 ve 4 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S2, S5 ve S8 no' lu numuneler üzerinde alınan makro yüzey ve arayüzey fotoğrafları Şekil 5.5' te verilmiştir.



Şekil 5.5. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

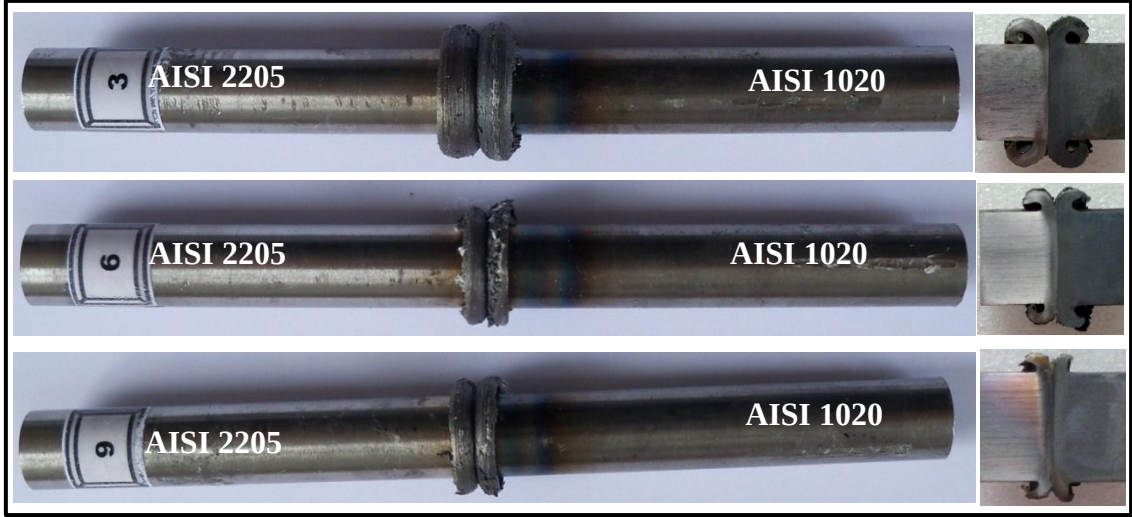
Bu kaynaklı bağlantılara ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde, S8 no' lu numunede dışarı taşan malzeme şekli ve düzgünlüğü farklılık göstermektedir. Bunun sebebi, 4 sn kaynak süresinin arayüzeyde yeterli bağlanma için gerekli olan deformasyon sıcaklığına ulaşamamasıdır. Arayüzeyde malzemenin dışarı taşma rejimi üzerinde sıcaklığın etkin bir rol oynadığı bilinmektedir. Sıcaklık arttıkça, arayüzeyden malzemenin dışarı ekstrüze edilmesi için gerekli viskozite değerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu nedenle sürtünme kaynağının parametrelerinin belirlenmesinde temel prensip, arayüzeyde yeterli plastik deformasyon için gerekli sıcaklığa ulaşma esası göz önüne alındığında sürtünme süresi ve sürtünme basıncının kaynaklı bağlantıların birleşme davranışı ve dışarı taşan malzemenin rejimi üzerinde önemli rol oynadığı görülmektedir. Ayrıca, sürtünme basıncı 10 MPa artırılarak gerçekleştirilen bu kaynaklı bağlantılarda basıncın kaynak mukavemeti üzerinde önemli rol oynadığı daha sonraki bölümde belirtilen çekme gerilmesi üzerinde önemli iyileşmeler sağladığı belirlenmiştir.

Bu üç kaynaklı bağlantı üzerinde yapılan boyca kısalma ölçümleri Tablo 5.3' te gösterilmektedir. S2, S5, S8 no' lu bu numunelerde boyca kısalma miktarları sırasıyla AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında 3.91, 3.02 ve 1.46 mm AISI 1020 çelik tarafında ise 2.69, 2.63 ve 1.17 mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlardan artan sürtünme süresine bağlı olarak boyca kısalma miktarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu kaynaklı bağlantılar bir önceki grup ile kıyaslandığında artan sürtünme basıncının, dışarı taşan malzemenin şekli ve rejimi üzerinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

Tablo 5.3. S2, S5, S8 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yigma Bsc(MPa)	Yigma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S2	1300	8	40	80	4	3,91	2,69
S5		6			3	3,02	2,63
S8		4			2	1,46	1,17

Sürtünme basıncı 20 MPa arttırılarak gerçekleştirilen S3, S6 ve S9 no' lu kaynaklı bağlantılar üzerinden alınan yüzey ve arayüzey makro fotoğraflar Şekil 5.6' da verilmiştir. Fotoğraflar temelde bir önceki grupla benzerlik göstermesine rağmen arayüzeyden dışarı taşan malzemenin çanak şeklini alması daha net olarak görülmektedir. Ayrıca, bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey makro fotoğrafları incelendiğinde, arayüzeyin daha düzgün bir hat şeklinde ortaya çıktığı görülmekte olup bu durumun, artan sürtünme basıncı ve sürtünme süresindeki kademeli artışın sonucu olarak ortaya çıktığı bilinmektedir. Ancak, 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S9 no' lu numuneye ait yüzey fotoğrafları incelendiğinde, dışarı taşan malzemenin yüzeyinin düzgün ve homojen bir taşma göstermediği, dışarı taşan malzemenin yüzeyinde çatlakların olduğu görülmektedir. Buna paralel arayüzey makro fotoğrafında da AISI 1020 çelik tarafında dışarı taşan malzemenin çanak şeklini almadığı belirlenmiştir.



Şekil 5.6. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

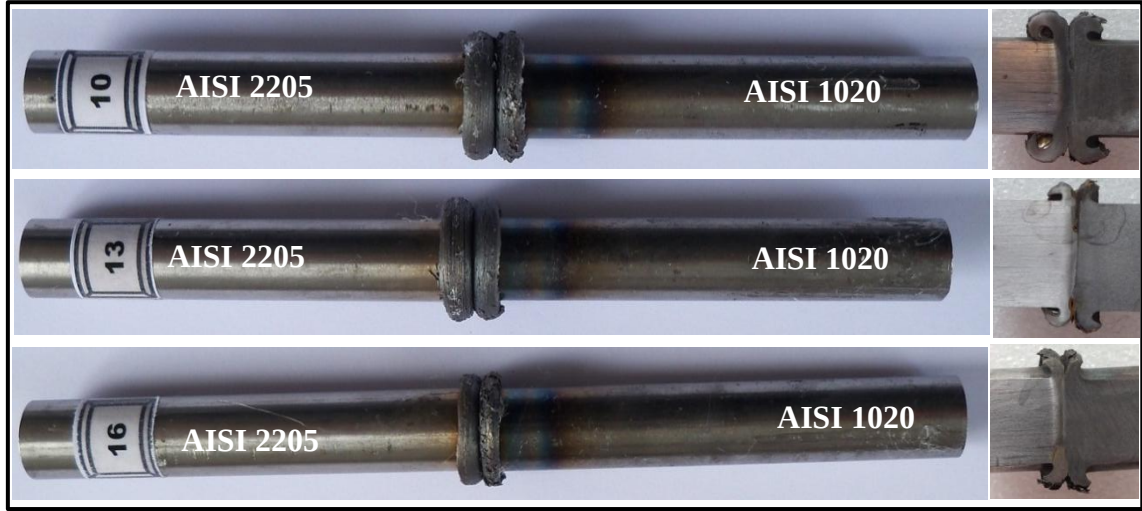
Bu üç kaynaklı bağlantı üzerinden yapılan boyca kısalma miktarını belirleyen ölçüm sonuçları Tablo 5.4' te verilmiştir. Tablo 5.4' te görüleceği gibi bu numunelerde boyca kısalma miktarları sırasıyla AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında 4.99, 2.77 ve 2.07 mm, AISI 1020 çelik tarafında ise 3.86, 1.97 ve 1.26 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan açıkça görüldüğü gibi eksenel basınç bir önceki guruba göre boyca kısalma miktarının artmasına neden olmuştur.

Tablo 5.4. S3, S6 ve S9 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yıgma Bsc(MPa)	Yıgma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S3	1300	8	50	100	4	4,99	3,86
S6		6			3	2,77	1,97
S9		4			2	2,07	1,26

5.1.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

1500 dev/dk devir sayısı 30 MPa sürtünme basıncı ve 8, 6 ve 4 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S10, S13 ve S16 no' lu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve arayüzey makro fotoğrafları Şekil 5.7' de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.7. S10, S13, S16 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

Bu kaynaklı bağlantılara ait yüzey fotoğrafları incelendiğinde, bir önceki seride yapılan kaynaklı bağlantılara göre daha düzgün bir dışarı taşma ve flanş geometrisinin oluştuğu, arayüzeyde dışarı taşan malzeme miktarında artış olduğu görülmektedir. Devir sayısının kademeli artışı, bağlantının geometrisi ve merkezden dışarı taşan malzeme miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum, artan devir sayısına bağlı olarak arayüzeyde etkin bir plastik deformasyon için gerekli olan sıcaklığa çıkma süresini aşağı çekeceği, böylece sürtünme fazının gerçekleşme aralığının uzaması durumunda daha fazla malzemenin dışarı atılması ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, 1500 dev/dk devir sayısı kullanılması ve sürtünme süresinde kademeli olarak arttırılmasıyla AISI 1020 çelik tarafında IEB' nin genişlediği görülmektedir. Bu durum sürtünme fazını uzunluğu ve malzemenin ısı iletim katsayısı ile ilişkilidir.

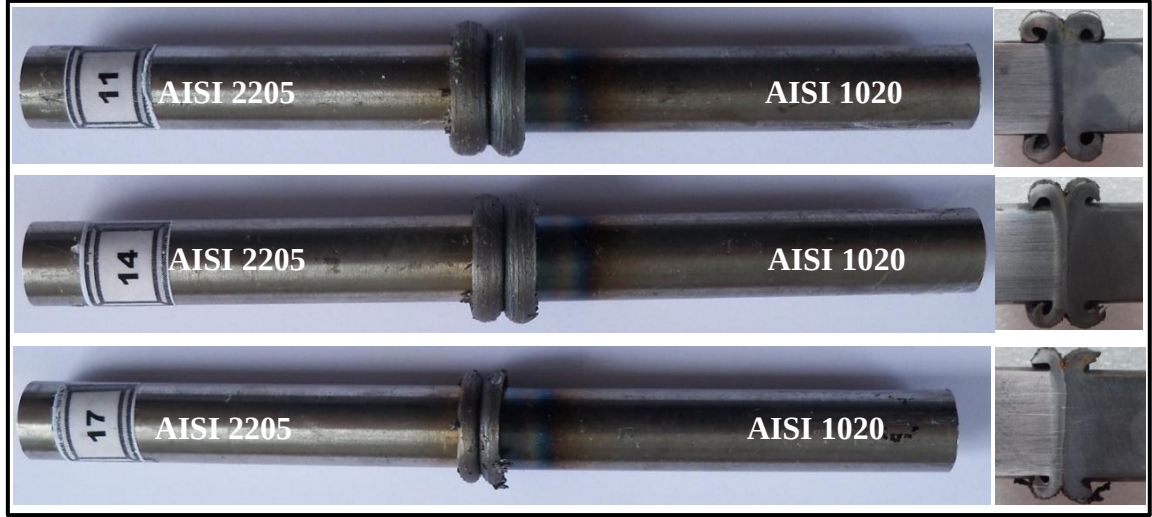
S10, S13 ve S16 no' lu kaynaklı bağlantılar üzerinden alınan boyca kılma miktarları Tablo 5.5' te verilmiştir. Tablo 5.5 incelendiğinde, bu numunelerde boyca kılma miktarları sırasıyla AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında 4.02, 2.83, 1.42 mm AISI 1020 çelik tarafında ise 2.74, 2.65, 1.63 mm, olarak kaydedilmiştir. Bu

numunelere ait boyca kısalmalar bir önceki grup ile kıyaslandığında; artan devir sayısına bağlı olarak boylarındaki kısalma miktarının % 14 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Isı girdisinin artması ile birlikte daha fazla malzemenin viskoz hale gelerek dışarı taşıdığı belirlenmiştir.

Tablo 5.5. S10, S13, S16 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yğma Bsc(MPa)	Yğma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S10	1500	8	30	60	4	4,02	2,74
S13		6			3	2,83	2,65
S16		4			2	1,42	1,63

1500 dev/dk devir sayısı 40 MPa sürtünme basıncı ve 8, 6 ve 4 sn sürtünme süreleri kullanılarak, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş S11, S14 ve S17 no' lu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve arayüzey makro fotoğrafları Şekil 5.8' de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait makro yüzey fotoğrafları incelendiğinde, ara kesitlerinde herhangi bir boşluk ve çatlakın olmadığı aynı zamanda bağlantı kalitesinde önemli sayılabilecek bir artışın olduğu görülmüştür. Her iki malzeme tarafında oluşan flanş miktarları diğer gruplarda olduğu gibi birbirinden farklı olmuştur. Boyca kısalma miktarının fazla olduğu AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında flanş hacminin daha büyük olduğu görülmektedir. IEB, AISI 1020 çelik tarafında daha geniş bir alanda ve belirgin olarak gözlemlenmektedir. IEB' nin genişliği sürtünme süresine paralel olarak değişmektedir.



Şekil 5.8. S11, S14, S17 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

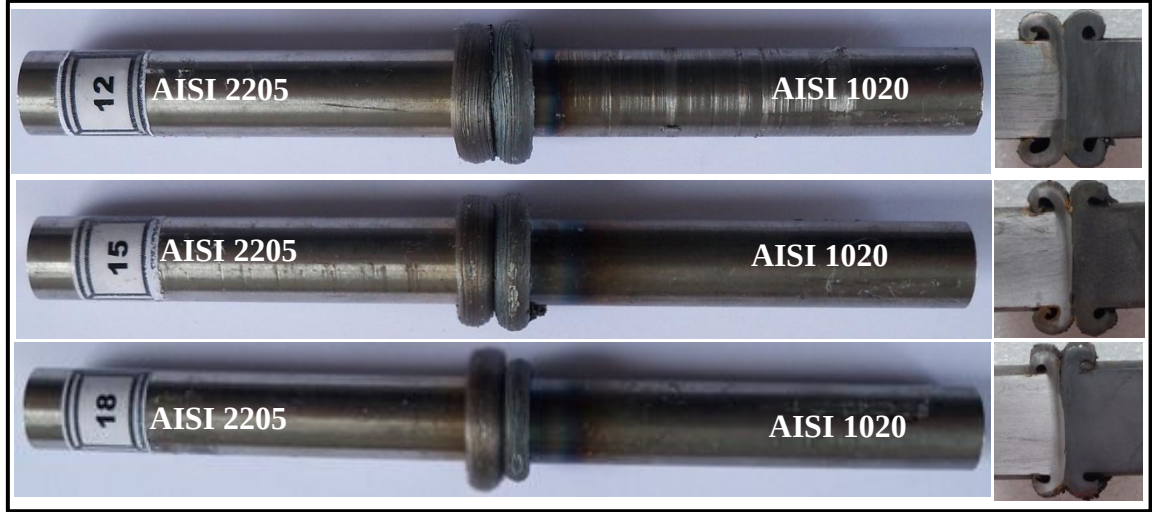
Sürtünme basıncı 10 MPa artırılarak gerçekleştirilen bu kaynaklı bağlantılar bir önceki seri ile ilişkilendirildiğinde temelde benzerlik göstermektedir. Ancak, bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey makro fotoğrafları incelendiğinde, 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S17 no' lu numune arayüzeyinin AISI 1020 çeliği tarafına kaydığı görülmektedir. Sürtünme fazının kısa tutulması, arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesini ve arayüzey malzemesinin sıcaklığın tesirinde kalma süresini düşürecektir. Arayüzeyin AISI 1020 çelik tarafına kayması, artan sürtünme basıncının arayüzeyde yeterince viskoz hale gelmeyen malzeme üzerindeki şiddetli deformasyonu ve AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin sertliğinin AISI 1020 çelik sertliğinden daha yüksek olması ile açıklanabilir.

S11, S14 ve S17 no' lu numuneler üzerinde alınan boyca kısalma ölçüm sonuçları Tablo 5.6' da gösterilmektedir. Boyca değişim miktarları AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında sırası ile 5.37, 3.88, 2.09 mm AISI 1020 çelik tarafında ise 4.27, 2.55 ve 1.99 mm olarak ölçülmüştür. 1300 dev/dk devir, 40 MPa sürtünme basıncında birleştirilen diğer serideki numuneler (S2, S5 ve S8) ile karşılaştırdığımızda toplam boyca kısalma miktarının arttığı görülmüştür.

Tablo 5.6. S11, S14 ve S17 no' lu numunelerdeki boyca kısıalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısıalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S11	1500	8	40	80	4	5,37	4,27
S14		6			3	3,88	2,55
S17		4			2	2,09	1,99

1500 dev/dk devir sayısı 50 MPa sürtünme basıncı ile 8, 6 ve 4 sn sürtünme sürelerinin kullanıldığı S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey makro fotoğrafları Şekil 5.9' da gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları incelendiğinde, artan sürtünme basıncı ve sürtünme süresine bağlı olarak dışarı taşan malzemenin geometrisi her üç numunede benzerlik göstermesine rağmen, arayüzeyden en büyük malzeme taşınımı 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S12 no' lu numune ortaya çıktığı görülmektedir. Bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey makro fotoğraflar incelendiğinde, boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgelerin olmadığı, dışarı taşan malzemenin şekil ve geometrisinin literatüre uygun formda olduğu görülmektedir. Ancak 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S18 no' lu numune arayüzeyin AISI 1020 çelik tarafına az da olsa kaymasının, arayüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresinin kısa olması ve sertlik değerleri birbirinden farklı olan her iki malzeme çiftinde eksenel basıncın oluşturduğu deformasyonun aynı olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.9. S12, S15, S18 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

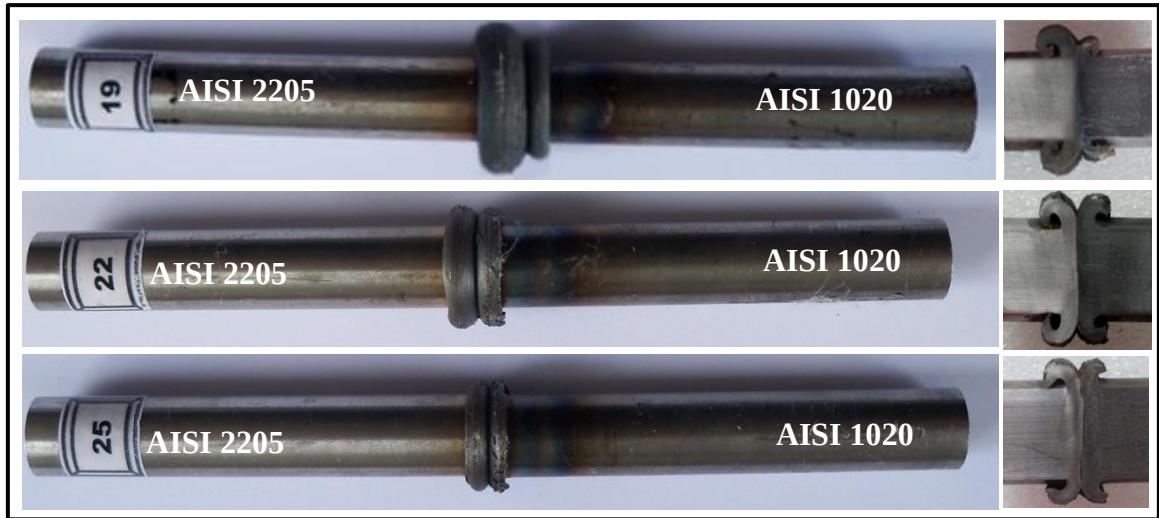
S12, S15 ve S18 no' lu numuneler üzerinde alınan boyca kısılma ölçüm sonuçları Tablo 5.7' de verilmiştir. Boyca kısılma miktarlarının AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında sırası ile 5.10, 4.07, 3.87 mm, AISI 1020 çelik tarafında 4.15, 3.16 ve 2.04 mm olduğu görülmektedir. Tablo incelendiğinde, AISI 1020 çeliğe göre ısı iletim katsayısı düşük olan AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında boyca kısılma miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, dışarı taşan malzeme miktarı, bir önceki grupla karşılaştırıldığında, artan sürtünme basıncına bağlı taşma miktarında arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.7. S12, S15, S18 no' lu numunelerdeki boyca kısılma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısılma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S12	1500	8	50	100	4	5,10	4,15
S15		6			3	4,07	3,16
S18		4			2	3,87	2,04

5.1.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

1700 dev/dk devir sayısı 30 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S19, S22 ve S25 no' lu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve arayüzey makro fotoğrafları Şekil 5.10' da gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait yüzey fotoğrafları incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak arayüzeyden taşan malzemenin daha düzgün flanş geometrisi oluşturduğu görülmektedir. Bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey makro fotoğrafları incelendiğinde ise AISI 1020 çelik tarafında arayüzey malzemesinin düzenli bir formda dışarı taşmadığı açıktır. Bu durumun; iki malzeme çiftinin ısı iletim katsayıları arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu fark nedeni ile AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında plastik deformasyon için gerekli sıcaklığa daha hızlı ulaşmakta ve arayüzeyin yüksek sıcaklık etkisinde kalma süresi artmaktadır. Makroskobik incelemelerde AISI 1020 çelik tarafında ısıdan etkilenen bölgelerin daha geniş görülmesi bu sonucu doğrular niteliktedir.



Şekil 5.10. S19, S22, S25 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

Her üç numunede flanş miktarlarının AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında AISI 1020 çeliğine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Flanş miktarlarındaki bu farklılık, sürtünme süresinin azalması ile 1300 ve 1500 dev/dk ile birleştirilen diğer numunelerde olduğu gibi her iki malzeme tarafında birbirine yakın boyutlarda meydana gelmiştir. Sürtünme süresindeki artış her iki malzeme tarafındaki flanş boyutlarının birbirinden farklı olmasına neden olmaktadır. Özellikle sürtünme süresinin 8 sn olduğu

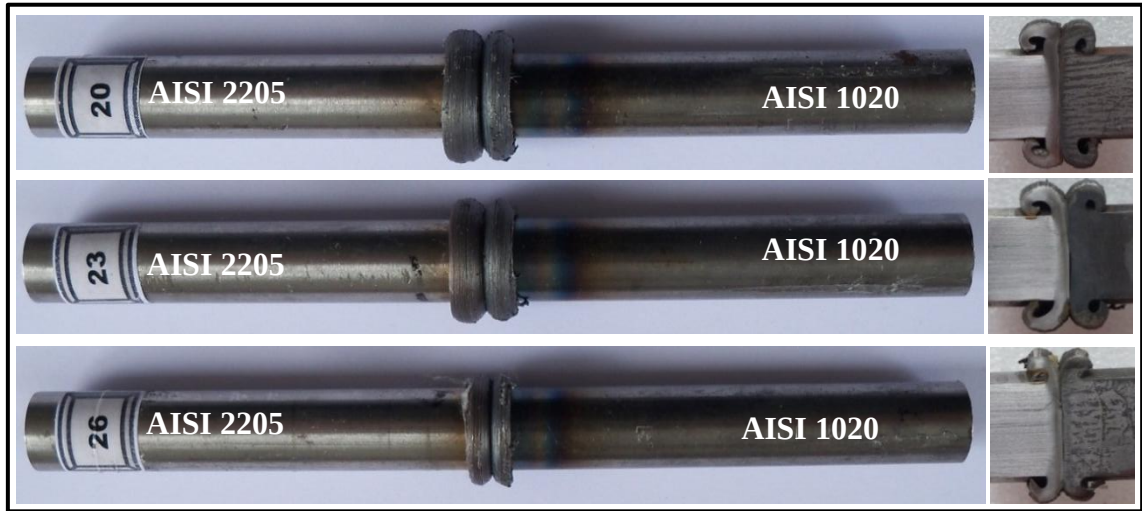
S19 no' lu numunede flanş boyutlarındaki fark daha belirgin olarak meydana gelmiştir (Şekil 5.10). Bu durum artan devir sayısına bağlı olarak sıcaklık değerlerinin yükselmesi ve malzemelerin ısı iletim katsayılarının farklı olması ile ilişkilendirilebilir. 1300 ve 1500 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen diğer numunelerde olduğu gibi 1700 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen bu numunelerde de sabit devir ve sabit sürtünme basıncı altında sürtünme sürelerindeki artışa bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarlarının arttığı Şekil 5.10' da açıkça görülmektedir.

30 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait boyca kılma miktarları Tablo 5.8' de gösterilmektedir. Her bir malzemede meydana gelen boyca kılma miktarları ayrı ayrı belirtilmiştir. 1700 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen bu numunelerde; artan devir sayısına bağlı olarak her iki malzeme tarafında boyca kılma miktarının 1300 ve 1500 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. S19, S22 ve S25 no' lu numunelerde toplam boyca kılma miktarları sırasıyla, 8.34, 5.32 ve 3.23 mm olarak ölçülmüştür. Bu grup içinde azalan sürtünme süresine bağlı olarak boyca kılma miktarları azalmıştır. Kırık vd. [80] sürtünme kaynaklı bağlantılarda azalan sürtünme süresi ile boyca kılma miktarının azaldığını, farklı metal çiftlerinde boyca kılma miktarındaki farklılığın malzemelerin mekanik özelliklerine bağlı olarak değiştiğini bildirmişlerdir.

Tablo 5.8. S19, S22, S25 no' lu numunelerdeki boyca kılma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kılma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S19	1700	8	30	60	4	4,33	3,01
S22		6			3	3,41	1,91
S25		4			2	2,16	1,07

Sürtünme basıncı 10 MPa arttırılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilen S20, S23 ve S26 no' lu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve arayüzey makro fotoğrafları Şekil 5.11' de sırasıyla verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait yüzey ve arayüzey makroyapı fotoğrafları incelendiğinde, numune yüzeylerinde herhangi bir kaynak hatasının olmadığı görülmektedir. Bu numunelerde artan sürtünme basıncı ile dışarı taşan malzeme miktarında artış olmuştur. Bununla birlikte, artan basınç değeri sonucunda flanş şekillerinin her iki malzeme tarafında birbirine yakın boyutlarda meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde, gerek arayüzey düzgünlüğü gerekse dışarı taşan malzemenin flanş geometrisi bir önceki seri ile kıyaslandığında önemli farklılıklar görülmektedir. Bu fark sürtünme kaynağında emniyetli bağlantılar elde etmek için gerekli arayüzey sıcaklığına çıkma ve yeterli plastik deformasyon için eksenel basıncın yeterli olduğu sonucunu çıkarmaktadır.



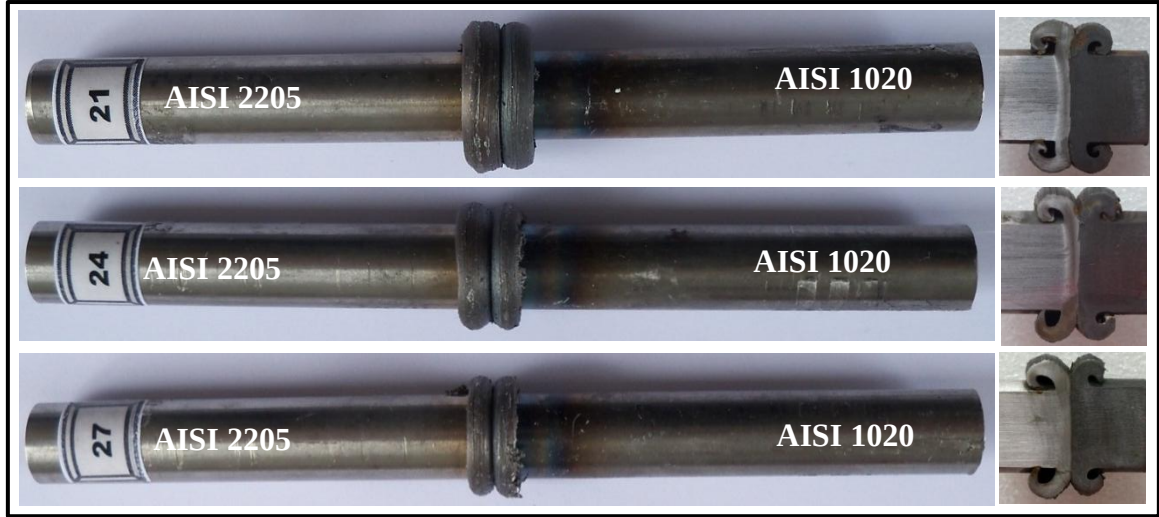
Şekil 5.11. S20, S23, S26 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

S20, S23 ve S26 no' lu kaynaklı bağlantılar üzerinde alınan boyca kısalma miktarları sırasıyla 9.83, 6.63 ve 4.20 mm olarak ölçülmüştür (Tablo 5.9). Sürtünme süresinin azalması ile dışarı taşan malzeme miktarlarında azalma meydana gelmiştir. Bu numunelere ait boyca kısaltmalar bir önceki grup ile kıyaslandığında; artan sürtünme basıncına bağlı olarak boyca kısalma miktarlarının arttığı görülmüştür. Bu durum, arayüzeyde viskoz hale gelen malzemenin dışarı atılmasında eksenel basıncın önemli bir rol oynadığı bilinmektedir.

Tablo 5.9. S20, S23, S26 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S20	1700	8	40	80	4	5,24	4,59
S23		6			3	3,96	2,67
S26		4			2	2,27	1,93

1700 dev/dk devir, 50 MPa sürtünme basıncı, üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) ile birleştirilen S21, S24, S27 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey makro fotoğrafları Şekil 5.12' de sırasıyla verilmiştir. S21, S24, S27 no' lu kaynaklı bağlantılara ait yüzey fotoğrafları incelendiğinde, daha önceki guruplara göre flanş miktarının arttığı ve flanş geometrisinde çok daha fazla kıvrımlar olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12. S21, S24, S27 no' lu numunelere ait yüzey ve arayüzey fotoğrafları

Bu gurup içinde, diğer guruplarda olduğu gibi azalan sürtünme süresi ile dışarı taşan malzeme miktarının azaldığı görülmektedir. Ancak yüksek devir sayısı kullanılarak birleştirilen bu numunelerde sürtünme süresinin azalmasına rağmen S27 no' lu numunede oluşan flanşlar her iki malzeme tarafında, literatüre uygun biçimde ve yeterli seviyede oluşmuştur. Aynı zamanda literatürde belirtildiği gibi IEB' nin azalan sürtünme süresi ile

birlikte daraldığı görülmektedir. Bu sonuç; birleştirilen malzemelere uygun seçilmiş yüksek devir ve uygun sürtünme basıncı ile minimum sürtünme sürelerinde yapılan kaynaklarda daha dar IEB ve daha az malzeme kayıpları ile kaynak işleminin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Artan sürtünme ve yığma basıncına bağlı olarak bağlantı arayüzeyinden dışarı taşan malzemenin geometrisi her üç numunede benzerlik göstermesine rağmen dışarı taşan malzeme miktarı en fazla 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S21 no' lu numunede olmuştur. Bu durum devir sayısı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncındaki artışın sıcaklığı, dolayısıyla meydana gelen plastik deformasyon miktarını arttırması ile açıklanabilir.

Bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey makroyapı fotoğrafları incelendiğinde; numune ara kesitlerinde herhangi bir boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgenin olmadığı bununla birlikte kaynak ara yüzeylerinin daha düzgün bir formda meydana geldiği görülmektedir.

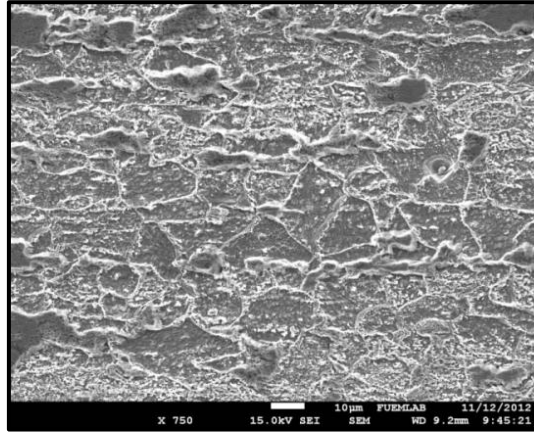
S21, S24, S27 no' lu numunelerde meydana gelen boyca kısalma miktarları Tablo 5.10' da verilmiştir. Boyca kısalma miktarı, sürtünme fazında ortaya çıkan enerji ve ısı girişindeki artış ile ilişkidir [34]. Devir sayısı ve sürtünme basıncındaki artışın ısı miktarını yükseltmesi sebebi ile diğer numunelere göre boyca kısalma miktarlarının lineer olarak arttığı görülmektedir. Bu grup içinde azalan sürtünme süresi ile boyca kısalma miktarları da azalmıştır. Bu numunelerde boyca kısalma miktarı sırasıyla 10.7, 7.03 ve 4.76 mm olarak kaydedilmiştir.

Tablo 5.10. S21, S24, S27 no' lu numunelerdeki boyca kısalma miktarları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Boyca Kısalma (mm)	
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	AISI 2205	AISI 1020
S21	1700	8	50	100	4	5,33	5,37
S24		6			3	4,25	2,78
S27		4			2	2,79	1,97

5.2. Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı Değerlendirilmesi

AISI 1020 çeliği düşük karbonlu ve düşük alaşımlı olup, yapısında yaklaşık aynı oranlarda perlit ve ferrit içeren eş yönlenmiş tanelerden meydana gelmiştir. Bu çeliğe ait mikroyapı SEM fotoğrafı Şekil 5.13' te verilmiştir.



Şekil 5.13. AISI 1020 çelik malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı

AISI 1020 çeliğinin kaynak kabiliyeti ile sertleşme eğiliminin bilinmesi, kaynak sonrası arzu edilmeyen yapıların ortaya çıkması ve oluşabilecek problemlere önlem alınması açısından önemlidir. Bu konuda uygulanabilirlik açısından, karbon eşdeğerliliğinin dikkate alınması, çeliğin kimyasal bileşiminin bilinmesi kaydıyla en etkili yoldur. Bu nedenle deneylerde kullanılan esas metalin (AISI 1020) karbon eşdeğerliği Uluslararası Kaynak Enstitüsünün IX no' lu Kaynak Komisyonunun belirlediği formüle göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$C_{eş} = C + (Mn/6) + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 \quad (5.1)$$

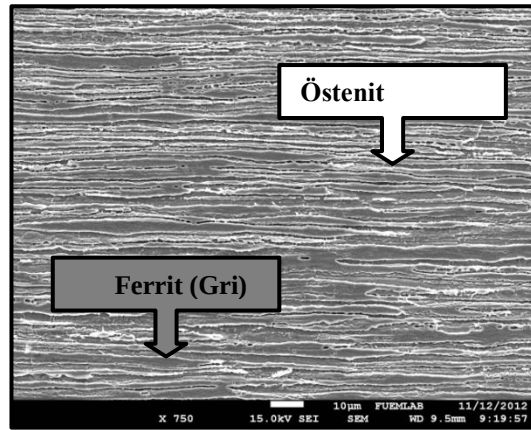
Formülde AISI 1020 çelik malzeme için değerler yerine konulursa;

$$\begin{aligned} C_{eş} (1020) &= 0.207 + 0.441/6 + (0.095+0.019)/5 + (0.078+0.1)/15 \\ &= 0.315 \text{ bulunur.} \end{aligned}$$

Bu değer ($C_{eş} < 45$) kaynaklı bağlantının AISI 1020 çelik tarafında sertleşme ve çatlama eğilimi aynı zamanda martenzit oluşma olasılığının düşük olduğunu göstermektedir. Çalık [33] AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 1060 çeliklerinin soğuma

hızlarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. AISI 1020 çeliklerinde martenzitik dönüşümün ancak suda soğutulularak % 5 oranında elde edilebileceğini bildirmiştir. Bununla birlikte bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yönteminde, bir ergimenin olmaması ve çok kısa sürelerde gerçekleştirilmesi istenilmeyen durumların ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır.

Deneylerde kullanılan AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin kaynak işlemi öncesi yüzeyden alınan SEM fotoğrafı Şekil 5.14’ te verilmiştir. Dubleks paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ferrit matris tarafından sarılan östenit tanelerinden oluşur. İçerdikleri bu iki faz nedeniyle östenitik ve ferritik çeliklerin sahip oldukları avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler [55].

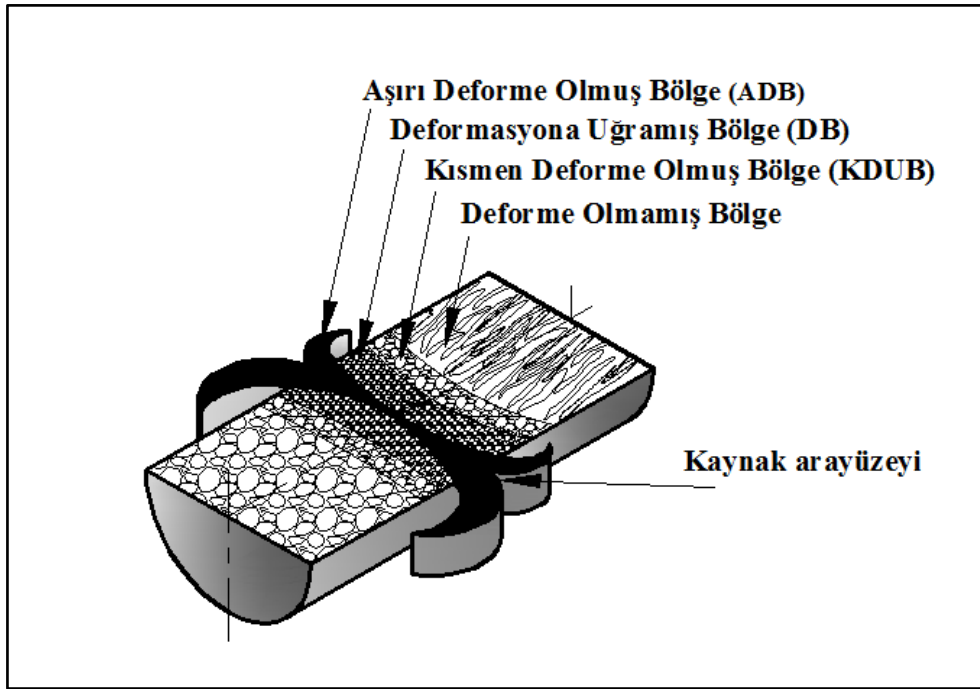


Şekil 5.14. AISI 2205 DPÇ malzeme mikroyapı SEM fotoğrafı

AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliklerin kaynak işleminde ortaya çıkan sıcaklık değişimleri, kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin içerdikleri ferrit ve östenit oranını değiştirir. Bu oranların değişmesi malzemenin mekanik özelliklerinin ve korozyon direncinin değişmesine neden olur. Kaynak yöntemi, kaynak prosedürü, kullanılan ilave metalin türü bu oranı dengeleyecek şekilde seçilmeli ve uygulanmalıdır; kaynak işlemindeki ısı çevrimleri nedeni ile meydana gelebilecek mikroyapısal değişiklikler ve çökelmeler engellenebilir [57,76]. Ancak, sürtünme kaynak yönteminde özellikle ergimenin olmaması, çok kısa zamanda tamamlanması ve hızlı soğuma nedeniyle yukarıda anlatılan metalurjik değişimler elimine edilebilmektedir [56]. DPÇ’ lerin katı hal kaynak karakteristikleri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda lokal segregasyon etkilerinin olmaması sonucunda korozyon ve mekanik özelliklerin ana

malzemeye benzer, kaynak bölgesi korozyon direncinin, ark kaynağıyla yapılan kaynaklardan daha iyi olduğu belirtilmiştir [58].

Sürtünme kaynak yönteminde, kaynak sonrası birleşme arayüzeyinde meydana gelen yapısal değişim bazı araştırmacılar tarafından üç farklı bölgeye ayırarak incelenmiştir. Bu bölgeler Şekil 5.15’ te 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 [13,34].



Şekil 5.15. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler

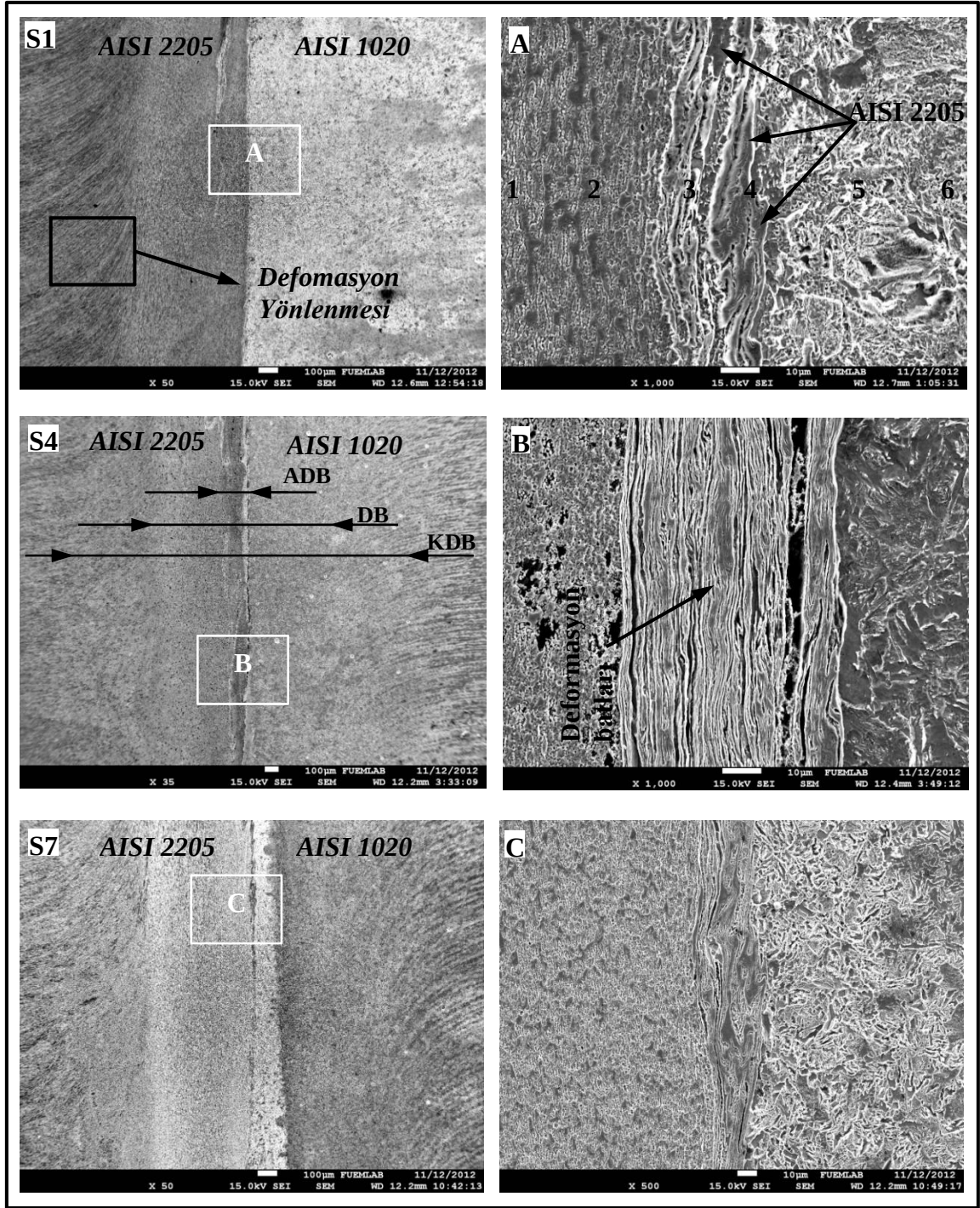
Farklı işlem parametreleri kullanılarak, sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilen AISI 2205/AISI 1020 çelik malzemelerin birleşme arayüzeyi SEM fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı bileşime sahip iki metal çifti (AISI 2205/AISI 1020) kullanılmıştır. Bu nedenle birleşme arayüzeyinin her iki tarafında farklı yapılar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla her iki metal çifti içindeki yapılar ayrı ayrı incelenmiştir.

5.2.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin SEM, EDS ve X-Ray Analizleri

1300 dev/dk, 30 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı 8, 6 ve 4 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S1, S4 ve S7 no' lu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.16' da verilmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesinin aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) ve esas metal (EM) olarak, literatürde belirtildiği gibi dört bölgeden meydana geldiği görülmektedir.

Bu kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir.

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak yapılan bu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim ve sürtünme süresinin bu yapısal değişim üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerin SEM fotoğraflarında görülen, birleşme arayüzeyinin her iki tarafında sıcaklık ve eksenel basıncın etkisi ile aşırı deformasyona uğramış bölgenin genişliği ve şeklinin sürtünme süresine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Fotoğraflardan da açıkça görüldüğü gibi arayüzey sürtünmesi ile her iki malzeme karışımından meydana gelen ve birleşme hattına dik doğrultuda yönelen bu bölgedeki düzensizlik kaynaklı bağlantıların mekanik davranışları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu N.Özdemir [2] tarafından belirtilmiştir. Kaliteli kaynaklı bağlantılar elde etmek için, başlangıç arayüzey sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandının dışarı atılması için yeterli eksenel basınç ve sürtünme fazının kullanılması gerekir [2]. 4 sn sürtünme süresi kullanılarak yapılan S7 no' lu kaynaklı bağlantı arayüzeyinde meydana gelen aşırı deformasyona uğramış bölgedeki düzensizlik açıkça görülmektedir. Düşük sürtünme süresi kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda bu düzensizliğin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu durum, yeterli seviyede viskoz hale gelmemiş, arayüzeydeki malzemenin dışarı ekstrüze edilmesi için gerekli sürenin kullanılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Sürtünme süresinin uzun seçilmesi durumunda, arayüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresi artmaktadır. Böylece, eksenel basıncın arayüzey malzemesinin dışarı atılmasında daha etkin olacağı ve daha fazla miktarda malzeme taşınımının sağlanacağı bilinmektedir. Bu nedenle yüksek sürtünme süresinin kullanıldığı S1 no' lu numunede ADB, S4 no' lu numuneye göre daha dar olmuştur.



Şekil 5.16. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri

Düşük eksenel basınç (30 MPa), yüksek sürtünme süresi (8 sn) kullanılarak birleştirilen S1 no' lu kaynaklı bağlantı arayüzeyinde birleşme hattına dik yönelmiş tanelerden oluşan ve ADB' ne bitişik, DB' de meydana gelen yapısal değişim artan sürtünme süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Artan sürtünme süresine bağlı olarak ısının tesiri altındaki bölgenin genişlediği, bunun sonucunda eksenel basıncın

dövme etkisinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu bölgede malzemenin dışarı taşma rejimi ve deformasyona uğramış bölgenin genişliğindeki artış açıkça gözlemlenmektedir. Birleşme arayüzeyinden ana malzemeye doğru gidildikçe sıcaklık ve dövmenin etkisi ile her iki malzemede tanelerin küçüldüğü ve numune eksenine dik doğrultuda yönlenmenin arttığı görülmektedir.

1300 dev/dk sabit devir sayısı kullanılarak, sürtünme basıncının 10 MPa artırılması ile birleştirilen S2, S5 ve S8 no' lu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde ortaya çıkan yapısal değişimi gösteren SEM fotoğrafları Şekil 5.17' de verilmiştir. Kaynaklı bağlantıların tamamında birleşme bölgesinde bağlantıyı olumsuz etkileyecek çatlak ve boşluk olmadığı görülmektedir.

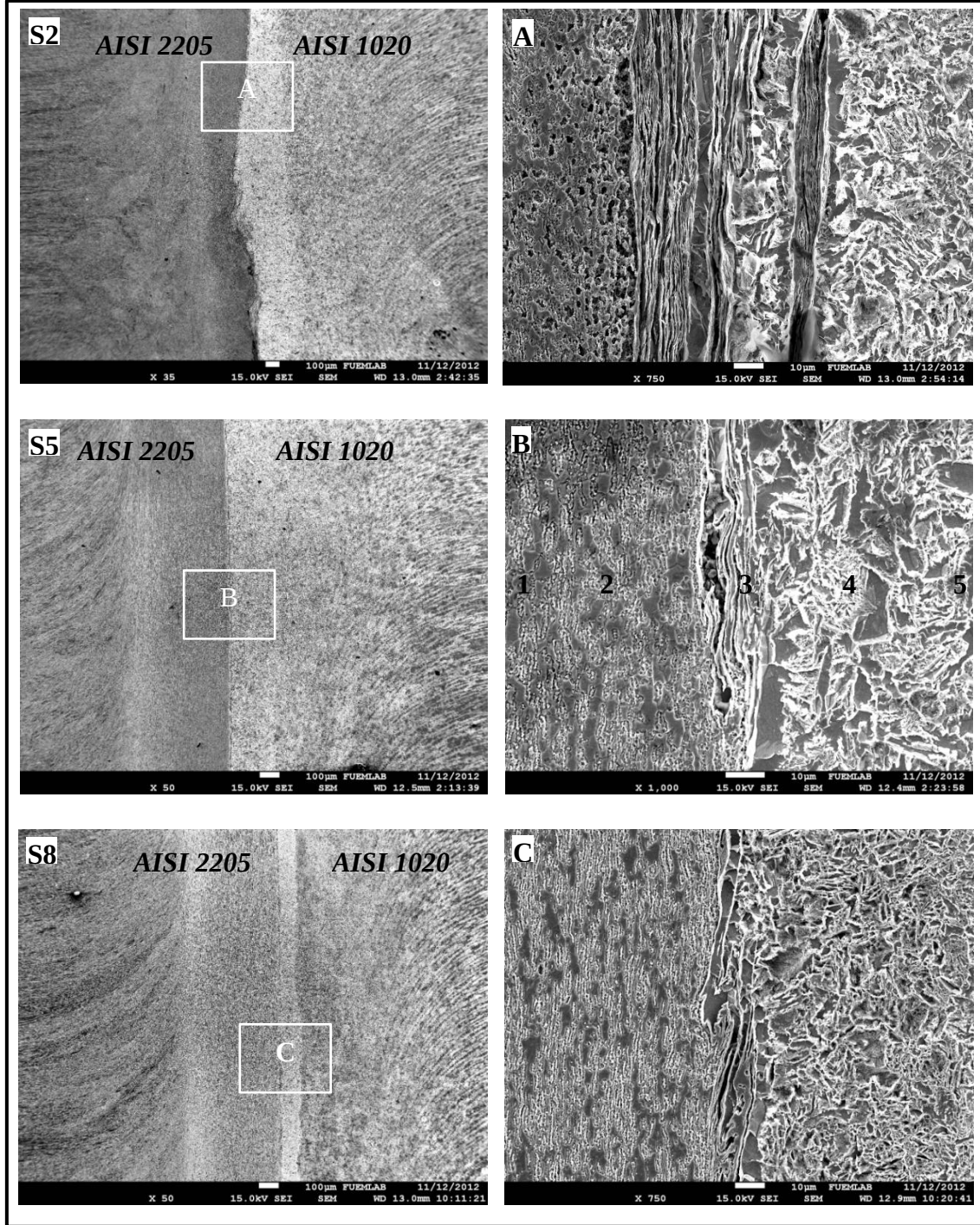
Her üç numunede; AISI 2205 ve AISI 1020 malzeme çiftlerinde kaynaklı bağlantının her iki tarafında meydana gelen deformasyon çizgileri net olarak görülmektedir. Kaynak arayüzeyinin her iki tarafında termomekanik olarak etkilenen bölgede tane küçülmesi ve tanelerin numune eksenine dik doğrultuda uzayarak yönlendiği SEM fotoğraflarında açıkça görülmektedir. Her üç numunenin birleşme bölgesinde çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgenin olmadığı görülmektedir.

Kaynak arayüzeyindeki birleşme bölgesinde meydana gelen ADB' nin sürtünme süresine paralel olarak değiştiği artan sürtünme süresi ile birlikte arttığı, sürenin azalması ile azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni; artan sürtünme süresi ile bağlantı arayüzey sıcaklığının artmış olmasıdır.

S2 no' lu numunede sürtünme süresinin yüksek olması (8 sn) nedeni ile bağlantı arayüzeyinde oluşan viskoz haldeki malzeme miktarı diğer numunelere göre artmaktadır. Arayüzeyde viskoz haldeki bu malzeme, artan sürtünme basıncı ile dışarı doğru yönlendirilmiş ve kayma bantlarının daha düzgün bir yapıda oluşması sağlamıştır. Bu durum kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri olan ADB' nin düzenli bir yapıda oluşabilmesi için sürtünme basınç kuvvetinin sürtünme süresi ile birbirine uygun olarak seçilmesi zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Çünkü S5 ve S8 no' lu numunelerde arayüzeyde viskoz hale gelen malzemenin dışarı ekstrüze edilebilmesi için yeterli süre sağlanamamış ve arayüzeydeki ADB' nin daha düzensiz bir yapıda olmasına neden olmuştur.

Her üç numunede aşırı deformasyona uğramış bölgelerin bitişiğinde termodinamik olarak deformasyona uğramış bölgenin varlığı mevcuttur. Bu bölgenin genişliği artan sürtünme süresine bağlı olarak artış göstermektedir. Deformasyona uğramış bölge AISI

2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında daha net ve geniş görülmektedir. Bu farklılık, AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının düşük, arayüzeyin sıcaklığın tesirinde kalma süresinin yüksek olması ve aynı zamanda etkili olan eksenel basıncın meydana getirdiği şiddetli deformasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.



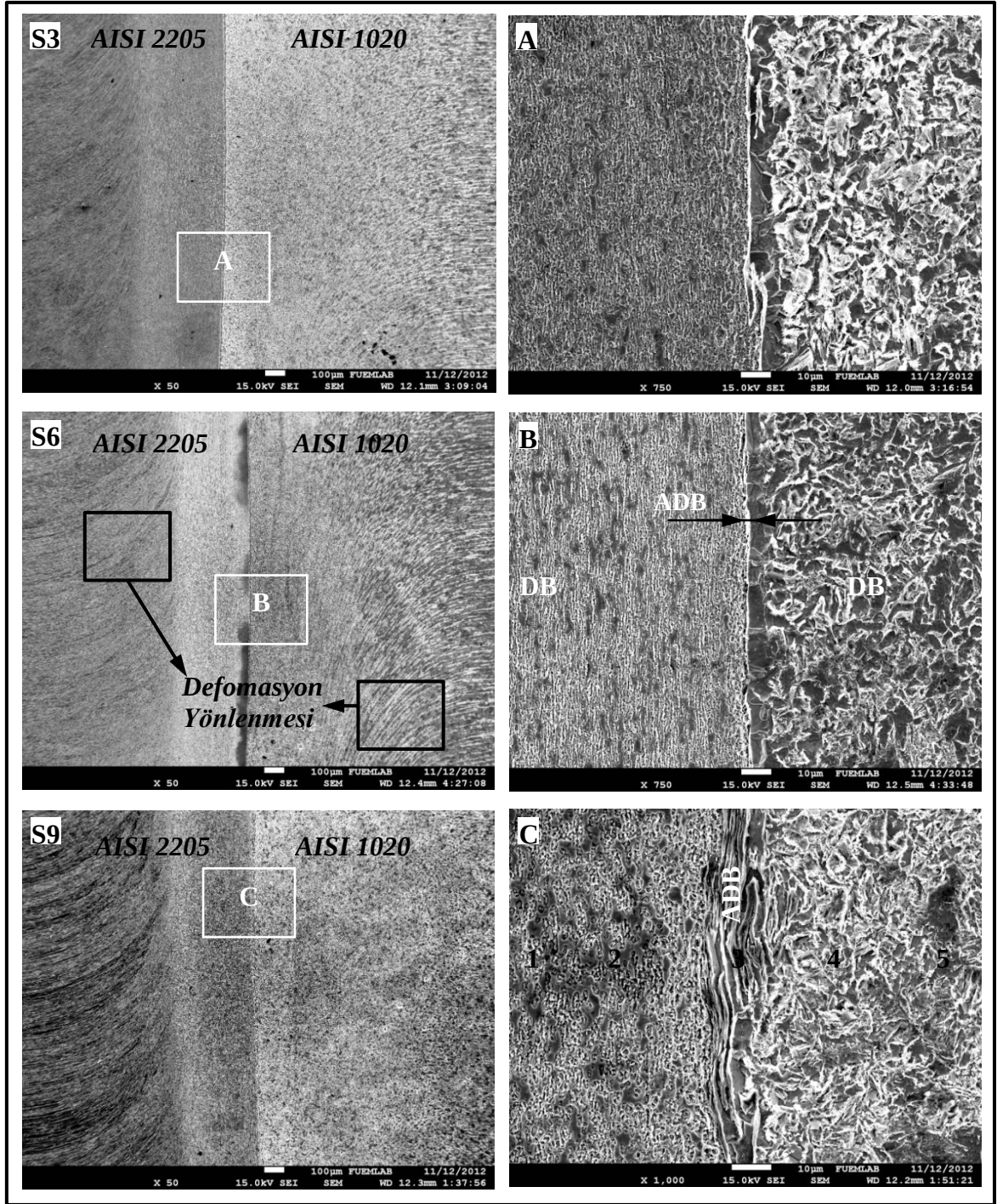
Şekil 5.17. S2, S5 ve S8 no' lu numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri

Artan sürtünme süresine bağlı olarak arayüzeyin sıcaklık etkisi altında kalma süresi artmaktadır. Bunun sonucu olarak eksenel basıncın etkisi ile arayüzeyde yeterli sıcaklığa ulaşmış ve viskoz hale gelen malzemenin dışarı taşma eğilimi daha fazla olmaktadır. Ancak, sürtünme süresinin düşük olması viskoz haldeki malzemenin düzensüz yapıda olmasına neden olmaktadır. 4 sn kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantıda arayüzey sürtünmesi ile oluşan karışım bandının şekli ve düzensizliği bu kaynaklı bağlantıya ait fotoğraftan da açıkça görülmektedir. Bu düzensizlik kaynaklı bağlantının mekanik davranışı üzerinde önemli olumsuz etkilere sebep olduğu daha önce yapılan bilimsel çalışmalarda bildirilmiştir ve uygulamış olduğumuz mekanik test sonuçları ile doğruluğu gösterilmiştir.

Bir önceki grupla kıyaslandığında artan sürtünme basıncı ile birlikte viskoz hale gelen malzemenin dışarı taşma eğiliminin arttığı bu nedenle ADB’ de kayma bantlarının bir önceki guruba göre daha fazla ve daha düzgün yapıda meydana geldiği görülmektedir. Ancak, S8 no’ lu numunede sürtünme süresinin ve buna bağlı yığılma sürenin az olması arayüzeyde viskoz hale gelen malzemenin dışarı yönlendirilebilmesi için yeterli olmadığı görülmektedir.

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak, sürtünme basıncının 10 MPa arttırılması ile birleştirilen S3, S6 ve S9 no’ lu numunelerin birleşme bölgesinde ortaya çıkan yapısal değişiklikleri gösteren SEM fotoğrafları Şekil 5.18’ de verilmiştir. Kaynaklı bağlantıların tamamında birleşme bölgesinde bağlantı kalitesini olumsuz olarak etkileyecek çatlak, boşluk ve bağlantısız bölge bulunmamaktadır. Şekil 5.18’ de verilen mikroyapı SEM fotoğrafları incelendiğinde; her üç numunede belirgin deformasyon yönlenmelerinin olduğu açıkça görülmektedir.

Artan sürtünme basıncına bağlı olarak ADB’ nin daraldığı ve bu bölgede tanelerin küçüldüğü bilinmektedir [72]. ADB’ deki daralma sürtünme basıncının etkisi ile viskoz haldeki malzemenin dışarı atılması ile açıklanırken tanelerdeki küçülme ise sürtünme ile oluşan sıcaklığın plastik deformasyon etkisini arttırması ile açıklanmaktadır.



Şekil 5.18. S3, S6 ve S9 no' lu numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri

S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait arayüzey mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, ve daha önce düşük sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen numunelerle kıyaslandığında ADB' nin daraldığı görülmüştür. Ayrıca, Çelik ve Ersözlu [21] IEB' nin genişliği üzerinde en etkin parametrelerin sürtünme süresi ve sürtünme basıncı olduğunu belirtmişlerdir. Bu numunelerde ADB' nin daralması arayüzeydeki malzemenin dışarı

atılması ve sıcaklığın dışarı atılan malzeme üzerinden uzaklaştırılmasını sağlamıştır. Bu nedenle S3, S6 ve S9 no' lu numunelerde IEB' nin düşük basınç altında yapılan diğer numunelere göre daraldığı belirlenmiştir. Ancak mikroyapı SEM fotoğrafları kendi aralarında değerlendirildiğinde S3 ve S6 no' lu numunelerde artan basıncın etkisi ile viskoz hale gelen malzeme dışarı atılırken düşük sürtünme süresinin kullanıldığı S9 no' lu numunede yüksek sürtünme basıncı ve düşük devir sayısı nedeni ile yeterli viskoziteye ulaşamayan ve dışarı atılamayan malzeme ADB' nin daha da genişlemesine neden olmuştur. Söz konusu durum bir önceki grupta bulunan numunelerde de meydana gelmiştir.

Eksenel basıncın yüksek olması, malzemede fazla deformasyon oluşturur ve bu aşırı yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan inklüzyonlar arzu edilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler. Bu durum kaynaklı bağlantının kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz olarak etkiler. Düşük olması ise elverişsiz şekillendirmeye dolayısıyla yüzeyler arasında tam bir bağlantının sağlanamamasına sebep olur [2,38]. Düşük devir sayıları ile yapılan kaynaklı bağlantılarda sürtünme süresinin azalması buna karşın sürtünme basıncının artması ADB bölgesinin düzensiz aynı zamanda geniş olmasına bu nedenle malzemelerin yorulma dayanımlarının düşmesine neden olmaktadır. Bu etkinin S9 no' lu numunenin yorulma dayanımının, ana malzeme AISI 1020 çeliğinin yorulma dayanımının altına düşmesine neden olduğu daha sonraki bölümde yapılan yorulma test sonuçlarında görülmektedir.

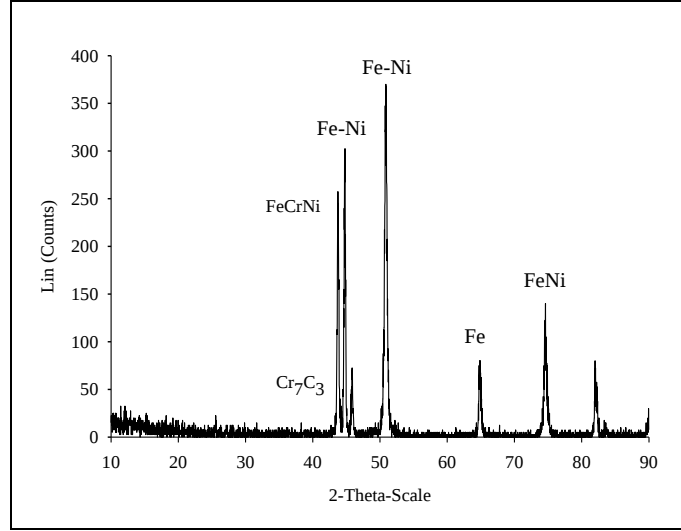
1300 dev/dk devir ile yapılan kaynaklı bağlantılarda deforme olmuş bölgenin AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında daha fazla olduğu görülmektedir. Boyca kısılma miktarları incelendiğinde, AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında boyca kısılma miktarının daha fazla olması bu sonucu doğrulamaktadır.

S1, S5 ve S9 no' lu kaynaklı bağlantılara ait EDS analiz sonuçları Tablo 5.11' de gösterilmiştir. Tablo 5.11 incelendiğinde, dövme ve basınç etkisi ile birleştirilen malzemelerin birbirleri içerisinde gelişi güzel olarak karışıkları bölgenin (ADB), AISI 1020 malzeme ve AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemelerin karışımından meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte AISI 1020 çelik tarafından AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafına karbon elementinin geçtiği AISI 2205 dubleks paslanmaz çelikten AISI 1020 çeliğe doğru da krom elementinin geçtiği görülmektedir.

Tablo 5.11. S1, S5 ve S9 no' lu numunelere ait EDS sonuçları

Numune No	Analiz Bölgeleri	Elementer (% Ağırlık)						
		C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
S1	1. Bölge	2,82	0,34	22,05	1,56	65,40	4,30	3,54
	2. Bölge	2,39	0,38	22,48	1,76	64,91	4,42	3,67
	3. Bölge	2,31		2,42	0,59	94,68		
	4. Bölge	2,82		1,41	0,70	92,96		
	5. Bölge	4,62		0,55		92,89		
	6. Bölge	5,09		0,53		94,39		
S5	1. Bölge	3,63	0,33	21,65	1,86	64,47	4,59	3,47
	2. Bölge	3,25	0,40	22,02	1,69	64,91	4,44	3,28
	3. Bölge	10,80		1,89		87,31		
	4. Bölge	7,00		0,65	0,56	90,26		
	5. Bölge	7,12		0,45	0,52	91,92		
S9	1. Bölge	4,74	0,28	21,37	1,88	63,83	4,67	3,23
	2. Bölge	4,46		21,83	1,68	64,28	4,44	3,31
	3. Bölge	6,67		4,43	0,68	87,51	0,72	
	4. Bölge	12,72		0,59	0,58	81,52		
	5. Bölge	9,28		0,44	0,75	89,54		

S1, S5 ve S9 no' lu numuneler, EDS analizi açısından incelendiğinde, kısmen dönüşüme uğrayan bölgedeki yaklaşık 60 μm ' lik mesafede AISI 1020 çelik tarafında krom ve mangan miktarının yükseldiği bununla birlikte AISI 1020 çelik tarafından AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafına beklendiği gibi karbon elementi geçişinin meydana geldiği görülmektedir. S9 no' lu numunede, her iki malzeme tarafında meydana gelen element geçişlerinin S1 ve S5 no' lu numunelere göre daha fazla olduğu Tablo 5.11' de görülmektedir. Bu durum sabit devir sayısı altında artan sürtünme basıncının sıcaklık değerlerini daha fazla yükselterek, arayüzeyin sıcaklık etkisi altında kalma derecesini arttırması sonucunda meydana gelmiştir. S1 no' lu numunenin birleşme ara bölgesinde oluşan fazları ve bileşikleri tespit etmek amacıyla yapılan X - Işını analiz grafiği Şekil 5.19' da verilmiştir. S1 no' lu numude oluşan faz ve bileşiklerin yoğunlukları ise Tablo 5.12' te gösterilmiştir. X-Işını analiz grafiği incelendiğinde, kaynaklı bağlantı mukavemet değerlerini olumsuz olarak etkileyebilecek faz ve bileşik miktarının çok düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19. S1 no'lu numunenin X-Işını analiz grafiği

Tablo 5.12. S1 no' lu numunenin X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar

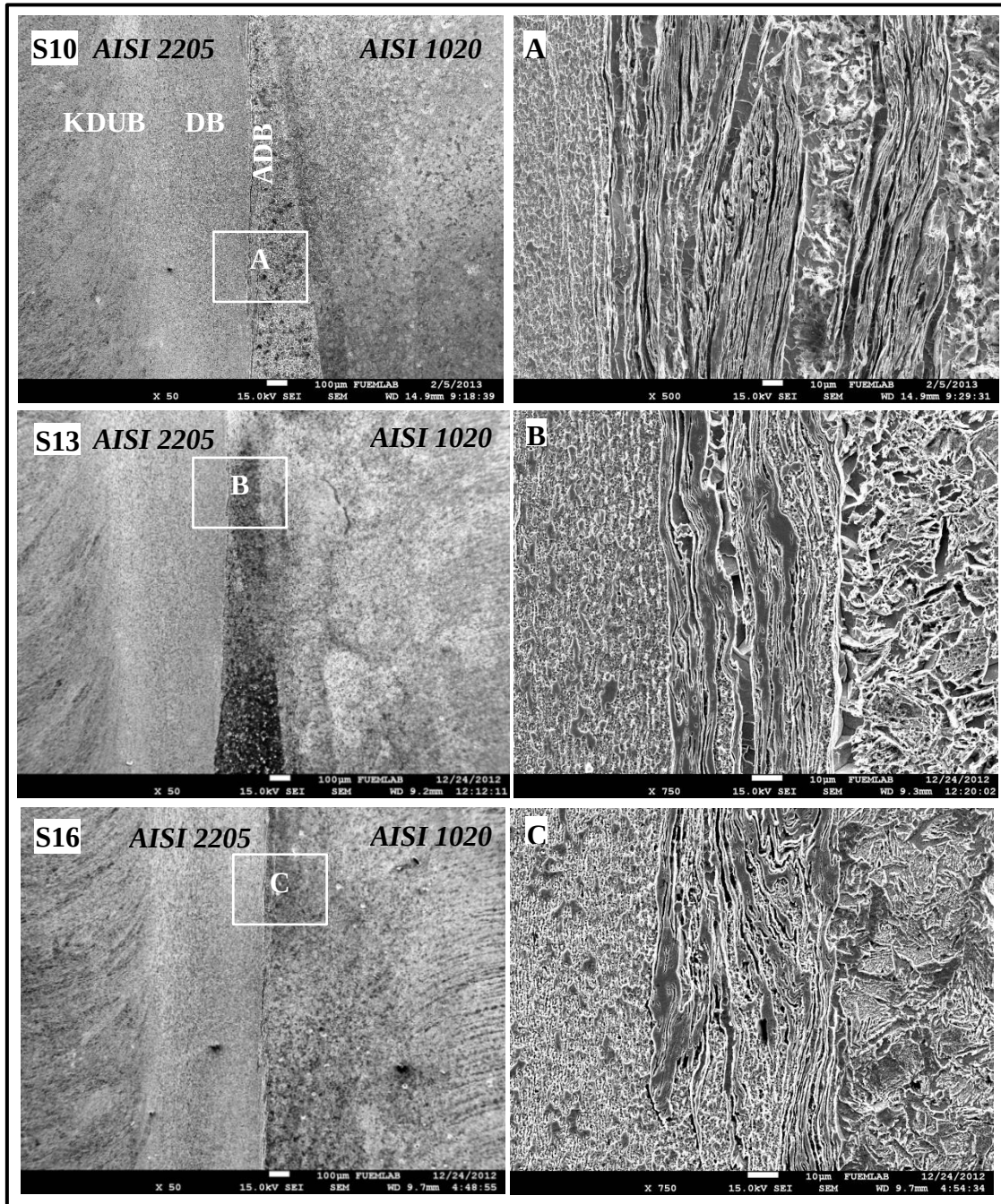
X-Ray Değerleri		
2 Theta (°)	Lin (Counts)	Faz
43,684	254,361	FeCrNi
44,708	296,698	FeNi
74,848	137,849	FeNi

5.2.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin SEM ve X-Ray Analizleri

1500 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S10, S13 ve S16 no' lu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde ortaya çıkan yapısal değişiklikler Şekil 5.20' de, SEM fotoğrafları ile gösterilmektedir.

Sürtünme kaynaklı bağlantılarda ADB' nin özelliği tanelerin aşırı derecede dövülmüş ve haddeleme yönüne göre yön değiştirmiş olmasıdır. Malzemelerin birbirlerine zoraki karışma bölgesi denilebilecek bu bölgede, malzeme türlerine bağlı olarak her iki malzemenin iç içe geçtikleri ve yön değiştirdikleri görülmektedir (Şekil 5.20). S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait SEM fotoğrafları incelendiğinde; temelde literatürde belirtilen bölgeler benzerlik göstermesine rağmen en önemli değişimin ADB ve DB' de meydana geldiği görülmektedir. Artan devir sayısı ve sürtünme süresine bağlı olarak ADB ve DB' de genişleme kaydedilmiştir. Devir sayısının bu bölgelerde meydana gelen yapısal değişim üzerine etkili olduğu bilinmektedir. Artan devir sayısına bağlı olarak birleşme

arayüzeyinde etkin bir plastik deformasyon için gerekli olan sıcaklığa ulaşma süresi daha azalacaktır. Sürtünme süresinin kademeli artışı ile birlikte arayüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresini arttırması sonucu ekstrüzyon derecesinin artacağı ve bununla birlikte birleşme bölgesinde termo-mekanik etki aşırı dövülmüş ve yönelmiş tanelerden oluşan bir yapıyı ortaya çıkarır. Söz konusu durum özellikle yüksek sürtünme süreleri kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılarda daha belirgindir (Şekil 5.20).



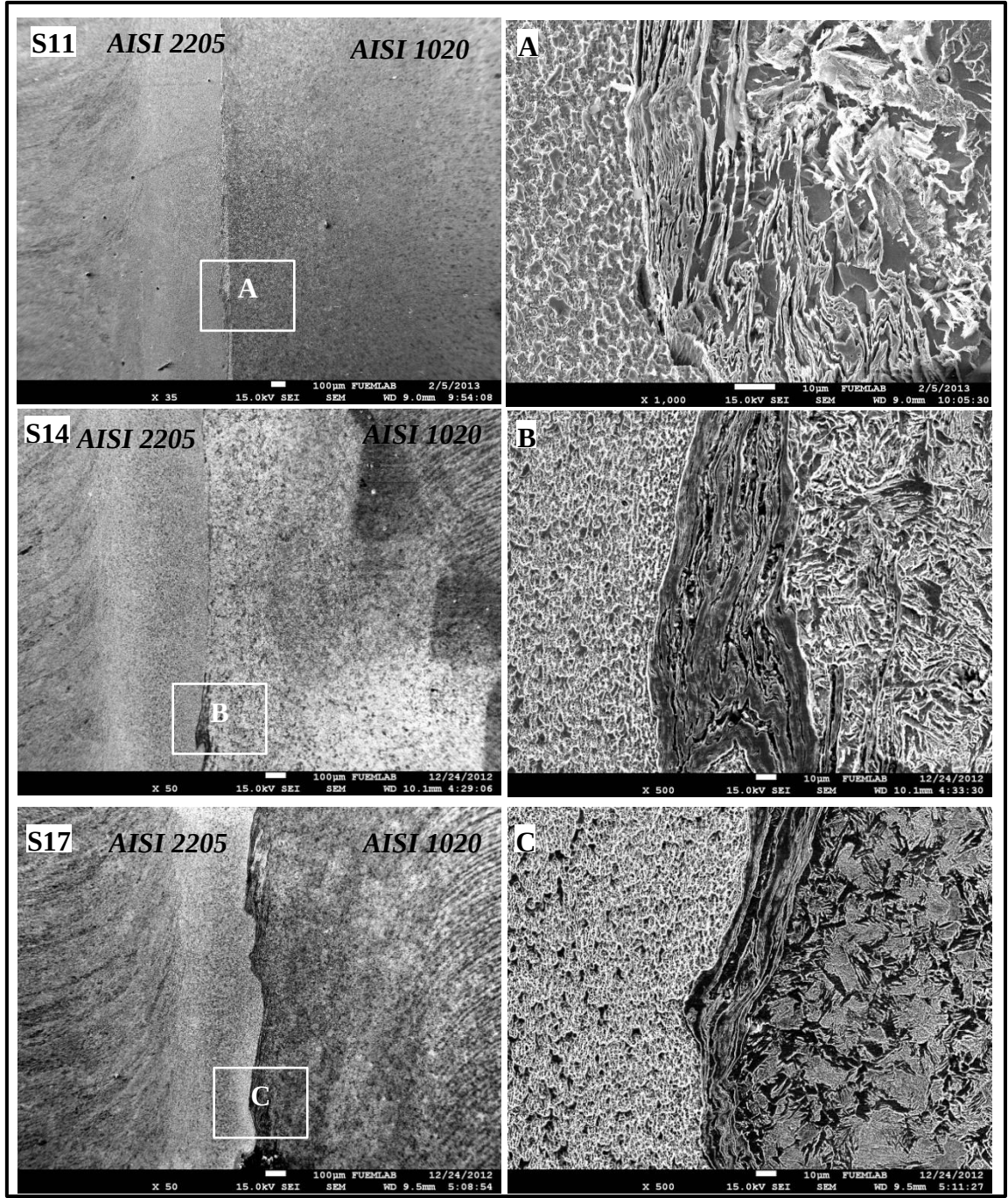
Şekil 5.20. S10, S13 ve S16 no' lu numunelerinin arayüzeyden alınan SEM görüntüleri

Farklı sürtünme süreleri (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S10, S13 ve S16 no' lu kaynaklı bağlantıların KDUB' lerinde meydana gelen yapısal değişimin en fazla AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında belirgin olarak meydana geldiği görülmektedir. Bu değişim, eksenel basıncın etkisiyle birleşme arayüzeyine dik doğrultuda yönelmiş yapı olarak görülmektedir.

1500 dev/dk devir sayısı ve sürtünme basıncının bir önceki gruba göre 10 MPa arttırılması ile birleştirilen S11, S14 ve S17 no' lu kaynaklı numunelerin SEM fotoğrafları, Şekil 5.21' de verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde, her üç numunede de çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgenin olmadığı görülmektedir.

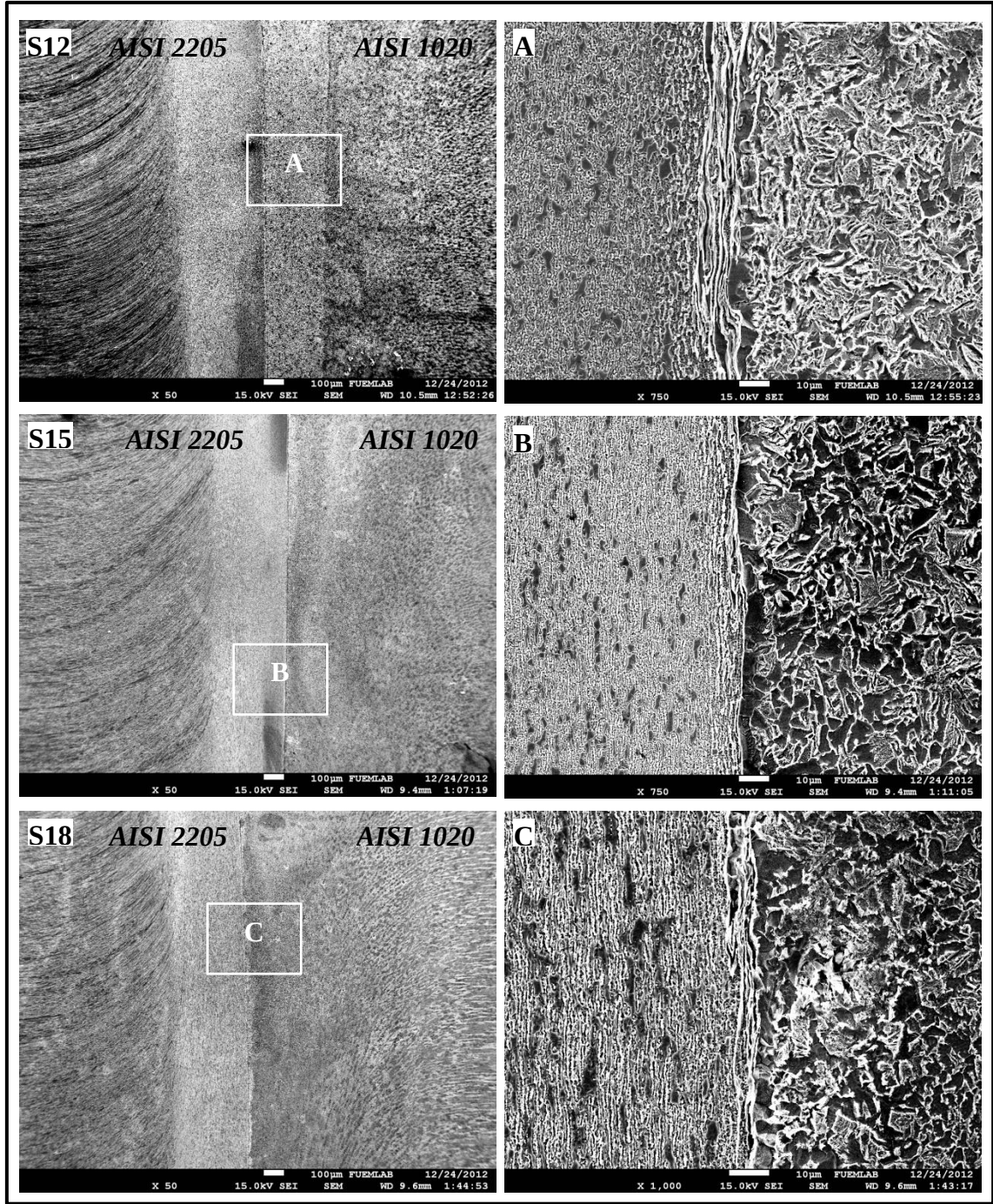
S11, S14 ve S17 no' lu numunelerde sürtünme süresinin azalmasına bağlı olarak ADB' nin daraldığı ve bu bölgenin azalan sürtünme süresi ile birlikte daha düzenli bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Azalan sürtünme süresi ile kayma bantlarının karışım bölgesinde daha dar bir alanda birbirine paralel düzgün bir yapıda meydana gelmiş olmalarına rağmen, sürtünme süresi 4 sn olan S17 no' lu numunede ADB' deki çizgisel bağlantı hattının girinti ve çıkıntılar meydana getirdiği, sürtünme süresi daha yüksek kullanılarak birleştirilen diğer S11 ve S17 no' lu numunelerde ise kaynak arayüzeyindeki bağlantı hattının daha düz bir şekilde meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun, düşük sürtünme süreleri kullanıldığında, viskoz hale gelen malzemenin dışarı atılabilmesi için yeterli sürenin olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Eksenel basınçtaki artışa bağlı olarak, artan sıcaklık nedeni ile malzemelerin kaynak arayüzeyinden aktığı ve yön değiştirdiği görülmektedir. Malzemelerin plastik deformasyon yeteneğine bağlı olarak eksenel basıncın etkisiyle aşırı deformasyondan dolayı meydana gelen kayma bantları Şekil 5.21' de belirgin bir biçimde görülmektedir. Kaynak arayüzeyine yakın, deformasyonun etkili olduğu bölgeden uzaklaştıkça bu kayma bantlarının yoğunluğu azalmaktadır. Kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde ise basınç etkisi ile oluşan deformasyonun, kaynak arayüzeyine paralel doğrultuda yönelmiş küçük taneli bir yapı meydana getirdiği görülmektedir. ADB' nin iki tarafındaki bu bölgeler kaynak arayüzeyinden ana metale doğru gidildikçe azalmıştır. Küçük taneli bu yapının genişliğinin her iki ana malzeme tarafında plastik şekil değiştirme yeteneklerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Aynı zamanda ince taneli bu yapıda, tanelerin küçülme miktarında sürtünme süresine bağlı olarak değiştiği artan sürtünme süresinin sıcaklığı arttırması ve plastik deformasyonun daha etkili olmasına neden olduğu için sürtünme süresindeki artış ile birlikte taneler daha fazla küçülmüşlerdir.



Şekil 5.21. S11, S14 ve S17 no' lu numunelerinin arayüzeyden alınan SEM görüntüleri

Sürtünme basıncının 50 MPa' a çıkartılması ile birleştirilen S12, S15 ve S18 no' lu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinden alınan SEM fotoğrafları Şekil 5.22' de gösterilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde, kaynaklı bağlantıların arayüzeyinde kaynak kalitesini olumsuz olarak etkileyecek çatlak ve boşluğun meydana gelmediği görülmektedir.



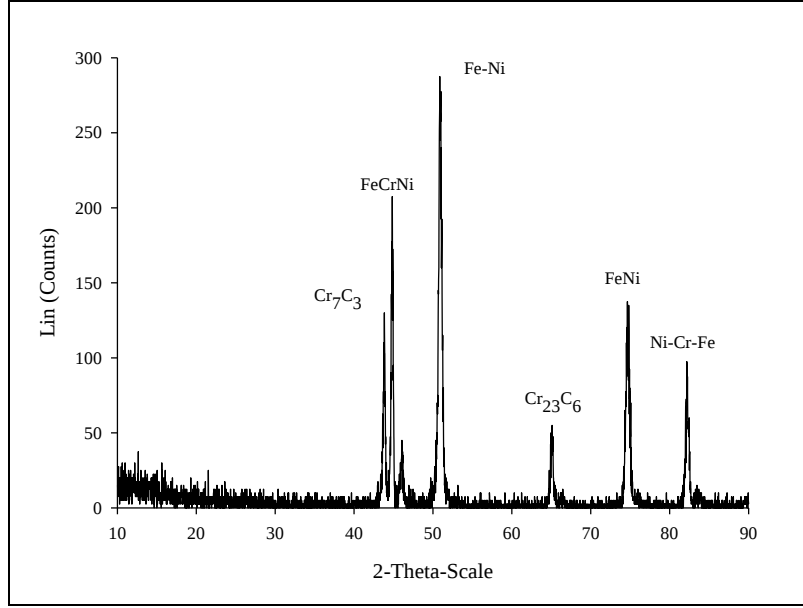
Şekil 5.22. S12, S15 ve S18 no' lu numunelerinin arayüzeyden alınan SEM görüntüleri

S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait SEM fotoğrafları incelendiğinde, azalan sürtünme süresi ile birlikte ADB' nin daraldığı görülmektedir. Bununla birlikte kayma bantlarının sürtünme basıncının (40 MPa) daha az olduğu bir önceki grupta bulunan S11, S14 ve S17 no' lu numunelere göre daha düzgün bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun dışarı taşan malzemenin artan aksenal basınca bağlı olarak taşma eğiliminin artması ve daha düzgün bir akış göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sıcaklık ve basıncın etkisi ile deformasyon yönlenmelerinin numune eksenine dik doğrultuda olduğu ve bu numunelerin kaynak arayüzeylerinin her iki tarafında DB' de dövülmüş ince taneli bir yapının meydana geldiği görülmektedir. DB' deki tane küçülme miktarının ve oranının azalan sürtünme süresine bağlı olarak azaldığı belirgin bir şekilde farkedilmektedir. Bir önceki gurupla kıyaslandığında ise, bu yapının genişliğinin ve yapıdaki küçülme miktarının sürtünme basıncındaki artışa bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Düşük çevresel hızların arayüzeyde yetersiz bir ısınmaya dolayısıyla üniform olmayan yığmaya neden olduğu literatürde bildirilmektedir [2,4]. Bu kaynaklı bağlantılara ait arayüzey mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde de ADB' deki kayma bantlarının 1300 dev/dk ile birleştirilen numunelere göre daha düzenli bir yapıda meydana geldikleri görülmektedir. Bununla birlikte sürtünme kaynaklı bağlantılarda bağlantı kalitesini doğrudan etkilediği literatürde belirtilen, ADB' nin genişliğinin istenilen sınırlar içinde kalması ve düzgün bir yapıda olması için devir sayısı ile birlikte sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin birbirine uygun olarak seçilmesi gerektiği Şekil 5.16-22 no' lu SEM fotoğrafları incelenerek tespit edilmiştir. ADB' deki düzensiz yapının boyutlarındaki ve düzensizliğindeki artışın bağlantı kalitesini olumsuz bir şekilde etkilediği bu çalışma kapsamında yapılan mekanik testlerle de belirlenmiştir.

S12 no' lu numunenin birleşme ara bölgesinde oluşan fazları ve bileşikleri tespit etmek amacıyla yapılan X - Işını analiz grafikleri Şekil 5.23' de, oluşan faz ve bileşiklerin miktarı ise Tablo 5.13' te görülmektedir. X ışını analizi sonucunda $Cr_{23}C_6$ ve Cr_7C_3 bileşikleri saptanmıştır. Bu bileşiklerin sigma fazı ile aynı olumsuz etkilere sahip olduğu ve malzemede gevrekliğe sebebiyet verdiği bilinmektedir [52].



Şekil 5.23. S12 no'lu numunenin X - Işını analiz grafiği

Tablo 5.13. S12 no' lu numunenin X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar

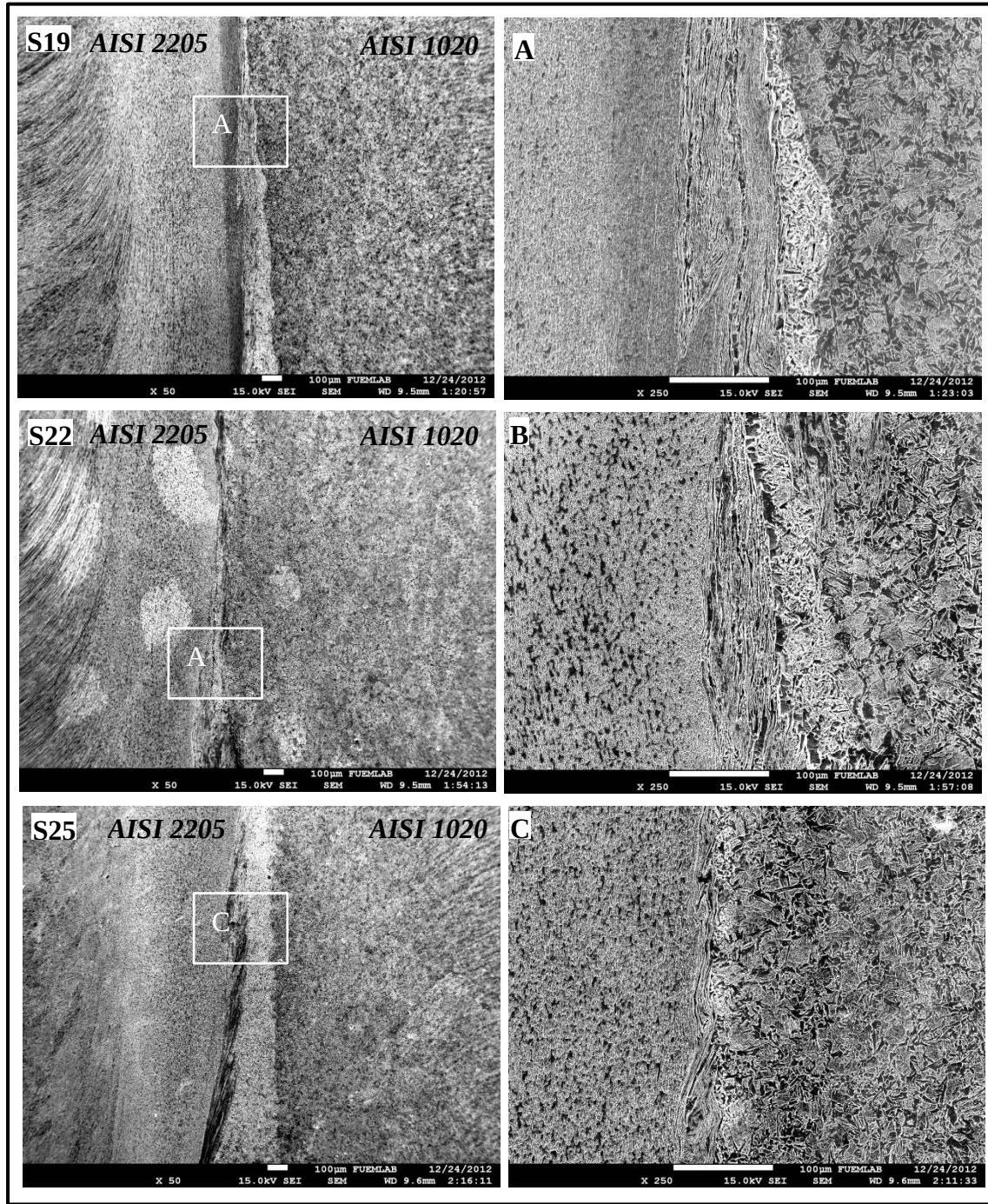
X-Ray Değerleri		
2 Theta (°)	Yoğunluk (I/I ₁)	Faz
44,025	126,334	Cr ₇ C ₃
45,212	203,98	FeCrNi
65,192	54,022	Cr ₂₃ C ₆

5.2.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin SEM ve X-Ray Analizleri

1700 dev/dk devir sayısı ve 30 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen S19, S22 ve S25 no' lu numunelerin kaynak sonrası birleşme arayüzeyinden alınan mikroyapı SEM fotoğrafları Şekil 5.24' da verilmiştir. Birleşme ara yüzeyindeki yapısal değişiklikler ve kusurların tespit edildiği bu fotoğraflar incelendiğinde; kaynak arayüzeyinde çatlak, boşluk ve bağlantısız bölge görülmemektedir. Her iki malzemenin ADB bölgesinde kayma bantları açıkça görülürken DB, ve KDUB' lerinde tanelerin plastik deformasyonun etkisi ile yönlendikleri görülmektedir.

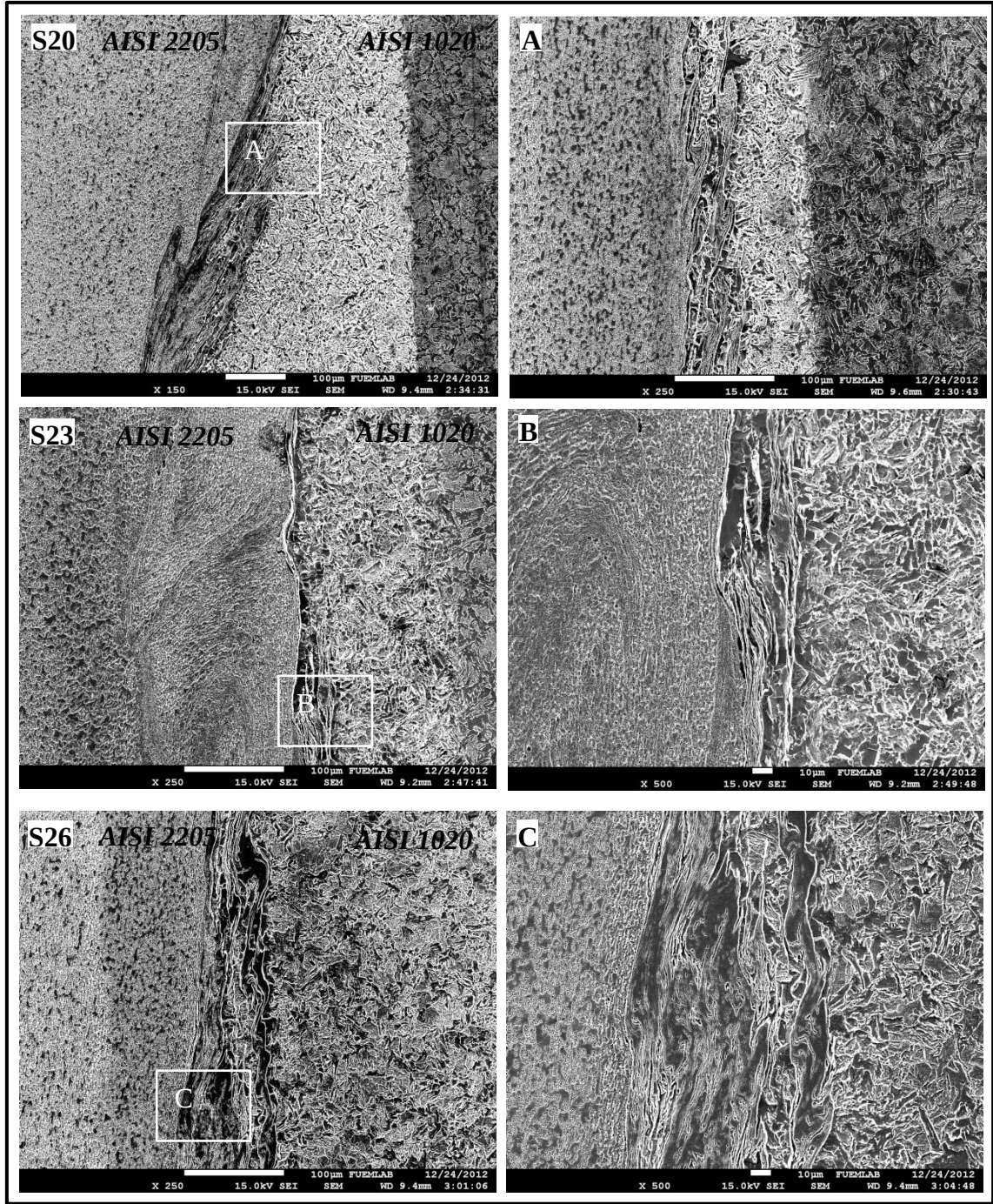
Her üç numunenin kaynak arayüzeyinde iki malzemenin karışımından ve farklı fazlardan oluşan heterojen bir yapıdaki ADB görülmektedir. ADB' nin artan sürtünme süresi ile arttığı tespit edilmiştir. Her üç numunenin ADB' de düzensizlikler görülmekte olup bu düzensiz yapının sürtünme süresindeki azalmaya bağlı olarak azaldığı tespit

edilmiştir. ADB’ deki düzensizliklerin sebebinin düşük sürtünme ve yığma basınçları nedeni ile meydana geldiği bilinmektedir. Bununla birlikte ADB’ nin 1300 ve 1500 dev/dk ile birleştirilen diğer numunelere göre daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, artan devir sayısına bağlı olarak arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesinin yükselmesi sonucu arayüzey malzemesi daha viskoz hale gelmesi, ancak düşük eksenel basınç nedeni ile bu malzemenin yeterince dışarı atılmamasından kaynaklanmaktadır. Fotoğraflarda, her iki malzemenin karışımından oluşan aşırı deformasyona uğramış bölgenin (ADB) her iki tarafında eksenel basıncın etkisiyle dövülen taneler görülmektedir. ADB’ nin bitişiğinde, termo-mekanik etkiye bağlı olarak tane boyutlarının önemli oranda küçüldüğü DB net olarak görülmektedir. DB’nin genişliği ADB’ de olduğu gibi sürtünme süresine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bölge içindeki tanelerin ADB’ yakın kısımlarda daha küçük, ana malzemeye doğru gidildikçe büyüdüğü görülmektedir. Bu ise bir sonraki bölümde gösterilen mikrosertlik grafiklerinde kaynak arayüzeyine yakın bölgelerdeki sertlik artışının nedenini açıklamaktadır. DB’ si 1300 ve 1500 dev/dk devir ile birleştirilen diğer numunelerle kıyaslandığında ise artan devir sayısı ile birlikte genişlediği aynı zamanda ADB’ ne yakın kısımlardaki tanelerin çok daha fazla küçüldüğü görülmektedir. Bu durum devir sayısının artmasına bağlı olarak kaynak arayüzeyindeki sıcaklığın hızla yükselmesinden ve sıcaklık artışının, eksenel basıncın etkisi ile meydana gelen plastik şekil değiştirme mekanizmalarının taneler üzerindeki etkisini arttırmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.24. S19, S22 ve S25 no' lu numunelerinden alınan SEM görüntüleri

Sürtünme basıncının 40 MPa' a çıkartılması ile birleştirilen S20, S23 ve S26 no' lu numunelerin birleşme bölgelerine ait SEM fotoğrafları, Şekil 5.25' te gösterilmiştir. Her üç numune arayüzeyinde bağlantı kalitesini olumsuz etkileyebilecek çatlak boşluk ve bağlantısız bölge bulunmamaktadır.



Şekil 5.25. S20, S23 ve S26 no' lu numunelerinden alınan SEM görüntüleri

Bu kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak ADB, DB ve KDUB' inde meydana gelen yapısal değişiklikler net olarak görülmektedir. Bu değişim üzerinde, yüksek devir sayısı ve artan sürtünme basıncının önemli rol oynadığı bilinmektedir. ADB ve DB' lerinde tanelerin numune eksenine dik doğrultuda yönlendikleri ve her iki malzemenin kaynak arayüzeyinden aktığı, bu akışa bağlı olarakta deformasyon bantlarının meydana geldiği

görülmektedir. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait SEM fotoğrafları incelenerek, sürtünme sürelerine göre değerlendirildiklerinde yapısal değişiklikler net olarak görülmektedir. Yüksek devir sayısı ile birlikte düşük sürtünme sürelerinin kullanılması ADB' nin daha geniş ancak düzenli bir yapıya sahip olmasını sağlarken, yüksek devir sayıları ile yüksek sürtünme sürelerinin birlikte kullanılması ise ADB' deki düzensiz yapının önemli oranda artmasına neden olmaktadır.

Dönme hızındaki artış kaynak ara yüzeyinden taşan malzeme miktarını arttırmakta ve aşırı deforme olan bölgenin daralmasını sağlamaktadır [17]. Aynı zamanda artan sürtünme basıncının etkisi ile dışarı taşan malzeme miktarı daha fazla arttığı için ADB' nin daha dar bir alanda meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu numuneler bir önceki grup ile kıyaslandığında, artan sürtünme basıncına bağlı olarak ADB' deki daralma meydana gelirken bu bölgenin her iki tarafındaki termoplastik olarak dönüşüme uğrayan DB' lerinin genişlediği görülmektedir. Bu bölgelerin geniş olması devir sayısı ile birlikte artan sürtünme basıncından kaynaklanan, ısı miktarındaki artış ve sıcaklığın numuneler üzerinde daha geniş bir alanı etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

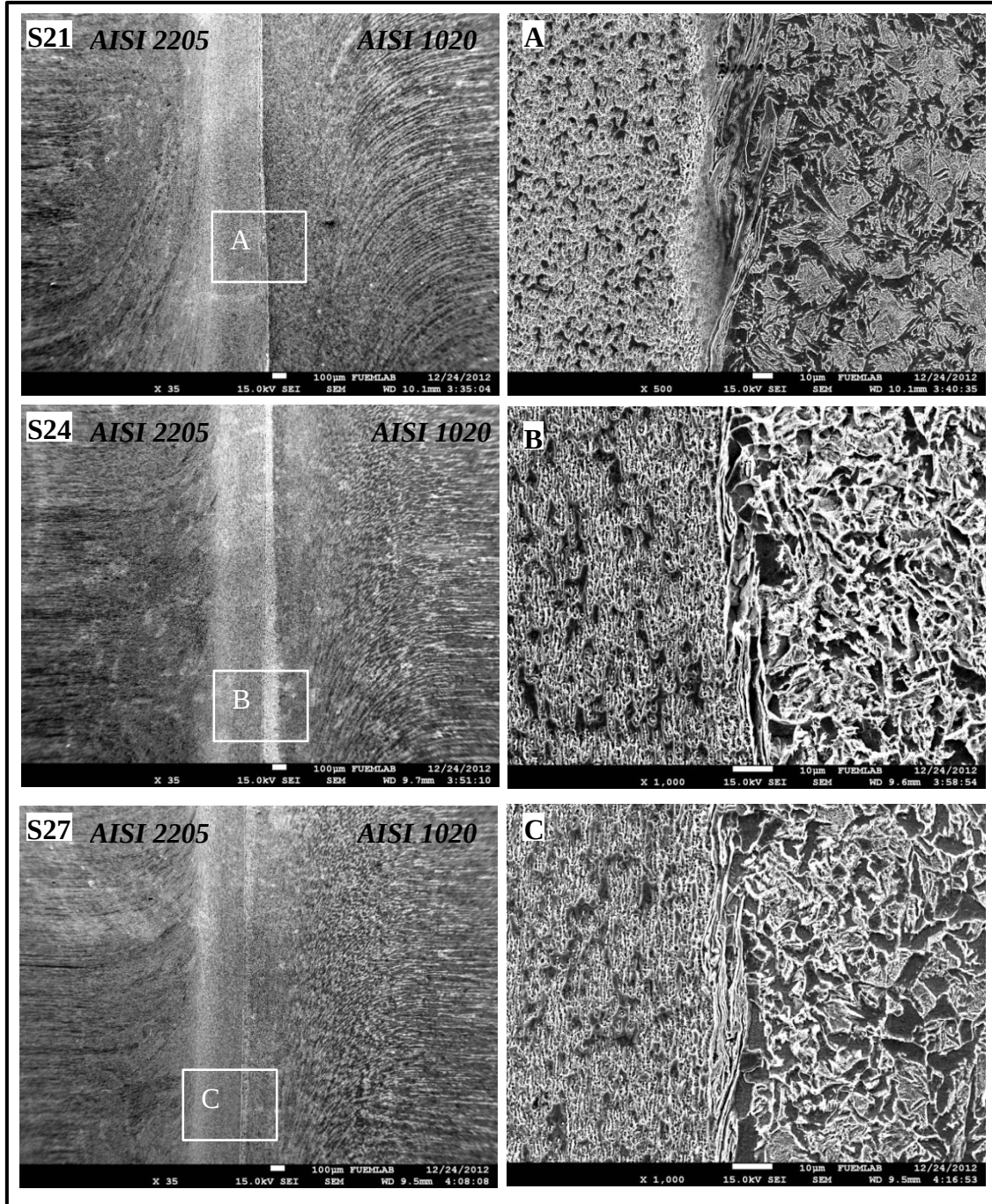
AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının AISI 1020 çeliğine göre düşük olması nedeni ile plastik şekil değiştirme miktarının AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında daha fazla olduğu görülmektedir. Özellikle S23 no' lu numuneye ait fotoğrafta görüldüğü gibi AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait DB içinde tane yönelimleri ile meydana gelen yapısal değişim ve bir önceki bölümde verilen boyca kısalma miktarları incelendiğinde, deformasyon miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. ADB' nin bitişiğindeki DB' de her iki malzeme tarafında tane küçülmeleri ve tane yönelimlerinin olduğu görülmektedir. Kırık [34], basınç altında ısıdan etkilenmiş bölgelerde tane küçülmesi meydana geldiğini kaynak yerinden yatay doğrultuda ana malzemelere doğru tane büyüklüğünün giderek arttığını ve belli bir mesafeden sonra ana malzemelerin mikro yapılarına dönüştüğünü belirtmiştir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, kaynak arayüzeyinden ana malzemeye doğru ilerlendiğinde; AISI 1020 çelik tarafında yaklaşık 4 mm sonra, AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında ise yaklaşık 2 mm sonrada tanelerin büyüyerek ana malzemedeki tane büyüklüklerine ulaştığı görülmektedir.

1700 dev/dk devir sayısı ve 50 MPa sürtünme basıncı, üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) ile birleştirilen S21, S24 ve S27 no' lu kaynaklı bağlantıların bağlantı

arayüzeyinde meydana gelen yapısal değişimleri gösteren SEM fotoğrafları, Şekil 5.26' da verilmiştir.

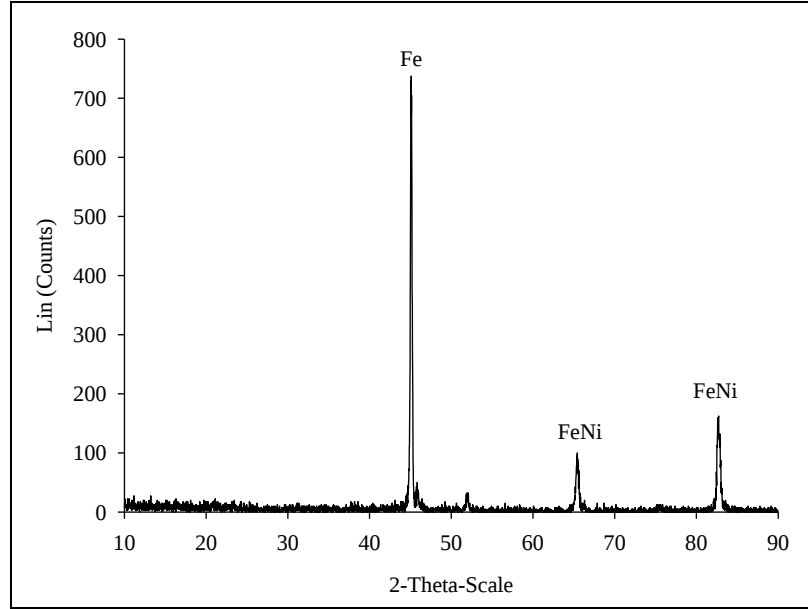
S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait SEM fotoğrafları incelendiğinde, DB ve KDUB' lerde tanelerin ısı ve basınç etkisi ile numune eksenine dik doğrultuda yönlendikleri bununla birlikte ADB' nde malzemelerin birbiri içine geçtiği bir karışım bölgesi oluşturdıkları görülmektedir. Artan devir sayısı ve sürtünme basıncı nedeni ile dışarı taşan malzeme miktarı bu numunelerde daha fazla olmuştur. Buna bağlı olarak, SEM fotoğraflarında termo-mekanik ekti sonucu dönüşüme uğrayan bölgenin (DB) ve ADB' nin daraldığı görülmüştür. Artan devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme basıncına bağlı olarak artan yığma basıncı nedeni ile dövme etkisinin arttığı, bu nedenle tanelerin küçüldüğü görülmektedir. Westgate ve Dunkerton [73] yaptıkları bir çalışmada, sürtünme kaynaklı C/Mn çelik bağlantılarında düşük kaynak süresi ve yüksek yığma basıncının daha ince taneli bir yapı vermiş olduğunu tespit etmişlerdir. Bu numunelere ait SEM fotoğrafları incelendiğinde de artan sürtünme basıncına bağlı olarak tanelerin daha ince bir yapıda meydana geldikleri görülmektedir.

Sürtünme süresi 8 sn kullanılarak birleştirilen S21 no' lu numunede ADB' nin 6 ve 4 sn ile birleştirilen diğer numunelere (S24 ve S27) göre daha fazla ve düzensiz olduğu görülürken, sürtünme süresindeki azalmaya bağlı olarak ADB'de daralma ve kayma bantlarının daha düzenli oldukları görülmektedir. ADB' deki düzensizlikler bağlantı mukavemetini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle devir sayısı ve sürtünme basıncının sabit olduğu S21, S24 ve S27 no' lu numunelerde, sürtünme süresinin azaltılması ile ADB ve DB' nin daha dar bir alanda kalması, bu kaynaklı bağlantılara uygulanan mekanik test sonuçlarını olumlu bir şekilde etkilediği görülmektedir.



Şekil 5.26. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerinden alınan SEM görüntüleri

Şekil 5.27’ da S27 no’ lu numunenin birleşme ara bölgesinde oluşan fazları ve bileşikleri tespit etmek amacıyla yapılan X- Işını analiz grafiği verilmiştir. Oluşan faz ve bileşikler ise Tablo 5.14’ te gösterilmiştir.



Şekil 5.27. S27 no’ lu numunenin X-Işını analiz grafiği

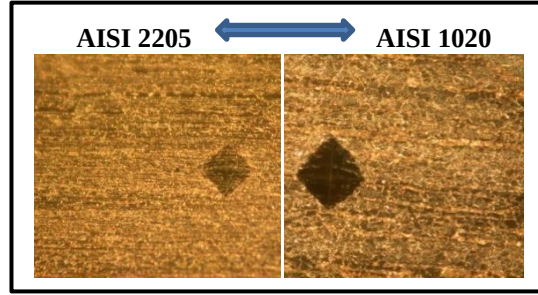
Artan devir sayısı ve azalan sürtünme süresine bağlı olarak sürtünme kaynaklı bağlantı mukavemetini olumsuz olarak etkileyebilecek bileşiklerin meydana gelmediği görülmektedir.

Tablo 5.14. S27no’ lu numunenin X-Işını analiz sonuçlarına göre tespit edilen fazlar

X-Ray Değerleri		
2 Theta (°)	Yoğunluk (I/I ₁)	Faz
45,212	734,519	Fe-Ni
65,874	137,059	FeNi
83,481	170,025	FeNi

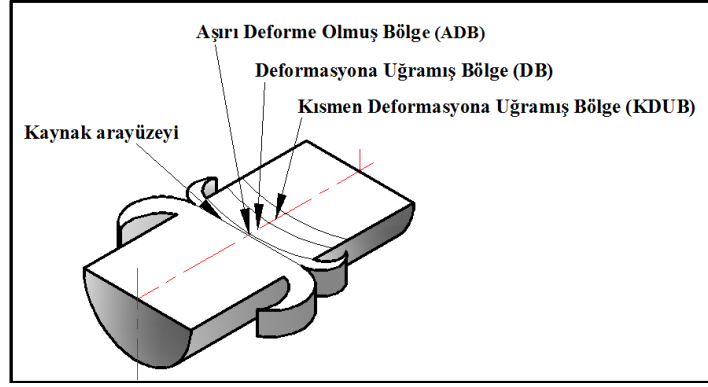
5.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

AISI 1020 ve AISI 2205 malzemeler birleştirilmeden önce 8 farklı noktadan mikro sertlik ölçümü yapılmış, AISI 1020 malzeme için ortalama sertlik değeri 182 Vickers sertliği bulunurken AISI 2205 malzemenin ortalama 328 Vickers sertliğinde olduğu tespit edilmiştir. AISI 1020 ve AISI 2205 malzemelerde oluşan mikrosertlik izleri Şekil 5.28’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.28. AISI 1020 ve AISI 2205 malzemelerde oluşan mikrosertlik izlerinin karşılaştırılması (20x)

Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikrosertlik ölçümleri, farklı parametrelere bağlı olarak ortaya çıkan yapısal değişimi ve bu değişimin, malzemenin sertliği üzerine olan etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla SEM analizi için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, kaynaklı bağlantıların birleşme hattından karşılıklı olarak çizgisel bir doğrultu üzerinden alınmıştır. Üç farklı devir sayısı (1300, 1500 ve 1700 dev/dk), sürtünme basıncı (30, 40 ve 50 MPa) ve sürtünme süresi (4, 6 ve 8 sn) kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların, birleşme merkezinden ana metale doğru çizgisel bir hat boyunca 0,5 mm aralıklarla yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.30-38’ de verilmiştir. Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikrosertlik dağılımı literatüre uygun olarak üç bölgede değişmektedir (Şekil 5.29). Bu bölgeler aşırı deforme olmuş bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) olarak adlandırılmaktadır. Kaynak ara yüzeyinde değişiklik gösteren mikrosertlik sonuçları, esas malzemeye ulaşıldığında ana malzeme sertlik değerlerinde elde edilmiştir.



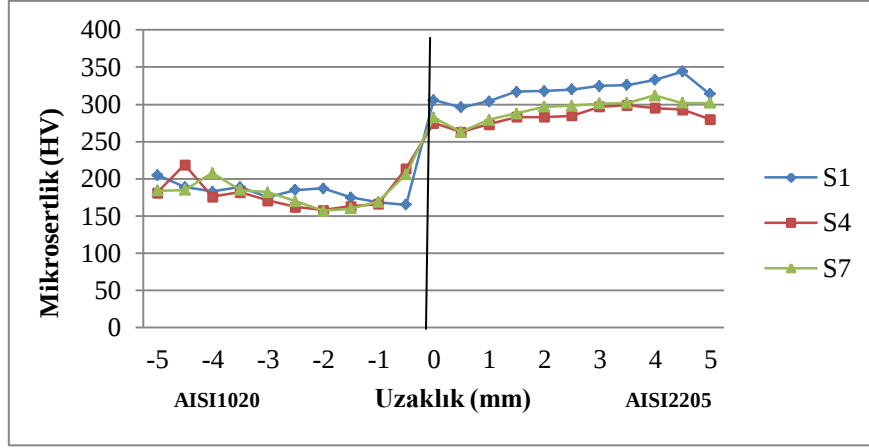
Şekil 5.29. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının değiştiği bölgeler

5.3.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

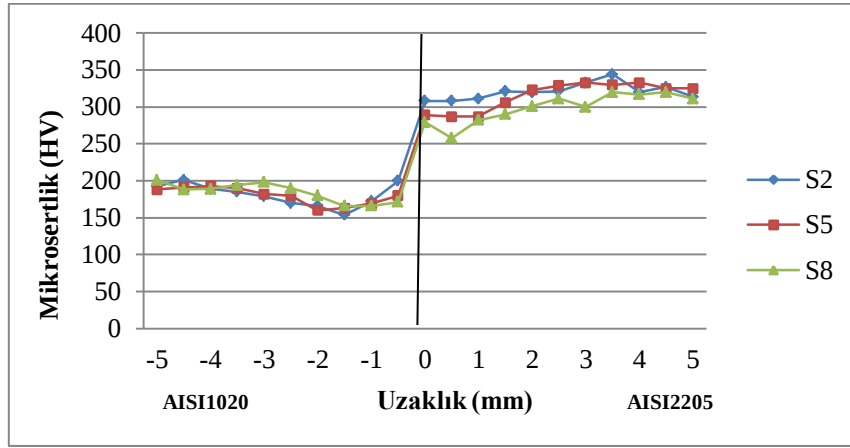
1300 dev/dk devir sayısı üç farklı sürtünme basıncı (30, 40 ve 50 MPa) ve üç farklı sürtüne süresi (4, 6 ve 8 sn) kullanılarak birleştirilen S1 - S9 no' lu numunelere ait sertlik profilleri Şekil 5.30-32' de sırasıyla verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik profilleri incelendiğinde, her dokuz numunede de benzer bir sertlik dağılımının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu dağılımda sertliğin, kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde bir miktar düştüğü ve esas metale doğru gidildikçe malzemelerin ana sertlik değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Daha önce yapılan araştırmalarda temas alanındaki sıcaklığın 1 sn gibi kısa bir süre içinde 1000 °C' ye ulaştığı bildirilmiştir [23]. Bununla birlikte malzemeler arasında ısı iletiminin farklı olması her iki malzeme tarafında IEB' ninde farklı olmasına neden olmuştur. Sertlik profilleri birbirine benzemekle birlikte; sürtünme süreleri ve buna bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan ısı dağılımının farklı olması nedeni ile IEB' lerin genişlikleri farklılık göstermektedir. Yüksek sürtünme süresinin (8 sn) kullanıldığı numunelerde IEB' in daha geniş olduğu ve sertlik değerlerinin, 4 ve 6 sn sürtünme süreleri ile birleştirilen diğer numunelere göre bir miktar arttığı görülmektedir.

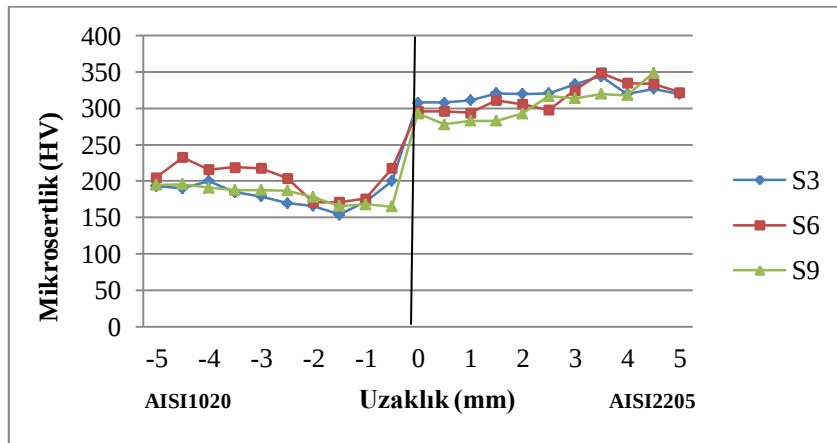
Mikrosertlik sonuçları dikkate alındığında, sürtünme süresinin ve sürtünme basıncının IEB' nin genişliği ve arayüzeydeki sertlik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [34]. Artan sıcaklık ve dövme etkisinin oluşturduğu deformasyon sonucu sertlik değerlerinin kaynak bölgesine yakın kısımlarda her iki malzeme tarafında bir azalma olmadığı daha sonra bir miktar düştüğü görülmektedir. Bu bölgedeki sertlik değişiminin, arayüzeyde ulaşılan sıcaklığın temperleme etkisi yapması sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 5.30. S1, S4 ve S7 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları



Şekil 5.31. S2, S5 ve S8 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları



Şekil 5.32. S3, S6 ve S9 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

Kaynak arayüzeyine yakın kısımlarda sıcaklık ve basınç etkisi ile her iki malzeme tarafında sertliğin, plastik deformasyon nedeni ile ana malzemeye oranla daha yüksek çıkması beklenmektedir. Ancak AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında arayüzeye bitişik ADB’ de sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun; AISI 2205 malzemenin ısı iletim katsayısının düşük olması nedeni ile yavaş soğumasına bağlı olarak AISI 1020 tarafına difüzyonlu element geçişinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte arayüzeyin sürtünmesi ile ortaya çıkan ve her iki malzeme çiftinin karışımından meydana gelen DB bandının varlığı ve genişliği bu bölgedeki sertliğin düşmesinde etkili olmuştur. Minimum sertlik değerlerinin kaynak dikişine yakın ısıdan etkilenmiş bölgede meydana geldiği daha önce yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [74]. Kaynak arayüzeyine yakın kısımlardaki element geçişleri ise EDS sonuçlarında görülmektedir.

AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında kaynak arayüzeyinde sertlik değerleri IEB’ ye göre daha az düşmüştür bu durum artan sıcaklık ve dövme etkisi ile oluşan deformasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ana malzeme tarafına doğru ilerledikçe deformasyon miktarının azalması ile birlikte sertlik değerlerinin düştüğü, ana malzemeye doğru ilerledikçe ana malzeme sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

S1-S9 no’ lu numunelerde sabit devir sayısı ve farklı sürtünme basınçlarının kullanıldığı her üç grupta elde edilen mikrosertlik değerlerinin sürtünme süresindeki artış ile birlikte arttığı görülmektedir. 8 sn sürtünme süresinin kullanıldığı S1, S2 ve S3 no’ lu numunelerin birleşme bölgesindeki sertlik değerlerinin daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu numunelerin kaynak arayüzeyinden ölçülen en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 306, 308 ve 308 HV olarak ölçülmüştür. 4 sn’ lik sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S7, S8 ve S9 no’ lu numunelerde ise daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu numunelerde sertlik değişiminin dar bir aralıkta değişmesi sürtünme süresinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Azalan sürtünme süresine bağlı olarak birim alanın ısının etkisinde kalma süresini azaltacağı gerçeği dubleks paslanmaz çeliklerin kaynağında oluşumu istenmeyen krom karbür oluşum aralığı olan T_{8-5} sıcaklığının hızlı geçmesine katkı sağladığı bilinmektedir [21]. Bu nedenle AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında istenilmeyen sert fazlar oluşmamakta ve sertlik değerlerindeki değişim dar bir aralıkta kalmaktadır.

Bu kaynaklı bağlantılara ait SEM analizleri ve mikrosertlik ölçüm sonuçları dikkate alındığında, sürtünme süresinin ve sürtünme basıncının ITAB’ ın genişliği ve arayüzeydeki

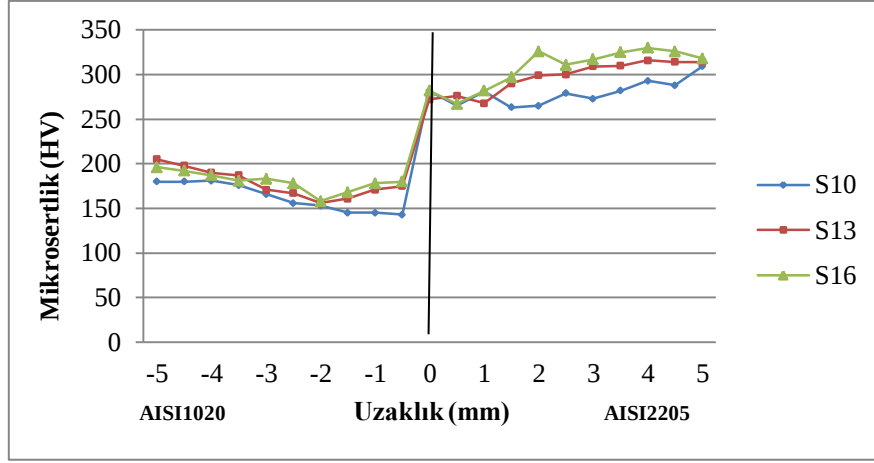
sertlik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu doğrulanmıştır. 1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen S1-S9 no' lu numunelerin tamamında artan sũrtũnme sũresi ile sertlik değerlerinde artmanın olduğu ve sertlik değerlerinin geniş bir aralıktaki değiştiği gũrũlmektedir. Bununla birlikte birleşme hattına dik doğrultuda yapılan mikrosertlik taraması sonucu elde edilen verilerden, sertlik ADB bũlgesinde bir maksimum değerden başlayarak DB bũlgesinde dũřũř sergileyip esas metal sertliğine ulaştığı gũrũlmũřtũr.

5.3.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Olęũm Sonuçları

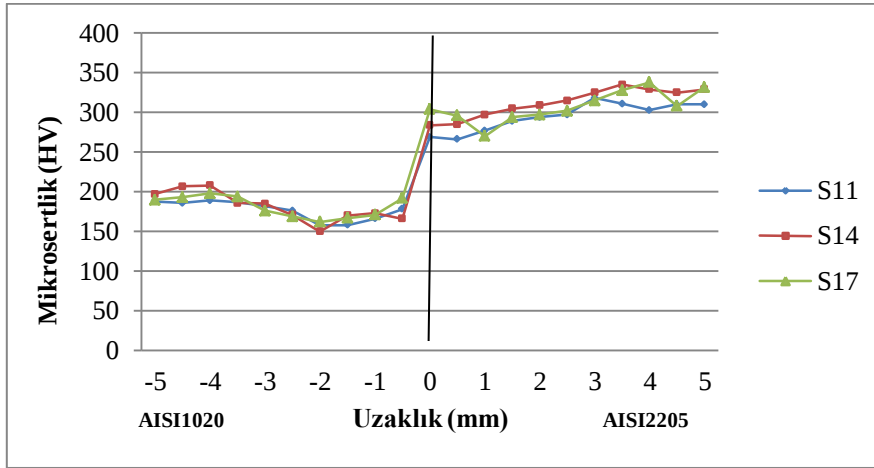
1500 dev/dk devir sayısı ũç farklı sũrtũnme basıncı (30, 40 ve 50 MPa) ve ũç farklı sũrtũne sũresi (4, 6 ve 8 sn) kullanılarak birleştirilen S10 – S18 no' lu numunelere ait sertlik profilleri şekil 5.33-35' te sırasıyla verilmiştir.

Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik profilleri incelendiğinde, dokuz numunede de sertlik dağılımlarının temelde birbirleri ile benzerlik gũsterdięi, kaynak arayũzeyinde (ADB) sertlik değerlerinin değiştiği gũrũlmektedir. Birleşme bũlgesinden her iki tarafta, ana metale doğru ilerledikęe sertlik değerlerinin, sıcaklığa bağlı tavlama etkisinden dolayı bir miktar azaldığı daha sonra ana metallerin sertlik değerlerine erişildiği gũrũlmektedir.

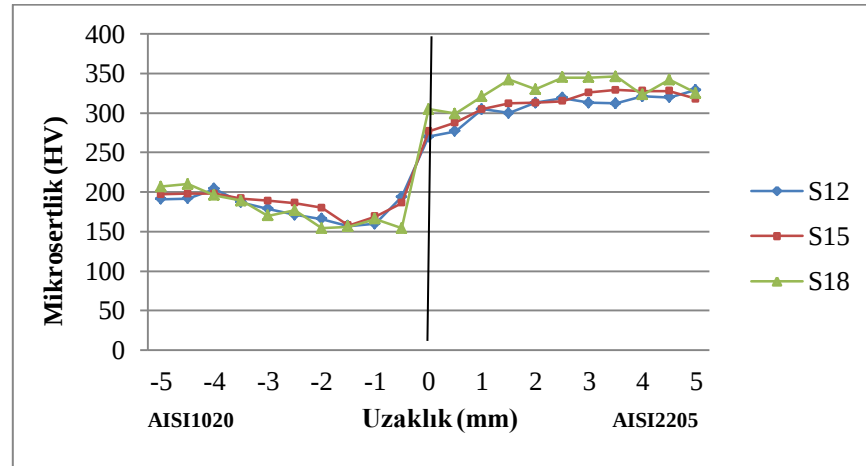
Karbon ęeliklerinde karbon iğeriğine bağlı olarak soğuma hızının artması; perlit miktarının yũzdesini ve sertlik değerlerini arttırmaktadır. Martenzit yũzdesi oranı arttıkęa sertlikte hızla artar. Ancak, bu ęalıřma kapsamında kullanılan dũřũk karbonlu AISI 1020 ęeliklerinde martenzitik dũnũřũmũn sadece suda soğutma ile % 5 oranında elde edilebildiği yapılan ęalıřmalarda bildirilmiştir [33]. Bu nedenle dũřũk karbonlu bir ęelik olan AISI 1020 tarafında ADB' de oluşan sertliğin, sũrtũnme fazında meydana gelen sıcaklık artışı ile birlikte uygulanan eksenel basıncın oluşturduğu plastik değormasyona bağlı olduğu dũřũnũlmektedir.



Şekil 5.33. S10, S13 ve S16 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları



Şekil 5.34. S11, S14 ve S17 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları



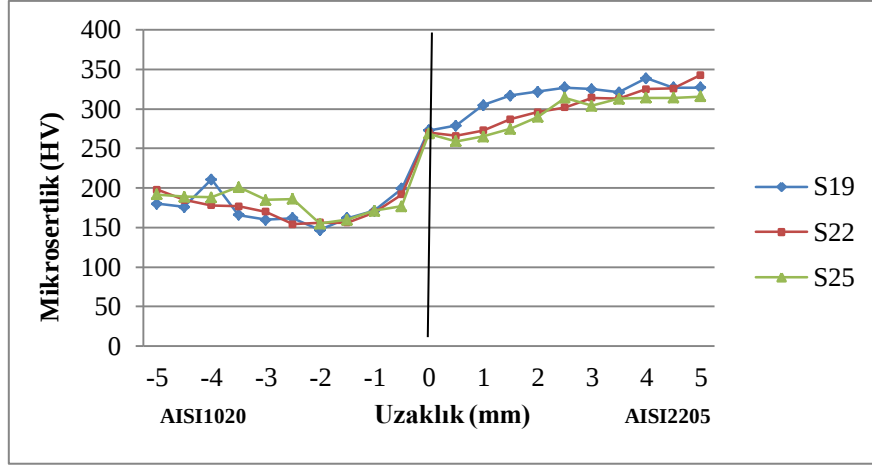
Şekil 5.35. S12, S15 ve S18 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

Sabit devir sayısı (1500 dev/dk) altında farklı sürtünme basınçlarına (30, 40 ve 50 MPa) göre üç gruba ayrılan S10-S18 no' lu numunelerde, kaynak bölgesinden ölçülen sertlik değerlerinin azalan sürtünme süresi ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu durum sürtünme süresindeki artış ile birlikte arayüzeyden dışarı taşan malzeme miktarı ile ilişkilendirilebilir. Çünkü arayüzeyden dışarı atılamayan ve deformasyon etkisi ile daha küçük ve daha sert tane yapısına sahip bölgenin genişliği sürtünme süresine bağlı olarak değişmektedir. Bu grupta kaynak arayüzeyinden ölçülen en düşük sertlik değeri 8 sn sürtünme süresinin kullanıldığı S11, S12 ve S13 no' lu numunelerde sırasıyla 272, 269 ve 270 HV olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte kaynak arayüzeyinden ölçülen en yüksek sertlik değerlerinin ise düşük sürtünme süresinin (4 sn) kullanıldığı S16, S17 ve S18 no' lu numunelerde sırasıyla 282, 304 ve 305 HV olarak kaydedilmiştir.

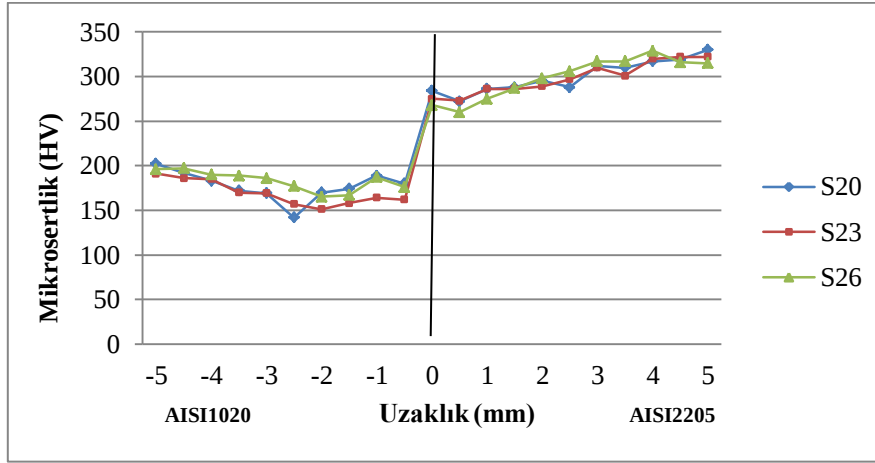
1300 dev/dk ile birleştirilen S1-S9 no' lu numuneler ile 1500 dev/dk ile birleştirilen S10-S19 no' lu numuneler karşılaştırıldığında artan devir sayısı sonucu viskoz hale gelen malzeme dışarı daha fazla taşmıştır. Bu etki nedeni ile ölçülen sertlik değerlerinin bir önceki gruba göre azaldığı görülmektedir.

5.3.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

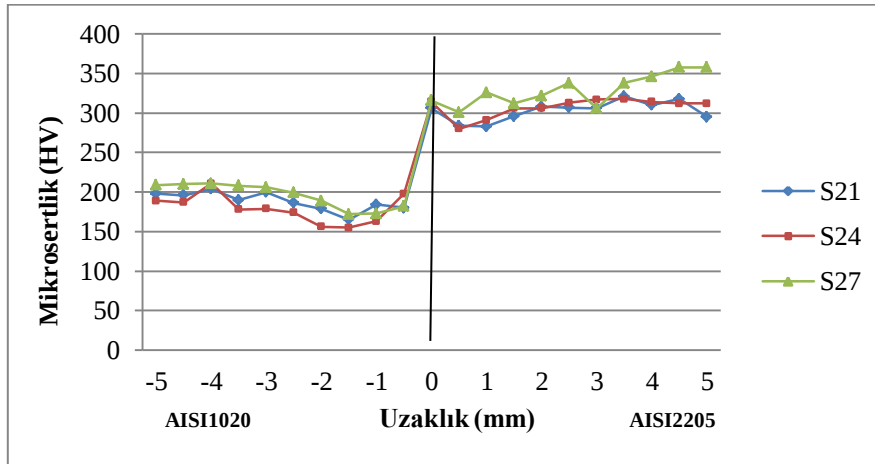
Sabit devir sayısı (1700 dev/dk), üç farklı sürtünme basıncı (30, 40 ve 50 MPa) ve üç farklı sürtünme süresi (4, 6 ve 8 sn) kullanılarak birleştirilen S19-S27 no' lu kaynaklı bağlantılar üzerinden alınan mikrosertlik profilleri Şekil 5.36-38' de sırasıyla gösterilmektedir. Artan devir sayısı ile bu gruba ait arakesitten alınan sıcaklık değerleri artmış ve 1082-1189 °C olarak ölçülmüştür. Artan sıcaklık değerleri ile birlikte daha etkin olan sürtünme basıncı, deformasyon sertleşmesine neden olmuştur. Bu nedenle S19- S27 no' lu numunelere ait sertlik profilleri incelendiğinde, 50 MPa basınç altında birleştirilen numunelerde (S21, S24 ve S27) ölçülen sertlik değerleri, 30 ve 40 MPa sürtünme basıncı ile birleştirilen numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Dışarı taşan malzeme miktarı yüksek basınç altında daha fazla olmasına rağmen sertlik değerlerindeki bu artışın sebebinin, artan sürtünme basıncına bağlı olarak plastik deformasyon miktarını arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 1700 dev/dk ile birleştirilen S19-S27 no' lu kaynaklı bağlantılarda, kaynak arayüzeyinden ölçülen en yüksek sertlik değeri S27 no' lu numunede 316 HV, en düşük sertlik değeri ise S26 no' lu numuneden 268 HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.36. S19, S22 ve S25 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları



Şekil 5.37. S20, S23 ve S26 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları



Şekil 5.38. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerde kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

Yılmaz [41], yaptığı bir çalışma sonucunda; artan sürtünme süresinin, kaynak bölgesinde daha yüksek bir sertlik değeri verdiği, yığma basınçlarındaki değişim ise maksimum sertliği pek etkilemediğini bildirmiştir. 1300 dev/dk ile yapılan kaynaklı bağlantılarda sertlik değerleri artan sürtünme süreleri ile artmıştır ancak 1500 dev/dk ile yapılan kaynaklı bağlantılarda azalan sürtünme süresi ile sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte 1700 dev/dk ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde sürtünme süresindeki artış, sertlik değerlerini 30 ve 40 MPa basınç altında yapılan birleştirmelerde arttırırken 50 MPa basınç altında birleştirilen numunelerde azalmasına neden olmuştur. 50 MPa sürtünme basıncının kullanılması durumunda dışarı taşan malzeme miktarı daha fazla olmasına rağmen, yüksek deformasyon etkisi ile ortaya çıkan deformasyon sertleşmesi ve tanelerde meydana gelen küçülme miktarının yüksek oranda gerçekleşmiş olması sertlik değerlerinin daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Sertlik değerlerinin değişimindeki bu durumun sıcaklık değerlerine, plastik deformasyon şiddetine ve dışarı taşan malzeme miktarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Dolayısıyla sertlik değerlerindeki değişim; devir sayısı, sürtünme süresi ve eksenel basıncın birlikte etkisi ile ortaya çıkmaktadır.

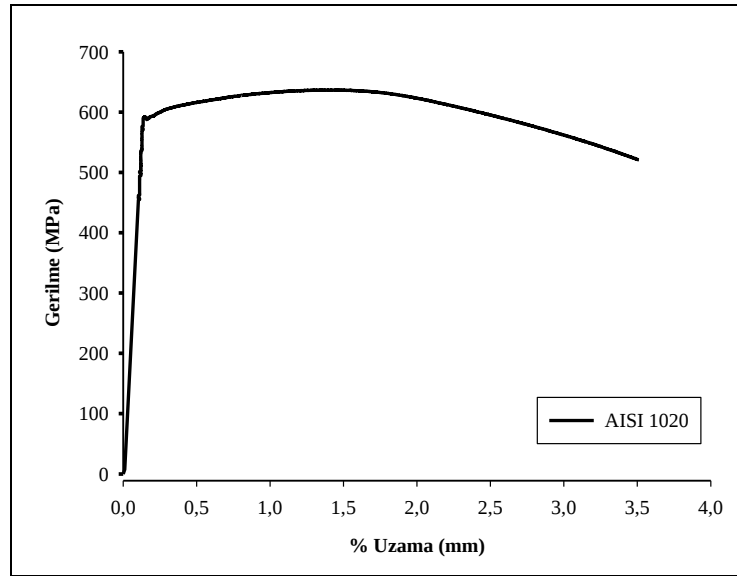
AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında sertlik değerleri literatürde bildirildiği gibi kaynak arayüzeyinde değiştiği görülmektedir. Kaynak arayüzeyinden ana malzemeye doğru, 0,5-1 mm mesafede sertlik değerlerinde düşüş daha fazla olduğu görülmektedir. Bu azalmanın, düşük karbonlu bir çelik olan AISI 1020 çelik tarafına doğru gerçekleşen element difüzyonu ve artan sıcaklığın oluşturduğu temper etkisi ile meydana geldiği düşünülmektedir. Kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde ise aşırı dövülmüş tanelerin sertlik değerlerini yükselttiği ancak bu sertlik değerlerinin de ana malzeme sertlik değerlerinin altında olduğu görülmektedir.

Farklı işlem parametreleri kullanılarak birleştirilen sürtünme kaynaklı 27 numune üzerinde, ana malzeme ve kaynak bölgesinin mikrosertlik ölçümleri sonucunda bütün numuneler için kaynak bölgesindeki mikrosertlik değerlerinin ana malzemeye oranla değiştiği görülmektedir. Sertlik değerlerindeki değişimi oluşturan mekanizma; element geçişleri, karbür oluşumu ve plastik şekil değiştirmenin etkileri ile meydana gelmektedir. Bununla birlikte kullanılan sürtünme kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak arayüzeyinden dışarı atılan malzeme miktarının farklı olması IEB' nin ve sertlik değerlerinin farklı çıkmasına neden olmaktadır.

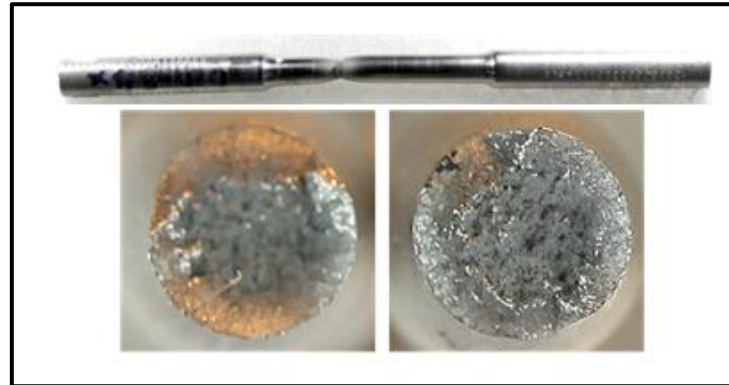
5.4. Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özelliklerine Ait Sonuçlar

5.4.1. Çekme Test Sonuçları

Deneylerde kullanılan ana malzemeler (AISI 1020 ve AISI 2205) için çekme deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, deney sonrası kopan parçalarla birlikte gösterilmiştir. Yapılan çekme deneyi sonunda AISI 1020 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 5.39’ da gösterilmektedir. AISI 1020 çeliğinin maksimum çekme gerilmesi 610,780 MPa olarak elde edilmiştir. Deney sonrası kopan parçaları ve kırık yüzey fotoğrafı ise Şekil 5.40’ ta gösterilmektedir.

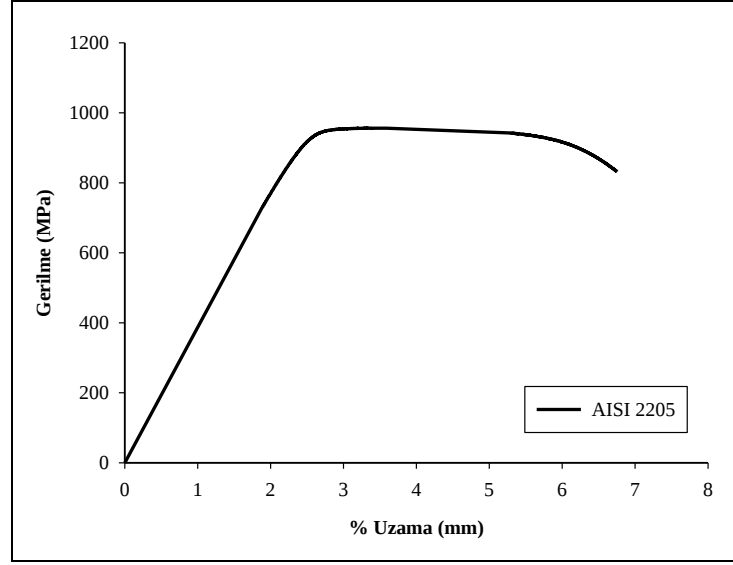


Şekil 5.39. AISI 1020 çeliğine ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

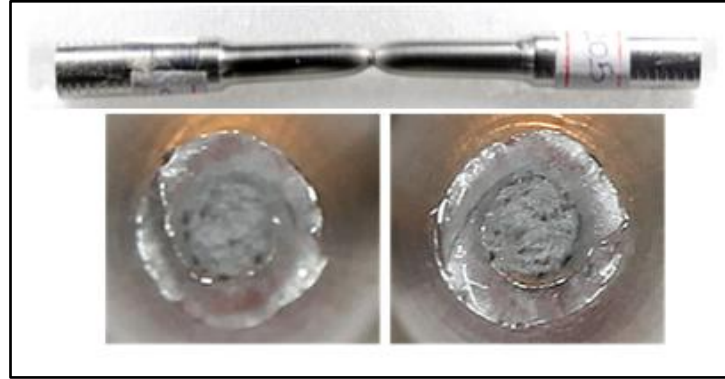


Şekil 5.40. AISI 1020 çeliğin çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafı

AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 5.41’ de gösterilmektedir. AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin maksimum çekme gerilmesi 955,681 MPa olarak tespit edilmiştir. Deney sonunda kopan parçaları ve kırık yüzey fotoğrafları Şekil 5.42’ de gösterilmektedir. Şekil 5.40 ve 42 incelendiğinde, her iki malzemenin koni çanak oluşumu ile sünek şekilde kırıldıkları görülmektedir.

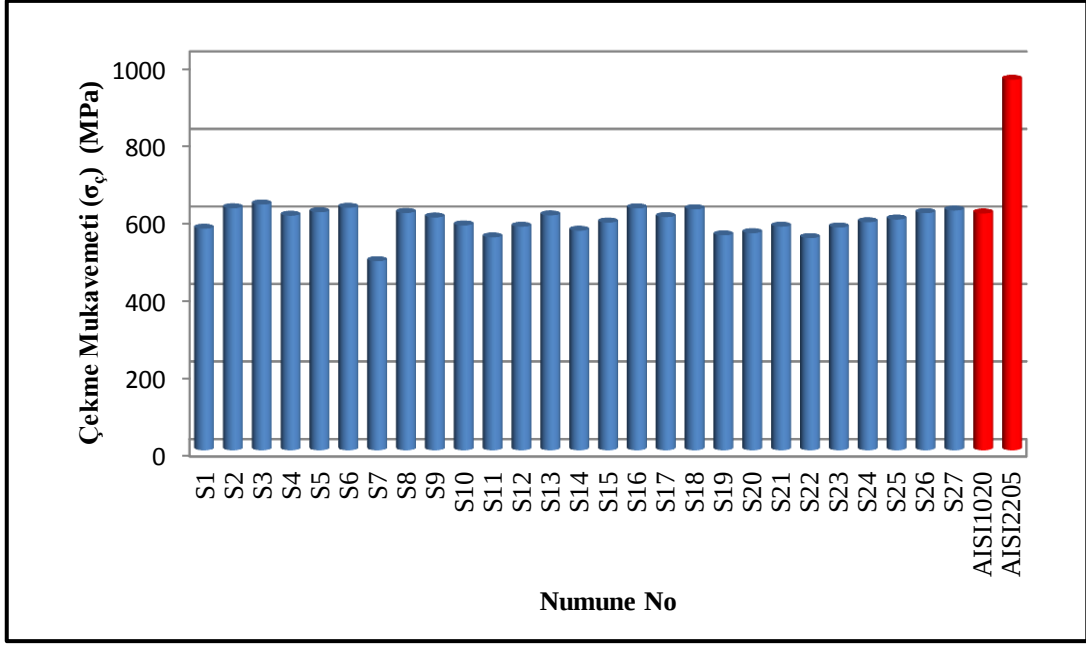


Şekil 5.41. AISI 2205 DPÇ’ e ait gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.42. AISI 2205 DPÇ çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafı

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 2205 ve AISI 1020 malzemelere ve kaynaklı numunelerin tamamına ait çekme test sonuçları Şekil 5.43’ te grafik halinde gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, farklı kaynak parametrelerine bağlı olarak maksimum çekme gerilmesi değerlerinin değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.43. Çekme test sonuçlarına ait grafik

Sürtünme kaynak parametreleri ile bağlantı mukavemetine ait ilişkiler Tablo 5.15’ te verilmiştir. Bu tabloda, çekme deneyi ile elde edilen diyagramlardan, kaynatılmış numunelerin 150 MPa gerilme değerindeki şekil değişimleri göz önünde bulundurularak elastisite modülleri hesaplanmış ve sonuçları gösterilmiştir.

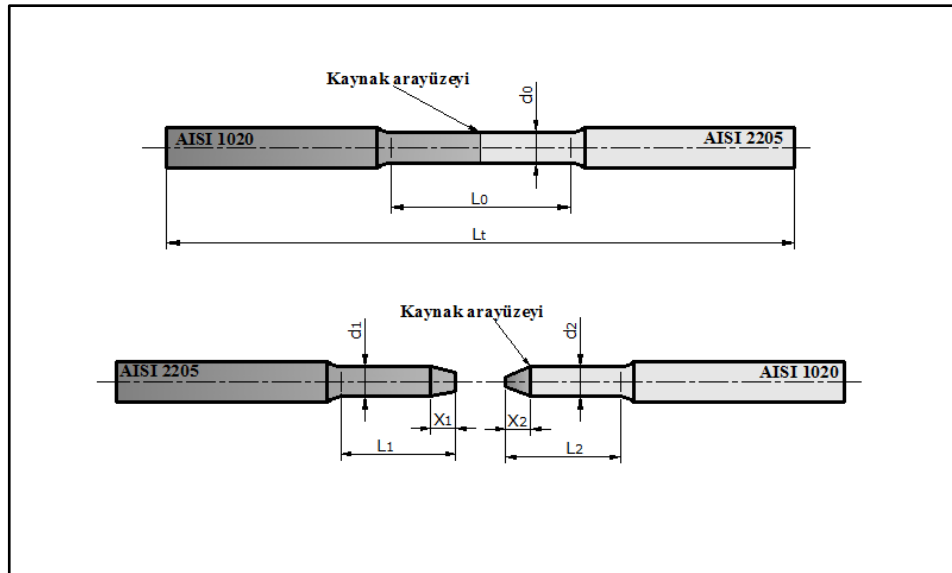
Çekme testi sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde, bazı numunelerin kaynak bölgesi dışında belirgin bir akma noktası göstererek sünek kırılma davranışı gösterdikleri, bazı numunelerin ise belli bir akma noktası göstermeksizin kaynak ara yüzeyine çok yakın ve gevrek kırılma davranışı ile kırıldıkları görülmüştür.

Tablo 5.15. Çekme deney sonuçlarına ait ortalama değerler

Numune No	Çekme Mukavemeti (σ_c) (MPa)	Ana Malzeme (AISI 1020) Direncine Göre % Fark	σ_c/σ_a	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S1	571,364	-6,453	2,457	1,349	27,750	406,727
S2	624,407	2,231	1,700	2,460	51,466	411,132
S3	633,790	3,767	3,108	2,421	44,993	393,471
S4	605,076	-0,934	1,737	0,952	24,889	406,742
S5	613,923	0,515	1,888	2,516	51,000	340,443
S6	625,409	2,395	1,808	2,778	51,000	393,629
S7	487,674	-20,156	2,079	1,349	19,898	366,287
S8	612,269	0,244	1,539	2,706	44,000	366,976
S9	600,344	-1,709	1,869	2,238	51,233	215,103
S10	520,210	-14,754	2,059	1,349	19,000	401,642
S11	549,001	-10,115	1,616	2,778	64,399	396,785
S12	576,390	-5,631	1,639	2,273	42,016	352,278
S13	605,777	-0,819	2,487	1,754	26,612	347,509
S14	566,199	-7,299	1,867	2,365	57,098	371,293
S15	587,370	-3,833	1,508	2,302	56,879	317,975
S16	623,994	2,163	1,774	2,460	45,486	381,372
S17	601,303	-1,552	1,635	2,238	53,986	368,373
S18	621,606	1,772	1,545	2,683	52,160	421,209
S19	554,347	-9,240	1,471	1,690	36,532	376,833
S20	560,114	-8,295	1,367	2,341	56,660	405,861
S21	576,572	-5,601	1,581	2,333	47,196	378,867
S22	547,343	-10,386	1,309	1,421	31,662	386,636
S23	574,616	-5,921	1,795	2,246	57,966	356,873
S24	588,189	-3,699	1,494	2,333	49,353	390,304
S25	595,198	-2,551	1,565	1,730	32,212	383,637
S26	611,798	0,167	1,603	2,429	44,746	441,312
S27	618,335	6,236	1,480	2,488	49,770	393,656
AISI 1020	610,780	---	2,395	3,587	53,381	277,215
AISI 2205	955,681	---	2,915	8,105	79,449	351,720

Sürtünme kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testi sonuçları incelendiğinde, üretim parametrelerinin bağlantı mukavemeti üzerine önemli etkisi 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 [2]. Yapılan çalışmalarda 1300, 1500 ve 1700 dev/dk'lık devir sayıları kullanılmıştır. Her bir devir sayısında farklı sürtünme basınçları ve farklı sürtünme süreleri kullanılarak dokuz adet numune hazırlanmış ve kaynaklı bağlantılar gerçekleştirilmiştir. Ancak, diğer kaynak parametrelerinin kaynak edilebilirlik üzerindeki etkilerinin incelenmesi için her bir grup kendi içinde üçerli alt guruplara ayrılarak sınıflandırılmıştır. Alt guruplarda sürtünme süreleri 8, 6 ve 4 sn, sürtünme basıncı sırası ile 30, 40 ve 50 MPa olarak düzenlenmiştir. Yığma basıncı ve yığma süresi ise sürtünme basıncı ile sürtünme süresine göre literatüre uygun biçimde değiştirilmiştir.

Çekme deneyi sonrası kırılan numuneler, kırık yüzey makro fotoğrafları ile birlikte verilmiştir. Kırık yüzey fotoğraflarındaki ayrıntıların görülebilmesi amacıyla fotoğraflar büyütülerek gösterilmiştir. Deney sonunda kırılan yüzeylere ait parçaların şematik gösterimi Şekil 5.44' te gösterilmektedir. Tablo 5.16' da ise şematik resme uygun olarak kırılan parçalarda meydana gelen boyca uzama ve kesit daralmasına ait değerler gösterilmiştir.



Şekil 5.44. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi

Tablo 5.16. Çekme deney sonunda numunelerde boyut analizi

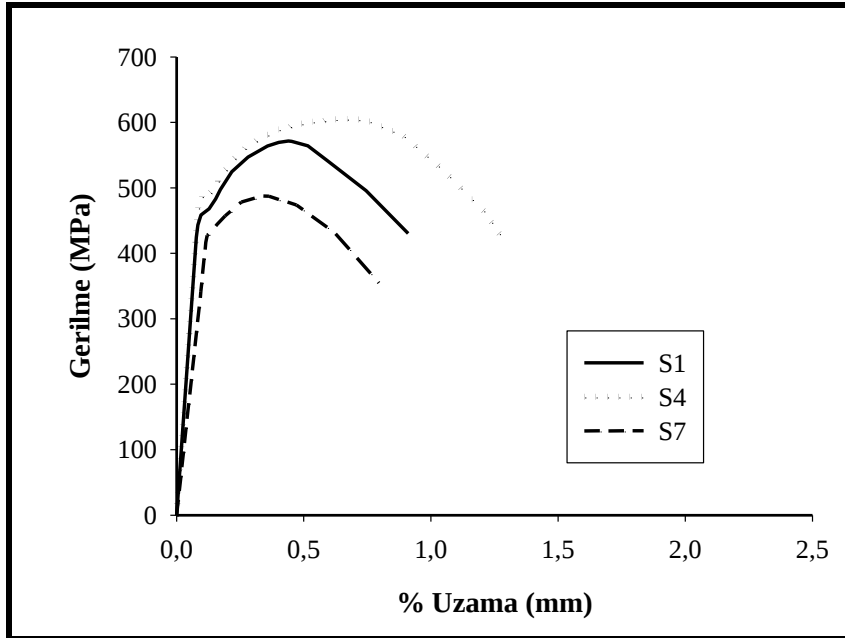
Numune no	PARAMETRELER					Deney sonunda ölçülen değerler							
	Devir (Dev/dk)	Sürt. Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı (Mpa)	Yığılma Basıncı (Mpa)	Yığılma Süresi (sn)	L ₀	d ₀	AISI 2205			AISI 1020		
								L ₁	d ₁	X ₁	L ₂	d ₂	X ₂
S1	1300	8	30	60	4	36	6	19,19	6	---	18,51	6	---
S2			40	80	4			22,4	5,99	4,69	16,65	6	2,87
S3			50	100	4			21,07	5,96	3,66	18,03	5,91	2,50
S4		6	30	60	3			18,84	5,99	---	18,36	6	---
S5			40	80	3			22,34	5,97	4,64	16,83	5,94	2,23
S6			50	100	3			21,47	5,96	3,82	17,35	5,97	2,94
S7		4	30	60	2			19,58	5,85	---	18,12	5,85	---
S8			40	80	2			22,5	5,96	4,92	17	5,98	1
S9			50	100	2			22,29	5,98	3,84	17,12	5,98	2,13
S10	1500	8	30	60	4			19,12	5,93	---	18,58	5,83	---
S11			40	80	4			21,88	5,82	3,89	17,62	5,77	2,12
S12			50	100	4			22,35	5,98	4,58	16,75	6	1
S13		6	30	60	3			22,45	5,96	3,77	17,23	5,97	2,33
S14			40	80	3			21,93	5,91	3,65	17,05	5,73	2,53
S15			50	100	3			21,98	5,83	4,16	16,92	5,80	2,19
S16		4	30	60	2			18,59	5,95	---	18,95	5,99	---
S17			40	80	2			22,58	5,91	4,36	16,72	5,87	1
S18			50	100	2			21,95	5,99	3,69	17,43	5,98	2,65
S19	1700	8	30	60	4			19,38	5,77		18,75	5,77	2,13
S20			40	80	4			21,97	5,86	3,52	16,98	5,72	2,34
S21			50	100	4			22,55	5,85	4,32	16,39	5,77	2,37
S22		6	30	60	3			19,51	5,83	---	18,28	5,85	---
S23			40	80	3			22,22	5,84	4	16,61	5,84	2,80
S24			50	100	3			21,93	5,85	3,99	17,01	5,84	2,30
S25		4	30	60	2			19,83	5,94	---	18,35	5,95	---
S26			40	80	2			22,05	5,99	4,30	17,01	5,98	2,51
S27			50	100	2			21,63	5,82	3,69	17,19	5,81	4,06

5.4.1.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları

1300 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S4 ve S7 no' lu kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testi ile elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.17' de gösterilmektedir. Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.45' te verilmiştir.

Tablo 5.17. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S1	1300	8	30	60	4	571,364	1,249	24,750	406,727
S4		6			3	605,076	1,349	27,889	406,742
S7		4			2	487,674	0,952	19,898	366,287



Şekil 5.45. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

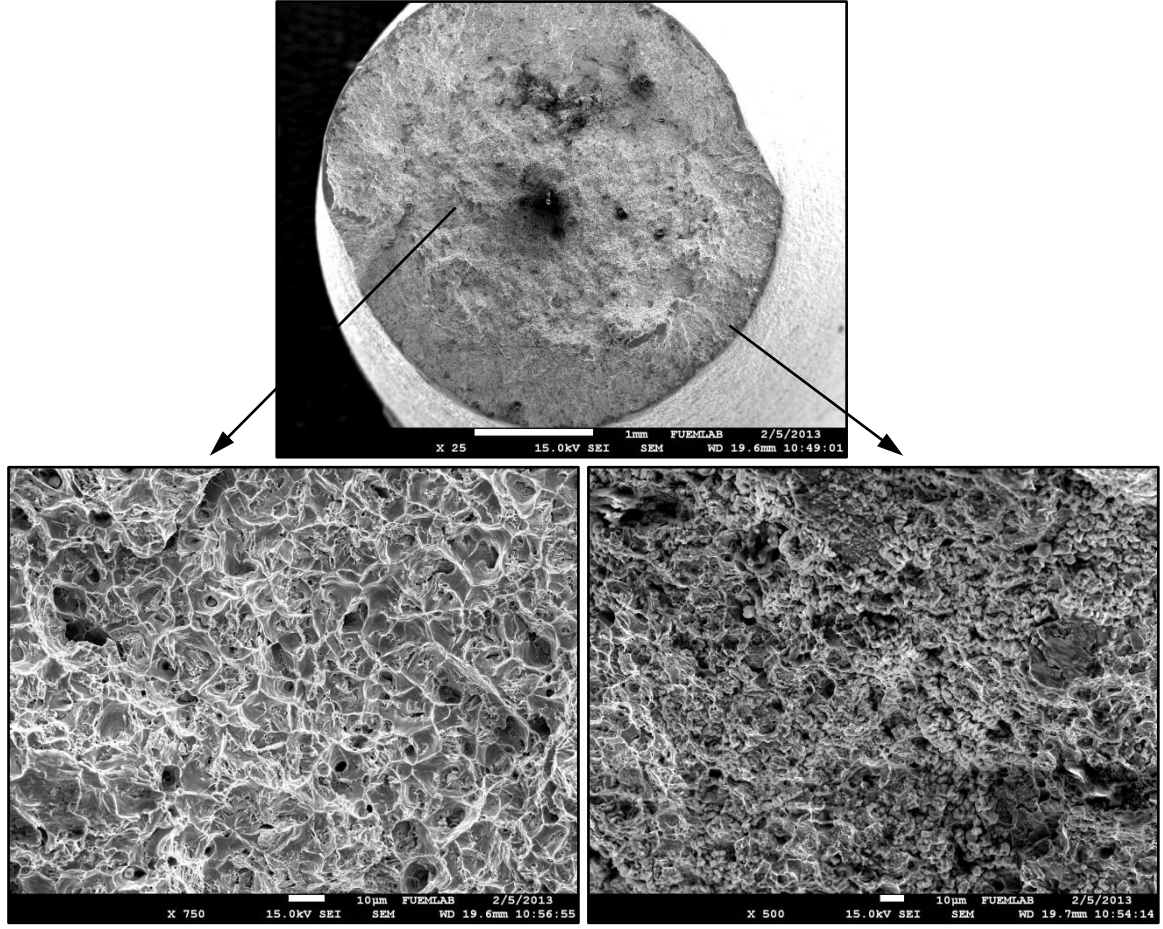
Sürtünme süresi kademeli değiştirilerek (8, 6 ve 4 sn) birleştirilen S1, S4 ve S7 no' lu numunelerde çekme değerleri sırasıyla 571.364, 605.076 ve 487.674 MPa olarak kaydedilmiştir. Çekme değerleri açısından en iyi sonuç S4 no' lu numunede elde edilmiştir. Bunun temel nedeni 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S1 no' lu numunede, yüksek sürtünme süresi kullanıldığında deforme olan bölgenin genişlemesi ve artan sürtünme süresine bağlı olarak arayüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresini arttırması sonucu IEB' nin genişlemiş olmasıdır. Literatürde kaynak arayüzeyinde yer alan bağlantısız bölgelerin, çatlakların ve boşlukların varlığı ile bunların büyüklükleri, reaksiyonlar sonucunda oluşan aşırı deforme olmuş bölgenin varlığı ve bu bölgenin genişliği ile birlikte IEB' nin geniş olmasının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği bildirilmiştir [13, 21]. S7 no' lu numunede ise seçilen sürtünme süresinin (4 sn), sürtünme basıncının (30 MPa) ve kullanılan devir sayısının (1300 dev/dk) plastik deformasyon için gerekli olan sıcaklığa ulaşılmasında yeterli olmadığı bunun sonucunda bağlantı kalitesinin düştüğü ve kaynaklı bağlantı mukavemetinin diğer numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. S1, S4, S7 no' lu numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.46' da gösterilmektedir.



Şekil 5.46. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

Bu kaynaklı bağlantılara ait kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde numunelerin kaynak ara yüzeyine çok yakın bir bölgede AISI 1020 tarafında boyun vermeksizin kırıldığı görülmektedir. Kırılma; arayüzeye yakın bir noktadan başlayıp AISI 1020 tarafına doğru yaklaşık 45° lik bir açıyla, gevrek kırılma davranışı sergileyerek meydana gelmiştir. Bu gevrek kırılmanın sebebi; başlangıç arayüzey sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandının dışarı atılması için yeterli eksenel basınç ve sürtünme fazının bulunmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. S1, S4 ve S7 no' lu kaynaklı bağlantılar üzerinden alınan SEM analizi ve mikrosertlik ölçümleri bu sonucu doğrulamaktadır. Çekmeye zorlanan çok kristalli bir metalde, gevrek kırılma makroskobik olarak çekme gerilmesine diktir ve çatlağın taneden yayılması sırasında ayrılma düzlemlerinin doğrultusu değiştiği için de parlak taneli bir görünüme sahip olduğu bilinmektedir [66]

S1 no' lu numuneye ait kırık yüzey SEM fotoğrafı Şekil 5.47' de verilmiştir. Kırık yüzey SEM fotoğraflarında da açıkça görüldüğü gibi, 1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen bu kaynaklı bağlantılarda düşük enerji girdisine bağlı olarak arayüzey sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandının dışarı atılmasında sıcaklık ve basıncın yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu numunelerin dimple ve klivaj karışımı bir mekanizma ile gevrek kırıldıkları görülmektedir. Bilindiği gibi bu tip kırılmalar ikinci faz partüküllerini tane sınırlarında boşlukların çekirdeklenmesi ile başlar. Çatlak ilerlemesi ve kırılma söz konusu boşlukların büyüyerek birleşmesi sonucu meydana gelir. Kırık yüzey SEM analiz sonuçlarından sürtünme süresi ve eksenel basıncın kaynaklı bağlantıların kırılma davranışı ve kırık yüzey morfolojisi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

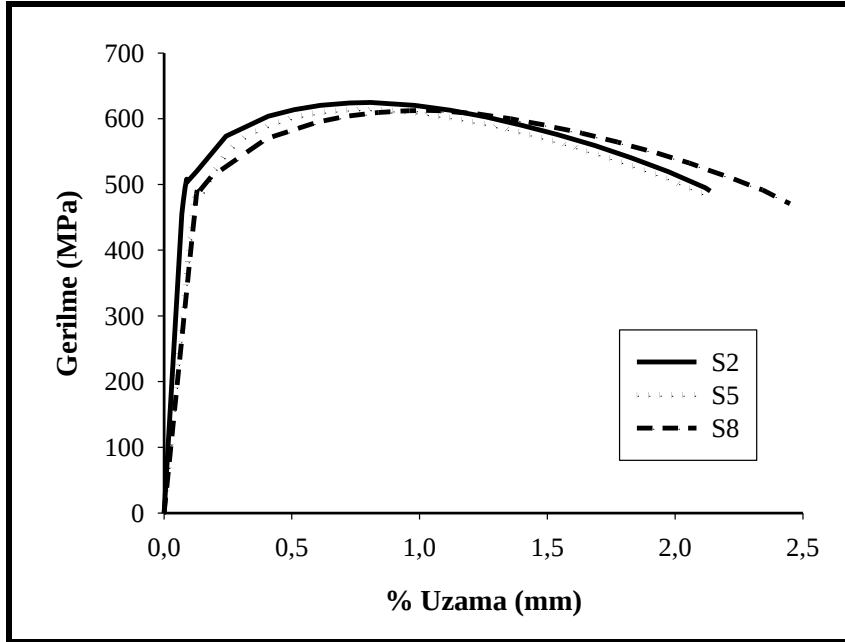


Şekil 5.47. S1 no' lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S2, S5 ve S8 no' lu kaynaklı bağlantılara ait çekme testi ile elde edilen mekanik değerler Tablo 5.18' de gösterilmiştir. Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.48' de verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ve çekme testi sonrası elde edilen sonuçlar incelendiğinde; tipik AISI 1020 çeliğin çekme grafiği ve sonuçlarına yakın değerler elde edildiği açıktır. Ayrıca bu numunelere ait akma sınırı ve maksimum çekme gerilmesi, artan sürtünme süresine bağlı olarak artış sergilemiştir. S2, S5 ve S8 no' lu numunelerden ölçülen maksimum çekme gerilmesi değerleri sırasıyla 624.407, 613.923, 612.269 MPa olarak kaydedilmiştir. N. Özdemir ve Orhan [14], yaptıkları çalışma ile artan sürtünme süresi ve sürtünme basıncına bağlı olarak gerilme değerlerinde artma olduğunu bildirmişlerdir. Her üç numuneninde belirgin akma noktası göstererek sünek bir şekilde kırıldıkları görülmektedir.

Tablo 5.18. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt. Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S2	1300	8	40	80	4	624,407	2,706	51,466	411,132
S5		6			3	613,923	2,516	51,000	340,443
S8		4			2	612,269	2,460	44,000	366,976

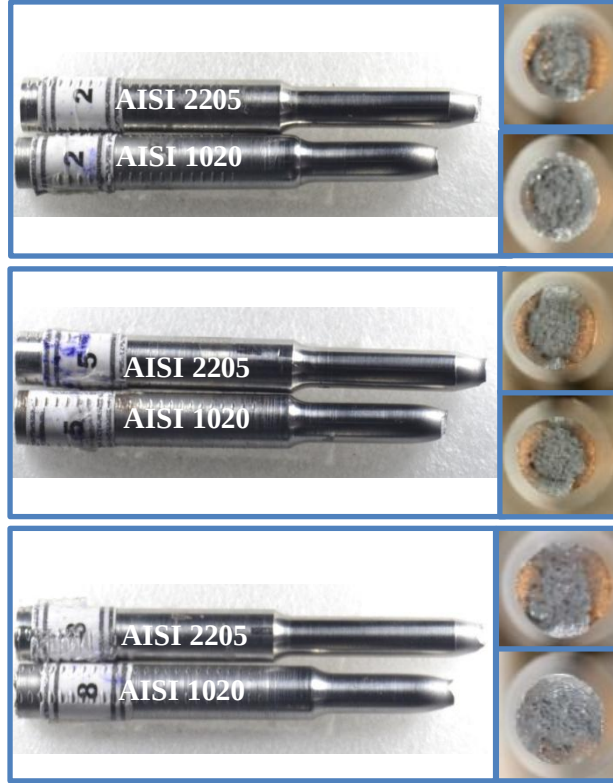


Şekil 5.48. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

30 MPa sürtünme basıncı ile birleştirilen bir önceki grup ile karşılaştırıldığında, çekme dayanımlarının belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla düşük devir (1300 dev/dk) ve düşük sürtünme basıncı (30 MPa) kullanılması durumunda bağlantı mukavemetinin olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Bu durum bağlantı arayüzeyinde mukavemet değerlerini olumsuz etkileyen viskoz haldeki malzemenin artan basınç ile dışarı atıldığını göstermektedir.

S2, S5 ve S8 no' lu numunelerin çekme deneyi sonrası elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.49' da verilmiştir. Her üç numunenin AISI 1020 çelik malzeme

tarafından boyun vererek sünek bir şekilde kırıldığı, kırılmanın koni-çanak şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Bir önceki seri ile kıyaslandığında kırılma rejiminde önemli değişiklikler kaydedilmiştir. Bu değişimin temel sebebinin, artan sürtünme basıncı ile birlikte arayüzey sıcaklığının deformasyon etkisi üzerinde önemli rol oynamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.49. S2, S5 ve S8 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

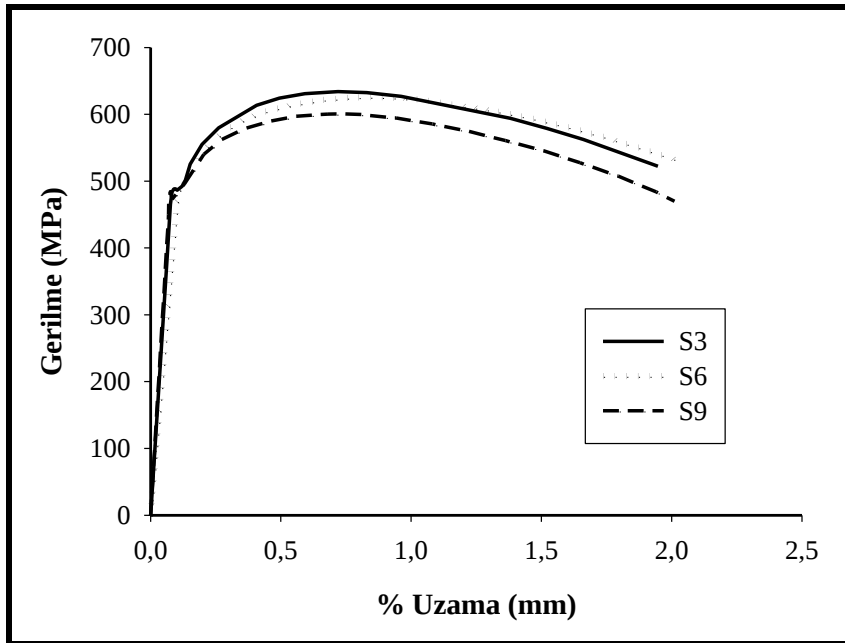
1300 dev/dk devir sayısı, 50 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S3, S6 ve S9 no' lu numunelerin çekme deneyi sonrasında elde edilen mekanik özellikleri Tablo 5.19' da gösterilmektedir. Şekil 5.50' de ise bu guruba ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Maksimum çekme değerleri sırasıyla 633.790, 600.344, 612.269 MPa olarak kaydedilmiştir. Her üç numunenin AISI 1020 çelik malzeme tarafından boyun vererek sünek bir şekilde kırıldığı, kırılmanın koni-çanak şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Bu kaynaklı bağlantıların maksimum çekme gerilmesi kıyaslandığında en iyi değer 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S3 no' lu numunede kaydedilmiştir. Yüksek sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantıların yüksek ısı girdisi arayüzey sıcaklığını A_3 sıcaklığı üzerine çıkarmaktadır. Bu sıcaklık artışı, AISI 1020 çelik tarafında önemli bir değişikliğe

sebepl olmamakla birlikte, AISI 2205 dubleks paslanmaz elik tarafında eksenel basıncın etkisi ile deformeşyon sertleşmesi sonucu mukavemet artışına neden olmaktadır. Sonuçta kırılmanın IEB’ ye bitişik AISI 1020 elik tarafında oluşmasına sebeb olduğu düşünölmektedir.

30, 40 ve 50 MPa eksenel basınç kullanılarak birleştirilen her üç guruba ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak maksimum çekme gerilme değerinde artış kaydedilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılar temelde aynı akma dayanımı sergilemiştir.

Tablo 5.19. S3, S6, S9 no’ lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	ekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S3	1300	8	50	100	4	633,790	2,421	44,993	393,471
S6		6			3	625,409	2,778	51,000	393,629
S9		4			2	600,344	2,238	51,233	215,103



Şekil 5.50. S3, S6, S9 no’ lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Sürtünme süresi ve sürtünme basıncının artması ile gerilme dayanımlarının arttığı belirli değerlerde maksimum olduğu ancak bu değerlerdeki artışın devamında bağlantı mukavemetinin düştüğü literatürde belirtilmiştir [16]. S3, S6 ve S9 no' lu kaynaklı bağlantılarda da sürtünme süresinin artması ile bağlantı mukavemetinin arttığı görülmektedir. Artan sürtünme basıncı ile düşük sürtünme sürelerinin kullanılması dışarı taşan malzeme miktarını azaltmakta ve ADB' nin genişlemesine neden olmaktadır (Şekil 5.18). Bu durum bağlantı mukavemetini olumsuz etkilemektedir.

Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği diğer numunelerle karşılaştırıldığında; artan sürtünme basıncı ile birlikte çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. 1300 dev/dk ile yapılan kaynaklı bağlantılarda sürtünme basıncının 30 MPa' dan 40 MPa' a çıkartılması ile kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları artarken, 40 MPa' dan 50 MPa çıkartılması ile artış devam etmiştir.

S3, S6, S9 no' lu numunelerin çekme deneyi sonunda elde edilen kırık yüzey fotoğrafları Şekil 5.51' de verilmiştir. Her üç numunenin AISI 1020 çelik malzeme tarafından boyun vererek sünek bir şekilde kırıldığı, kırılmanın koni-çanak şeklinde meydana geldiği görülmektedir.



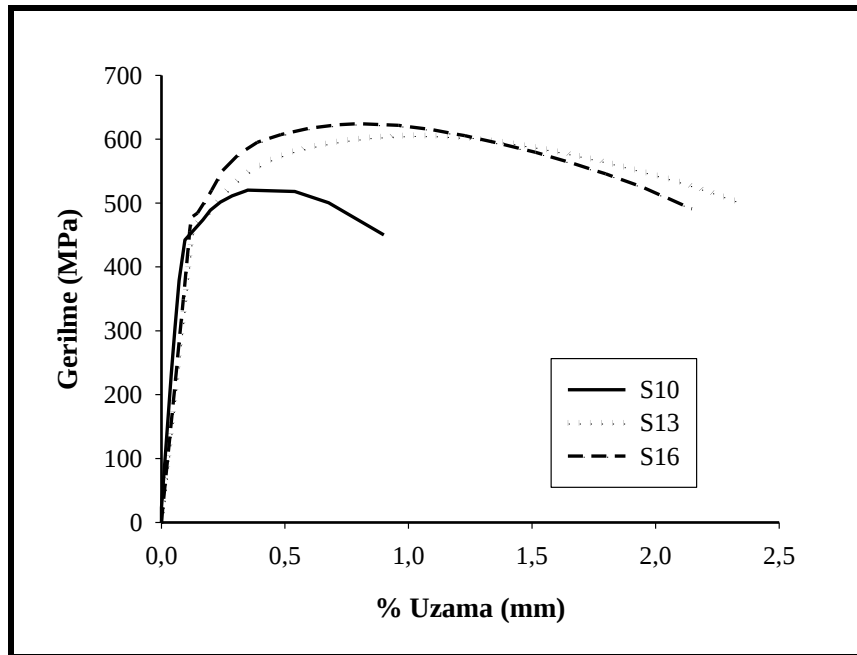
Şekil 5.51. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

5.4.1.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları

1500 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı ile 8, 6 ve 4 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S10, S13 ve S16 no' lu numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Tablo 5.20' de verilmiştir. Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 5.52' de gösterilmiştir. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait maksimum çekme dayanımları sırasıyla 520.219, 605.777 ve 623.994 MPa olarak kaydedilmiştir.

Tablo 5.20. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yıgma Bsc(MPa)	Yıgma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S10	1500	8	30	60	4	520,219	1,349	19,000	401,642
S13		6			3	605,777	1,754	26,612	347,509
S16		4			2	623,994	2,460	45,486	381,372



Şekil 5.52. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, azalan sürtünme süresi ile birlikte çekme dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. En yüksek çekme gerilmesi 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S16 no' lu numunede kaydedilmiştir. Sürtünme süresinin sırasıyla 4 ve 6 sn olduğu S13 ve S16 no' lu numunelerde çekme dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu ancak sürtünme süresinin 8 sn kullanıldığı S10 no' lu numunede, çekme dayanımının önemli oranda azaldığı görülmektedir. Bu durum, artan sürtünme süresine bağlı olarak arayüzeyde ulaşılan sıcaklık ve arayüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresini arttırması sonucu, AISI 1020 çelik tarafında temperleme etkisine sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Mukavemetli kaynaklı bağlantıların, sürtünme süresinin hem termomekanik etki hem de yapısal değişim üzerine olan etkisi göz önüne alındığında, maksimum devir minimum kaynak süresi kullanılarak elde edilebileceği tezini doğrulamaktadır.

Çekme testi sonrası kırık yüzeylere ait makro fotoğraflar Şekil 5.53' te gösterilmektedir. Bu fotoğraflar ve Şekil 5.52'de verilen gerilme-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, S13 ve S16 no' lu numunelerin sünek kırılma davranışı sergilediği görülmektedir. Şekil 5.53' te gösterilen fotoğraflar incelendiğinde, S10 no' lu numunede kesit daralmasının diğer numunelere göre daha az olduğu ve kırılmanın arayüzeyde başlayıp yaklaşık 45⁰' lik bir açı yaparak AISI 1020 çelik tarafında gevrek bir kırılma davranışı gösterdiği görülmektedir. S10 no' lu numunede kırılmanın arayüzeye çok yakın bir bölgede gerçekleşmesinin, artan sürtünme süresi nedeniyle meydana gelen yapısal değişikliklere bağlı olduğu düşünülmektedir. S13 ve S16 no' lu numunelerin ise boyun vererek AISI 1020 çelik tarafında ve sünek bir kırılma sergilediği görülmektedir. S16 no' lu numuneye ait kırık yüzey makro fotoğrafı S10 no' lu numune ile benzer bir görünüm sergilemesine rağmen S16 no' lu numunenin boyun vererek sünek bir kırılma davranışı sergilediği açıktır.



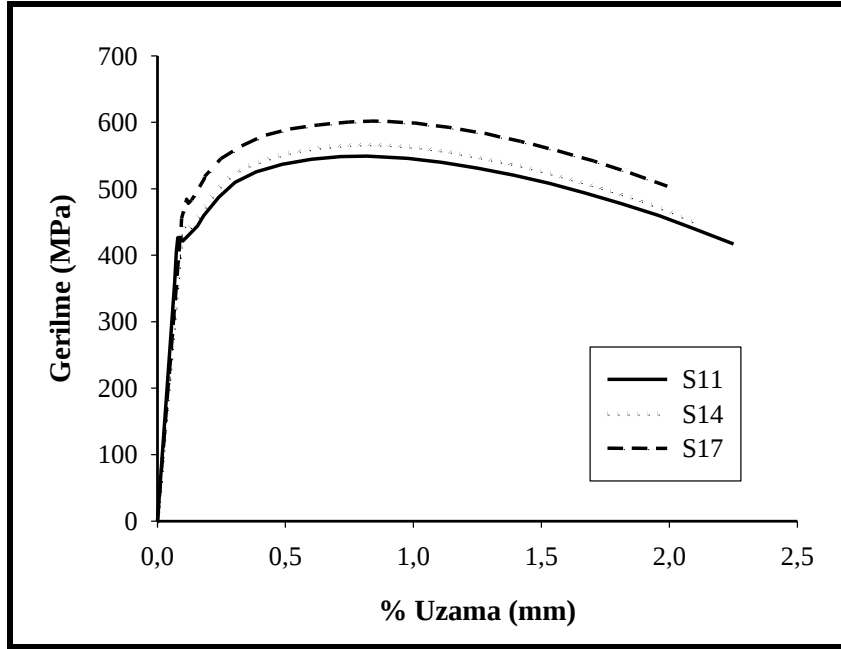
Şekil 5.53. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

1500 dev/dk devir sayısı 40 MPa sürtünme basıncı ve 8, 6 ve 4 sn sürtünme sürelerinin kullanıldığı S11, S14 ve S17 no' lu numunele ait mekanik değerler Tablo 5.21' de gösterilmiştir. Çekme testi ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 5.54' te verilmiştir.

Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, sürtünme süresinin azalması ile maksimum çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Literatürde artan sürtünme sürelerinin kaynak arayüzeyinde ADB' de meydana getirdiği yapısal değişim nedeni ile çekme mukavemet değerlerini azalttığı bildirilmiştir [34]. Bu durum, sürtünme süresindeki değişimin termo-mekanik etki ve bu etkiye bağlı meydana gelen yapısal değişim üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait maksimum çekme gerilmesi değerleri sırasıyla 549.001, 566.199 ve 601.303 MPa olarak kaydedilmiş olup en yüksek akma gerilmesi değerinin 4 sn sürtünme süresinin kullanıldığı S17 no' lu numunede 467.702 MPa olduğu görülmektedir.

Tablo 5.21. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S11	1500	8	40	80	4	549,001	2,778	64,399	396,785
S14		6			3	566,199	2,365	57,098	371,293
S17		4			2	601,303	2,238	53,986	368,373



Şekil 5.54. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Bu numuneler bir önceki grupta bulunan numunelerle kıyaslandığında, artan sürtünme basıncına bağlı olarak çekme gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun, artan sürtünme basıncına bağlı olarak arayüzeyde ulaşılan sıcaklık, dışarı taşan malzeme miktarında artış ve genişlemiş IEB ile birlikte şiddetli termo-mekanik etki sonucu tanelerin yönlenmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Literatürde, malzeme eksenine paralel olmayan yönelmelerin bağlantının mekanik davranışları üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [72]. Sürtünme kaynaklı bağlantıların kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde, tanelerin malzeme eksenine dik doğrultuda yönlendikleri mikroyapı

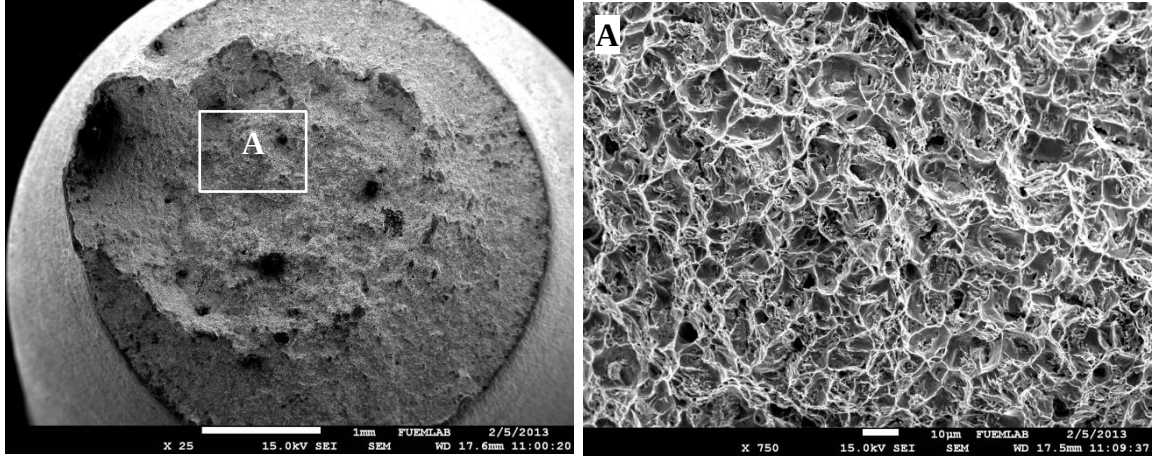
incelemelerinde gösterilmiştir. Artan sürtünme basıncı nedeni ile çekme gerilmesi değerlerinin düşmüş olması nedeni ile sürtünme basıncının ve sürtünme süresinin birbirine uygun seçilmesi ile çekme dayanımının arttırılabileceği ancak, en iyi sonuçların devir sayısı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncının birbirine uygun seçilerek elde edilebileceği görülmektedir.

S11, S14 ve S17 no' lu kaynaklı numunelerin çekme testi sonunda kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.55' te gösterilmektedir. Kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde, her üç numunenin boyun vererek koni çanak oluşumu ile sünek bir kırılma davranışı sergiledikleri görülmektedir. Bu kaynaklı bağlantılara ait çekme testi sonrası yüzey makro fotoğrafı incelendiğinde, kırılmanın AISI 1020 çelik tarafında meydana geldiği açıktır.



Şekil 5.55. S11, S14 ve S17 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

Çekme testi sonunda S11 no' lu numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.56' da gösterilmektedir. SEM fotoğrafta da açıkça görüldüğü gibi, gamze şekilli çukurcukların yoğun olarak bulunduğu, kırılmanın yarı bölünme şeklinde sünek bir davranış sergileyerek ortaya çıktığı tespit edilmiştir.



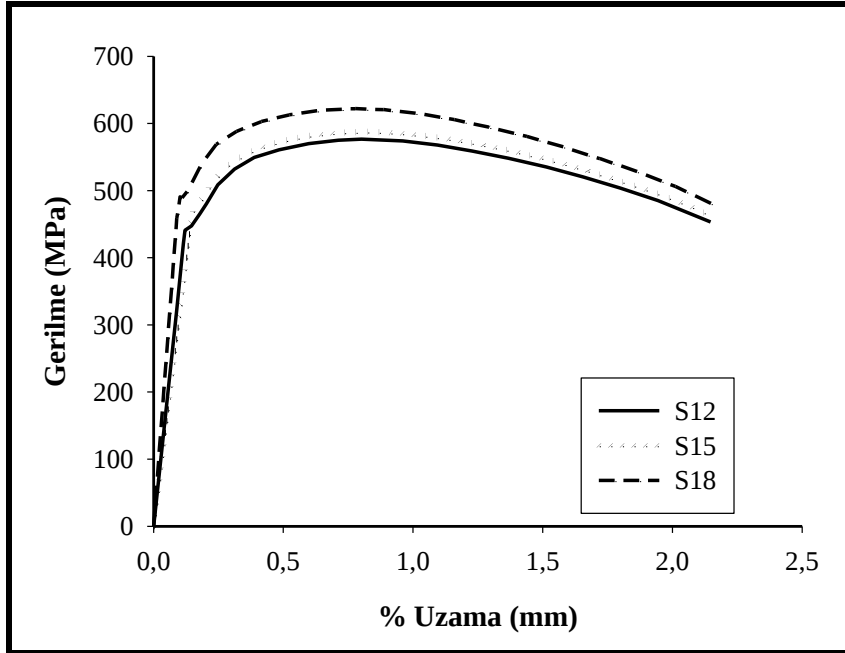
Şekil 5.56. S11 no' lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

1500 dev/dk devir sayısı, 50 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S12, S15, S18 no' lu numunelere ait çekme mukavemet değerleri Tablo 5.22' de verilmiştir. Kaynaklı bağlantılara ait gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.57' de gösterilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait maksimum çekme gerilmesi değerleri incelendiğinde, azalan sürtünme süresi ile çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu numunelere ait maksimum çekme gerilmeleri sırasıyla 576.390, 587.370, 621.606 MPa olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte sürtünme süresi sırasıyla 8 ve 6 sn olan S12 ve S15 no' lu numunelerin akma dayanımlarının hemen hemen birbirlerinin eşit olduğu ancak sürtünme süresinin 4 sn olan S18 no' lu numune akma dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çekme gerilmesi değerleri bir önceki grupla kıyaslandığında artan sürtünme basıncı ile birlikte çekme gerilmesinin arttığı görülmektedir. Bu durumun, artan sürtünme basıncı nedeni ile kaynak arayüzeyinden daha fazla malzemenin dışarı taşması ve ADB bölgesinin daralması aynı zamanda daha düzenli bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 5.22. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S12	1500	8	50	100	4	576,390	2,273	42,016	352,278
S15		6			3	587,370	2,302	56,879	317,975
S18		4			2	621,606	2,683	52,160	421,209



Şekil 5.57. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait çekme testi sonrasında kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.58' de gösterilmektedir. Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi sonucunda kaynak bölgesi dışından kopması istenmektedir. Her üç malzeme çiftinde kopmanın birleşme bölgesi dışında ancak birleşme bölgesine yakın AISI 1020 çeliğinin ısıdan etkilenen ince taneli bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. Kopmanın koni çanak oluşumu ile sünek bir şekilde gerçekleştiği, kırık yüzeylerin lifli mat bir görünüme sahip oldukları görülmektedir.



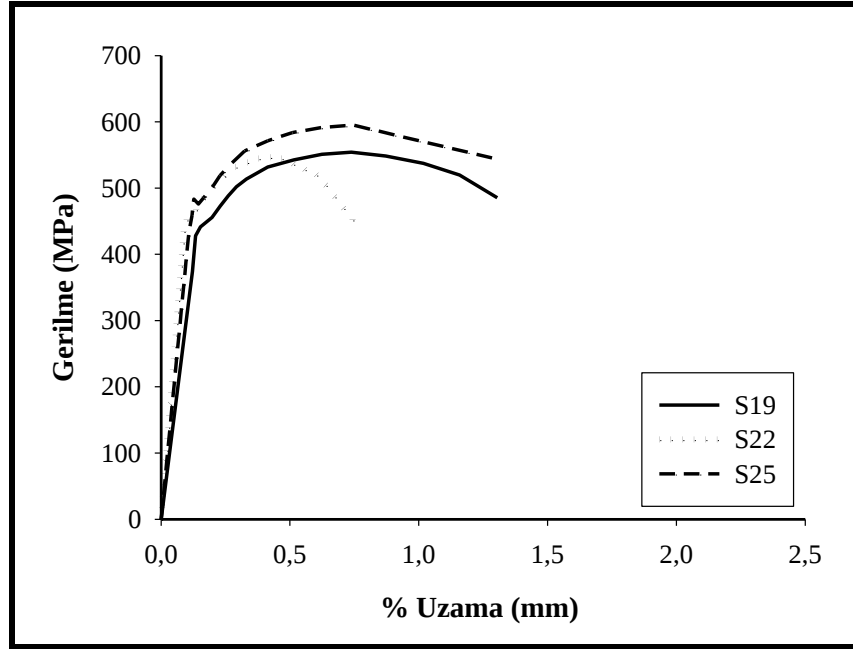
Şekil 5.58. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

5.4.1.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Çekme Test Sonuçları

1700 dev/dk devir sayısı 30 MPa sürtünme basıncı, 8, 6 ve 4 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S19, S22, S25 no' lu numunelerin çekme testi sonunda, elde edilen mekanik değerleri Tablo 5.23' te gösterilmektedir. Bu numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 5.59' da verilmiştir. Bu gruptaki numunelere ait maksimum gerilme değerleri sırasıyla 554.347, 547.343 ve 595.198 MPa olarak kaydedilmiş olup, sonuçların birbirlerine çok yakın çıktığı görülmektedir. Çelik ve Ersözlü [21], sürtünme kaynaklı numunelerde aynı gruptaki metallerin çekme dayanımlarının birbirine çok yakın çıktığını ifade etmişlerdir.

Tablo 5.23. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S19	1700	8	30	60	4	554,347	1,690	36,532	376,833
S22		6			3	547,343	1,421	31,662	386,636
S25		4			2	595,198	1,730	32,212	383,637



Şekil 5.59. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Şekil 5.59' da verilen gerilme-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, sürtünme süresinin kademeli olarak azalması ile gerilme değerinin yükseldiği görülmektedir. Grafikte, en yüksek gerilme değeri 4 sn sürtünme süresinin kullanıldığı S25 no' lu numunede 595.198 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu grafiklerden de açıkça görüldüğü gibi sürtünme süresinin azalması ile gerilme değerlerinin arttığı ve azalan sürtünme süresine bağlı olarak maksimum çekme gerilmesi değerleri arasındaki farkın da azaldığı görülmektedir. Bu sonucun, artan sürtünme süreleri ile deforme olan bölge ve IEB' nin genişlemesine neden olduğu, yüksek devir sayıları kullanıldığında azalan sürtünme

sürelerinin seçilmesinin mukavemet değerlerini artacağı literatürde de bildirilmiş olup kaynakların yeterli basınç altında tamamlanması gerektiği vurgulanmıştır [13]. Bu grup içindeki numunelerin maksimum çekme gerilmesi diğer gruplarla karşılaştırıldığında, artan devir sayısı ile birlikte arayüzeyde sıcaklığın etkisi ile meydana gelen ve mukavemet değerlerini olumsuz etkileyen viskoz haldeki malzemenin dışarı atılabilmesi için yüksek sürtünme basıncı kullanılması ve yüksek devirlerde düşük sürtünme sürelerinin seçilmesi ile daha iyi mukavemet değerlerinin elde edilebildiği düşünülmektedir.

S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.60' ta gösterilmektedir. Her üç numunede kaynak arayüzey çizgisine çok yakın bir bölgede ve düşük miktarda plastik şekil değiştirerek kırıldığı görülmektedir. Kırık yüzeyler ise parlak görünümlü olup kırılmanın gevrek kırılma şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 5.60. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

Çekme testi sonunda kopan parçalara ait makro fotoğraflar incelendiğinde, sürtünme basıncının 30 MPa kullanıldığı S13 ve S16 no' lu numuneler dışındaki S1, S4, S7, S10, S19, S22, S25 no' lu numunelerde kırılmanın boyun vermeksizin gevrek bir şekilde

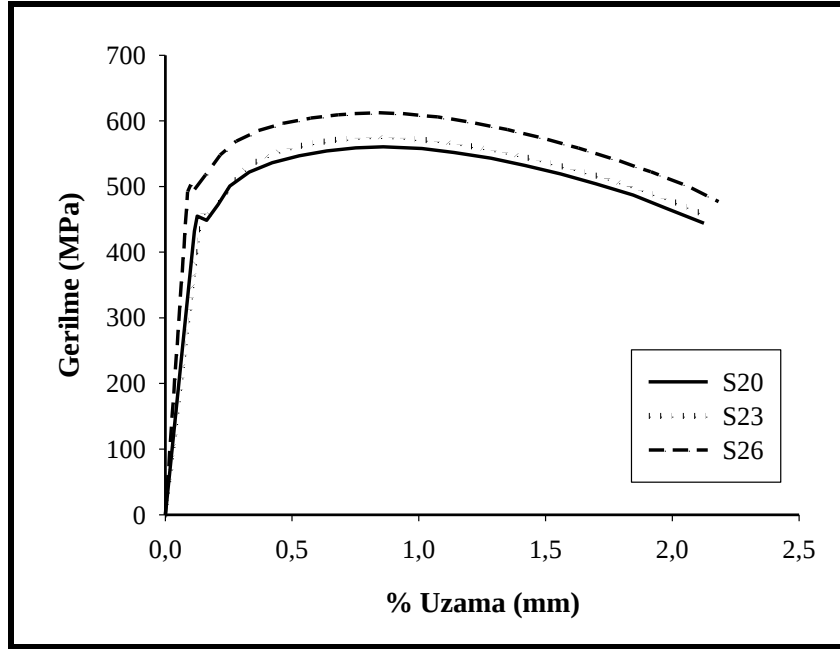
meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.46, 53 ve 60). Sürtünme basıncının arttırılması ile birleştirilen diğer numunelerin, çekme testi sonunda kopan parçaları incelendiğinde ise, kırılmanın boyun vererek koni-çanak oluşumu sonucunda sünek bir davranış sergileyerek ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 5.47-60). Bu nedenle, sürtünme basıncının devir sayısı ve sürtünme süresi ile uyumlu olması gerektiği aksi takdirde bağlantı mukavemetinin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Elde edilen mekanik test sonuçlarında, mukavemetli kaynaklı bağlantılar elde etmek için devir sayısı, sürtünme süresi ve sürtünme basıncının uyumlu seçilmesi gerekir. Özetle, maksimum devir minimum kaynak süresi ve arayüzeyin sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandını dışarı atacak seviyede eksenel basıncın kullanılması durumunda mukavemetli kaynaklı bağlantıların elde edileceği düşünülmektedir.

1700 dev/dk devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S20, S23, S26 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen mekanik değerler Tablo 5.24' te gösterilmiştir. Bu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 5.61' de verilmiştir. Bu numunelere ait maksimum çekme dayanımları sırasıyla 560.114, 574.616 ve 611.798 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 5.61' de verilen gerilme-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, S20, S23 ve S26 no' lu numunelerde artan sürtünme süresi ile maksimum çekme gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun artan sürtünme süresi ile deforme olan bölgenin genişlemesi ve IEB' nin büyümesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

30 MPa basınç ile birleştirilmiş, bir önceki gurubta bulunan S19, S22 ve S25 no' lu numunelerle kıyaslandığında ise artan eksenel basınç (40MPa) ile birlikte maksimum gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Diğer taraftan; 1500 dev/dk devir sayısı ve 40 MPa basınç ile birleştirilen bir önceki seride bulunan S11, S14 ve S17 no' lu numunelere göre aynı sürtünme basıncı ancak daha yüksek devir sayısı (1700 dev/dk) kullanılarak birleştirilen bu numunelerde (S20, S23 ve S26) maksimum çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni artan devir sayısı ve artan sürtünme basınçlarının arayüzeyde olumsuzluk meydana getirebilecek yapıların viskoz haldeki malzeme ile birlikte dışarı atılmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.24. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc.(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S20	1700	8	40	80	4	560,114	2,341	56,660	405,861
S23		6			3	574,616	2,246	57,966	356,873
S26		4			2	611,798	2,429	44,746	441,312



Şekil 5.61. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

S20, S23 ve S26 no' lu numunelerin çekme testi sonunda kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.62' de gösterilmektedir. Kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde, AISI 1020 çelik tarafında IEB' ye yakın bir bölgeden kırıldıkları görülmüştür. Kırılmanın koni-çanak oluşumu ile her üç numune sünek bir şekilde meydana geldiği görülmektedir. Kırılma yüzeyleri mat ve lifli görünümündedir.

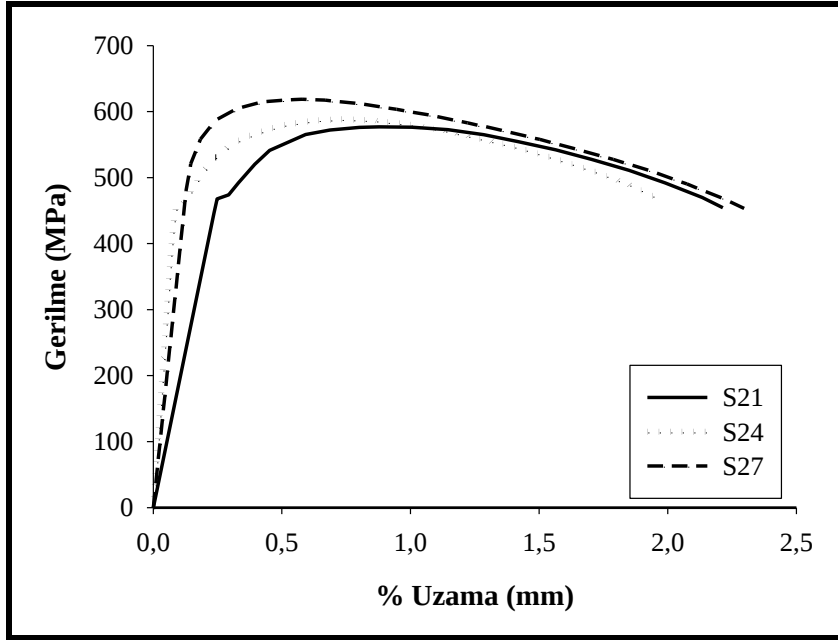


Şekil 5.62. S20, S23 ve S26 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

1700 dev/dk devir sayısı, 50 MPa sürtünme basıncı, üç farklı sürtünme süresi kullanılarak (8, 6 ve 4 sn) birleştirilen S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait çekme testi sonuçlarından elde edilen mekanik değerler Tablo 5.25' te gösterilmiştir. Bu guruba ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 5.63' te verilmiştir. Çekme mukavemet değerleri sırasıyla 576.572, 588.189 ve 618.335 MPa olarak kaydedilmiştir. Azalan sürtünme süreleri ile çekme mukavemet değerlerinin arttığı görülmektedir. Buradaki artışın sebebinin, azalan sürtünme süresi ile birlikte kaynak arayüzey sıcaklığındaki azalmaya ve buna bağlı oluşan arayüzey malzemesinin miktarındaki düşüşe bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir.

Tablo 5.25. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait çekme deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					MEKANİK ÖZELLİKLER			
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması	Elastisite Modülleri
S21	1700	8	50	100	4	576,572	2,333	47,196	378,867
S24		6			3	588,189	2,333	49,353	390,304
S27		4			2	618,335	2,488	49,770	393,656



Şekil 5.63. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Bu numuneler bir önceki grupta kıyaslandığında, sabit devir sayısı (1700 dev/dk) ve sabit sürtünme süresi kullanılması halinde sürtünme basıncının artırılması ile çekme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, kaynak arayüzeyinde viskoz hale gelen ve mukavemet değerlerini olumsuz olarak etkileyen yapının artan eksenel basınç ile uzaklaştırılmasından kaynaklanmaktadır.

1700 dev/dk ile birleştirilen S19 – S27 no' lu numuneler arasında en yüksek çekme gerilmesi değerlerinin düşük sürtünme süreleri kullanıldığında elde edildiği görülmektedir (Şekil 5.59, 61 ve 63). Bu nedenle, literatürde de belirtildiği gibi yüksek devir sayılarının

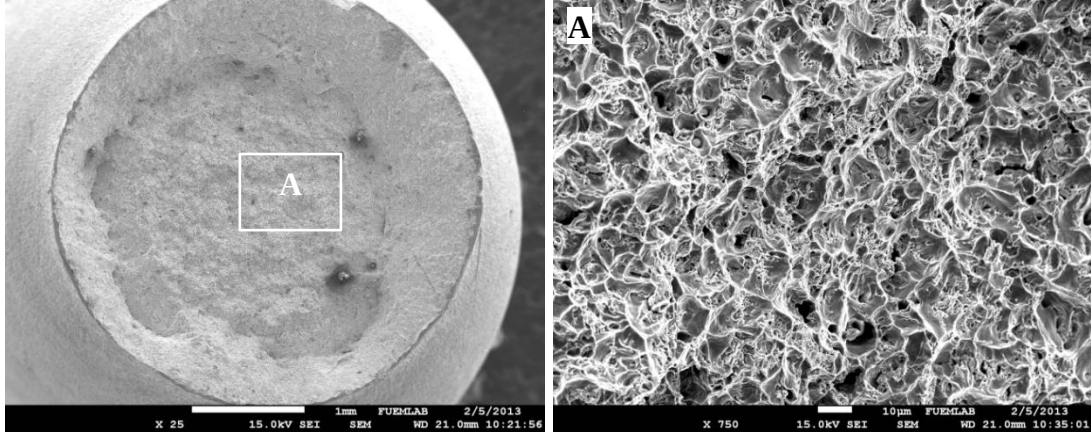
kullanılması durumunda, sürtünme süresinin mümkün olduğunca kısa tutulması gerekmektedir [13]. Yüksek devir sayıları ile birlikte yüksek sürtünme sürelerinin kullanılması ise bağlantı kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Düşük devir sayılarının kullanılmasında ise bağlantı kalitesini arttırabilmek için sürtünme süresi arttırılmalıdır. Ancak yüksek devir ve düşük sürtünme sürelerinde en iyi kaynak dikişleri elde edildiği literatürde bildirilmiştir [13,80].

S21, S24, S27 no' lu numunelerin çekme testi sonunda kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.64' te gösterilmiştir. Makro fotoğraflar incelendiğinde, her bir numunenin AISI 1020 çelik tarafında, IEB' ye yakın bir bölgeden ve koni çanak oluşumu ile sünek bir kırılma sergilediği, kırık yüzeylerin lifli, mat bir görünüme sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 5.64. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait çekme testi sonunda elde edilen kırık yüzey makro fotoğrafları

Çekme testi sonucunda S21 no' lu numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.65' te gösterilmektedir. SEM fotoğrafı incelendiğinde, kırılmanın gamze şekilli çukurcukların yoğun olarak bulunduğu, sünek bir davranış sergileyerek ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.65. S21 no' lu numunenin çekme testi sonunda kırık yüzey SEM fotoğrafları

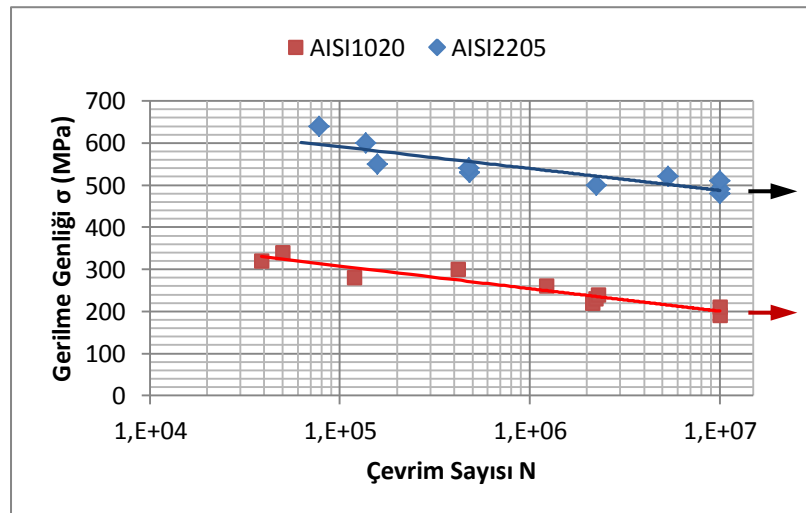
1300, 1500 ve 1700 dev/dk ile yapılan kaynaklı bağlantılarda, maksimum çekme gerilmelerisinin sırası ile 633, 623 MPa ve 618 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek çekme dayanımı S3 no' lu numunede elde edilmiştir. Bu değerin ana malzeme (AISI 1020) çekme dayanımından % 3.767 daha fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte en düşük çekme gerilmesi değerlerinin devir sayılarına (1300, 1500 ve 1700 dev/dk) bağlı olarak ile sırasıyla 487, 549 ve 547 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük çekme dayanımı S7 no' lu numunede elde edilmiş olup bu sonucun, ana malzeme (AISI 1020) maksimum çekme dayanımından % 20 daha düşük olduğu görülmüştür. S. Çelik ve Ersözlü [21], sürtünme kaynaklı bağlantılarında çekme dayanımlarının esas malzeme çekme dayanımlarının % 6 üzerinde olduğunu ve en düşük çekme dayanımının ise % 1,9 daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

1500 ve 1700 dev/dk devir sayılarının kullanıldığı numunelerde sürtünme süresinin azalması ile birlikte kaynaklı bağlantı mukavemetinin arttığı görülmüştür. Ancak 1300 dev/dk devir sayısının kullanıldığı numunelerde azalan sürtünme süresi ile kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir. Düşük devir sayılarının kullanılması durumunda sürtünme süresinin yüksek olması gerektiği ancak bu şekilde iyi sonuçların elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu durum birleşme arayüzeyinde viskoz hale gelen malzemenin dışarı atılabilmesi için gerekli sürenin yüksek devir kullanılarak birleştirilen numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. En iyi kaynaklı bağlantıların ise devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin birlikte değerlendirilerek elde edilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde; kaynak parametrelerinin çok dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir.

5.4.2. Yorulma Deney Sonuçları

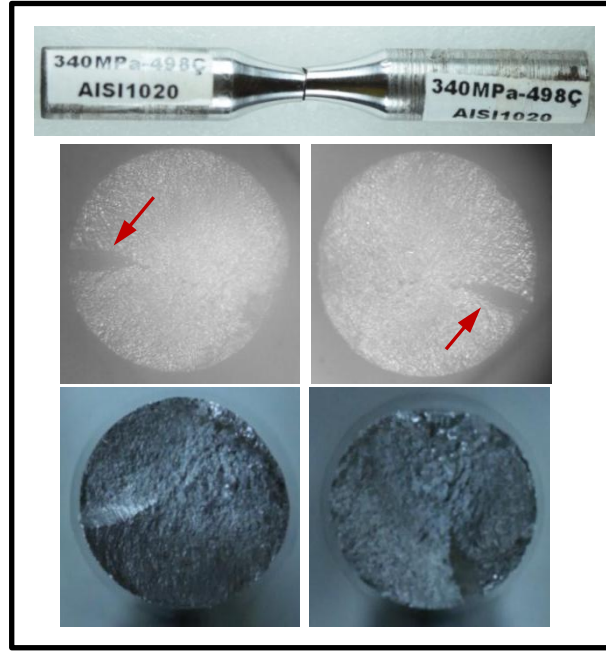
Endüstriyel uygulamalarda, tekrar eden gerilme veya şekil değişimine maruz kalan parçaların kullanılabilirliğine yorulma özellikleri ile daha iyi karar verilebilir. Bu amaçla; farklı parametreler kullanılarak, sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 2205 ve AISI 1020 malzeme çiftine ait kaynaklı bağlantılar için TS ISO 1143' e göre döner eğmeli yorulma deneyleri uygulanmıştır. Deneyler literatüre uygun olarak 10^7 çevrim sayısına ulaştığında durdurulmuştur. Yorulma özellikleri tamamen malzemenin kendine özgü özelliklerinden değil, numunenin özelliklerinden de etkilenmektedir. Yapılan deneylerde; şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makine parçasının bulunduğu ortam ve malzemenin içyapısı gibi değişik iç ve dış etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği bilinmektedir [20,60]. Bu nedenle yorulma numuneleri gerilme konsantrasyonu oluşturmayacak şekilde TS ISO 1143' te belirtilen ve her iki tarafı eşit yaylardan meydana gelen toroit şekilli numuneler kullanılmıştır.

İlk deneyler ana malzemeler için yapılmış ve yorulma sınırları tespit edilmiştir. Kullanılan AISI 1020 ve AISI 2205 ana malzemelere ait yorulma ömürlerini çevrim sayısına bağlı olarak gösteren S-N grafikleri (Wöhler eğrileri) birlikte Şekil 5.66' da gösterilmiştir. AISI 1020 ana malzemeye ait yorulma sınırı 210 MPa, AISI 2205 malzemenin yorulma sınırı 490 MPa olarak bulunmuştur.

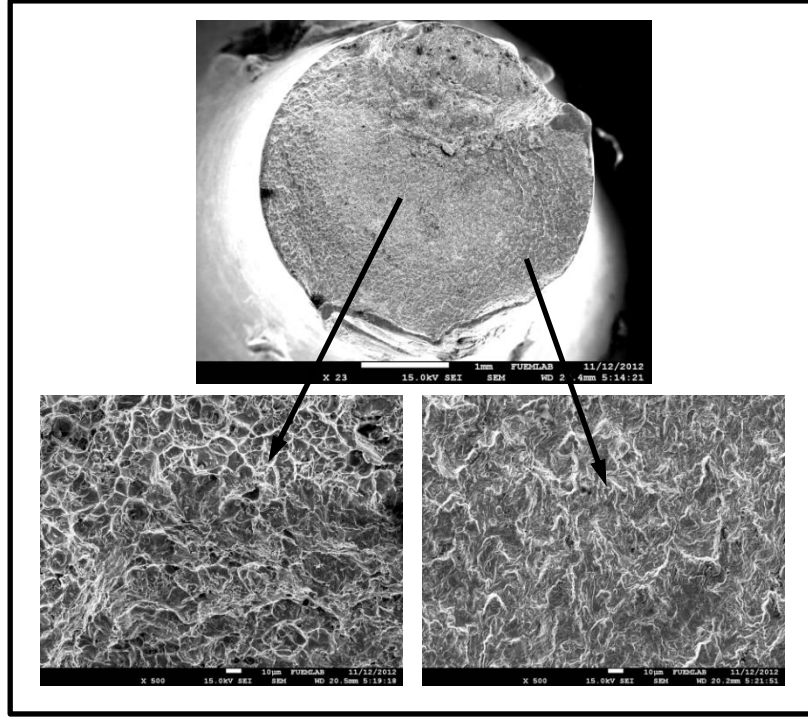


Şekil 5.66. AISI 1020 ve AISI 2205 çeliklerine ait Wöhler Eğrisi

Deneylerde kullanılan AISI 1020 malzemenin, 340 MPa gerilme değeri altında yorulma deneyi sonunda kırılan numuneye ait fotoğraf, kırık yüzey makro fotoğrafları ile birlikte Şekil 5.67’ de gösterilmektedir. Esas metale ait numunelerde yorulma sonucu hasarın, kesitin dar olduğu bölgede meydana geldiği görülmüştür. Fotoğraflarda yorulma çatlaklarının oluştuğu yer net olarak görülmekte olup, çatlak başlangıcı ok işareti ile gösterilmiştir. Şekil 5.68’ de 180 MPa gerilme uygulanarak yorulma deneyi sonunda kırılan AISI 1020 malzemeye ait kırık yüzey SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflarda yorulma çatlak başlangıç bölgesi ve ani kırılma bölgesindeki değişimler ayrı ayrı gösterilmiştir. Çatlak başlangıç bölgesi birbirbirine sürtünen yüzeyler nedeni ile daha pürüzsüz görünürken ani kırılma bölgesinin daha lifli bir görünüm sergilediği görülmektedir.

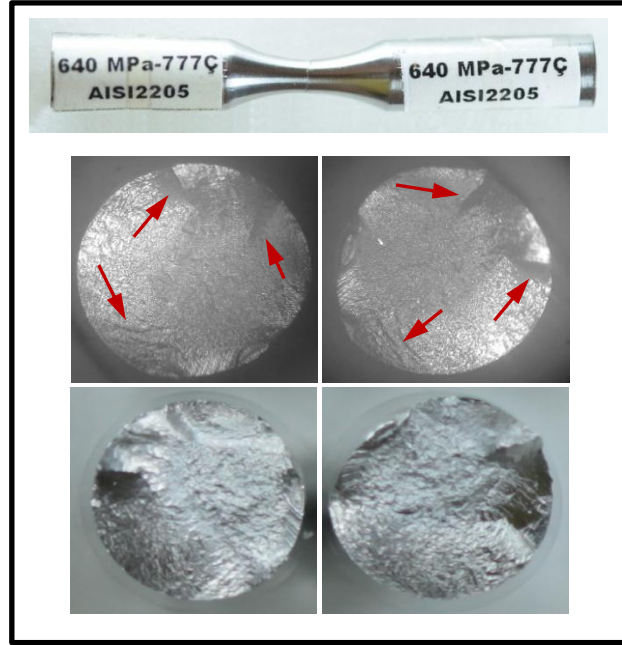


Şekil 5.67. Yorulma deneyi ile 340 MPa gerilme uygulanarak kırılan AISI 1020 malzeme ve kırık yüzeyleri

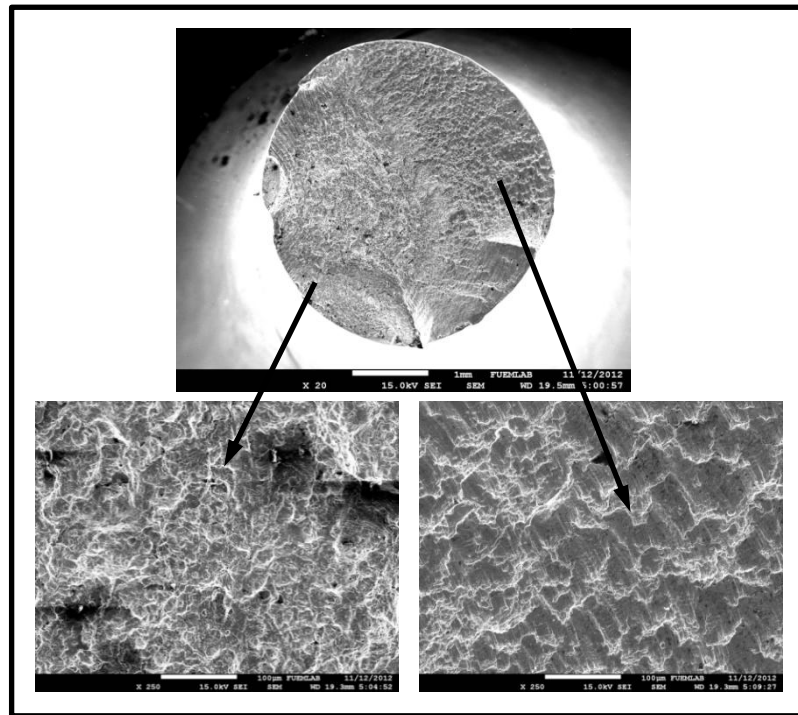


Şekil 5.68. Yorulma deneyi ile 180 MPa gerilme altında kırılan AISI 1020 malzeme SEM fotoğrafları

AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemenin 640 MPa gerilme değeri kullanılarak, yorulma deneyi sonunda kopan parçaları ve kırık yüzeylere ait makro fotoğrafları Şekil 5.69’ da gösterilmektedir. Kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde, çatlak başlangıcının üç ayrı noktada olduğu görülmektedir. Chai [15] dubleks paslanmaz çelik için çok yüksek döngülü yorulma testleri uygulamış ve yüzeydeki yorulma çatlaklarının başlangıcını; kayma bantlarının ekstrüzyonu nedeniyle, ferrit fazında başladığını belirtmiştir. Optik mikroskoptaki kararmış bölgelerde ostenitik ve ferritik fazlar arasında bir mikro çatlak uyumsuzluğu gözlemlemiştir. AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin 640 MPa gerilme değerlerinde, yorulma deneyi sonundaki kırık yüzey SEM fotoğrafları ise Şekil 5.70’ te görülmektedir.



Şekil 5.69. Yorulma deneyi ile 640 MPa gerilme altında kırılan AISI 2205 malzeme fotoğrafları



Şekil 5.70. Yorulma deneyi ile 640 MPa gerilme altında kırılan AISI 2205 malzeme SEM fotoğrafları

Kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesindeki mikro-mekanik hatalar, parçalarda yorulma çatlak oluşumuna ve hasara uğramasına neden olurlar [12]. Bununla birlikte kaynaklı bağlantılarda oluşan yorulma hasarlarının çoğunlukla kaynak bölgesine bitişik kısımlarda, kaynak başlangıç ve bitiş noktalarında, oluştuğu ve yorulma ömrünün yerel

gerilmelerin bileşenlerine bağlı olarak değiştiği literatürde bildirilmiştir [26]. Bu nedenle kaynak parametrelerinin yorulma ömrüne etkisinin incelenbilmesi amacıyla, yorulma kırılmalarının kaynak bağlantı çizgisinde oluşması gerekir. Bu amaç için uygun olan yorulma numunesi şekli toroit isimli parçalardır. Kullandığımız yorulma numuneleri toroit şekilli olarak hazırlanmış ve kaynak parametrelerinin yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Farklı üretim parametreleri kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen, kaynaklı bağlantıların yorulma sınırını belirlemek için döner eğmeli yorulma testi uygulanmıştır. Deneylerde döner eğmeli yorulma test makinesi kullanılmıştır. Yorulma sınır değerleri ve çevrim sayılarında, gerilme genliğine karşılık logaritmik çevrimler esas alınarak S-N grafikleri çizilmiştir. S-N grafikleri değişken devir sayısına bağlı olarak Şekil 5.71-86' da sırasıyla verilmiştir. Bu çalışmanın deneysel tasarım tablosunda 40 MPa kullanılarak birleştirilen S2, S5, S8, S11, S14, S17, S20, S23 ve S26 no' lu numuneler yorulma testine tabi tutulmamıştır.

5.4.2.1. 1300 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deney Sonuçları

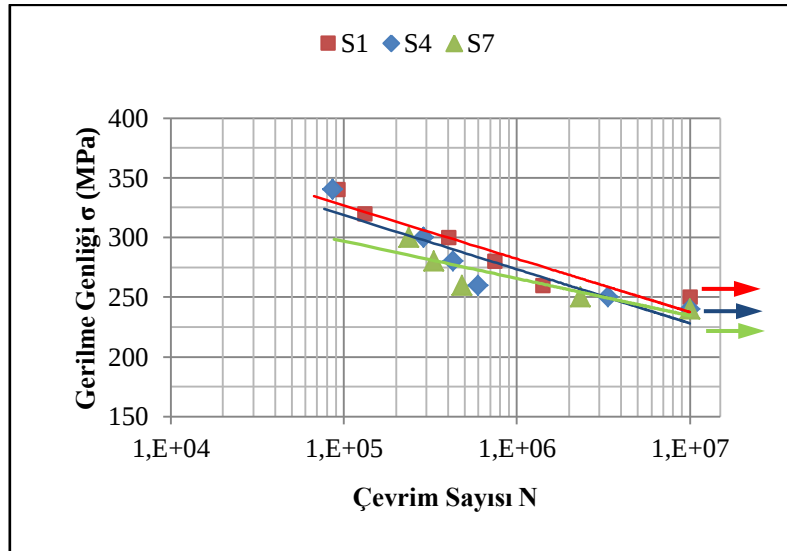
1300 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait yorulma sınırları Tablo 5.26' da verilmiştir. Bu numunelerin yorulma dayanımlarını gösteren S-N grafikleri Şekil 5.71' de verilmiştir.

S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait S-N grafikleri incelendiğinde, sürtünme süresinin azalması ile birlikte yorulma dayanımının azaldığı görülmektedir. 8 sn' lik sürtünme süresinin kullanıldığı S1 no' lu numunede 250 MPa çıkan yorulma sınırı, sürtünme süresinin sırası ile 6 ve 4 sn kullanıldığı S4 ve S7 no' lu numunelerde 240 MPa olarak kaydedilmiştir. Her üç numunenin ana malzeme AISI 1020 çelik malzemenin yorulma sınırından daha yüksek ancak birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu numunelere ait yorulma sınırının ana malzeme yorulma sınırından daha yüksek çıkmasının sebebinin, sürtünme kaynaklı bağlantılarda eksenel basınç etkisi ile tanelerin küçülmesine bağlı olarak sertlik değerlerindeki artış nedeni ile meydana geldiği düşünülmektedir. Ochi vd. [28], yaptıkları çalışmada sürtünme kaynak yöntemi kullanılarak yapılan birleştirmelerde, doğru parametre gurubunun seçilmesi ile ana malzemeye göre daha büyük yorulma sınırı elde etmenin mümkün olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte; S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait maksimum çekme gerilmesi değerlerinin ana malzeme

çiftlerinden biri olan AISI 1020 çeliğin çekme gerilmesinin altında olduğu görülmektedir. Bu nedenle, sürtünme kaynaklı bağlantılarda çekme gerilmesinin ana malzeme çekme gerilmesi değerlerinin altında çıkmasının yorulma sınırı açısından aynı etkiyi oluşturmadığı belirlenmiştir. Ancak, artan yüklerle birlikte yorulma mukavemet değerlerindeki değişimin çekme gerilmesi değerleri ile paralellik gösterdiği görülmüştür.

Tablo 5.26. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak arayüzey sertliği (HV)	Yorulma Sınırı (MPa)
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt. Bsc.(MPa)	Yığma Bsc.(MPa)	Yığma Süre.(sn)			
S1	1300	8	30	60	4	571,364	306	250
S4		6			3	605,076	275	240
S7		4			2	487,674	282	240



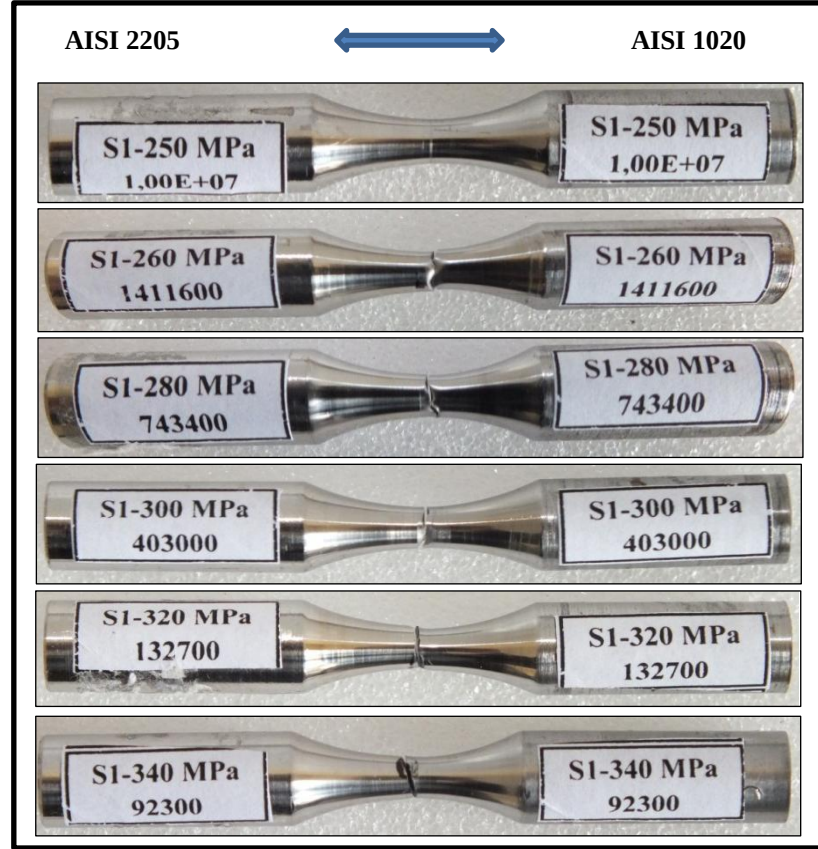
Şekil 5.71. S1, S4 ve S7 no' lu numunelere ait S-N grafikleri

S4 ve S7 no' lu numunelerde, yorulma sınırları 10^7 çevrimde aynı olmasına rağmen, daha yüksek sürtünme süresinin (6 sn) kullanıldığı S4 no' lu numunede, artan yüklerle birlikte, yorulma mukavemetinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 5.71). Bununla birlikte S1 no' lu numune yorulma sınırı, S4 no' lu numune yorulma sınırından daha fazla

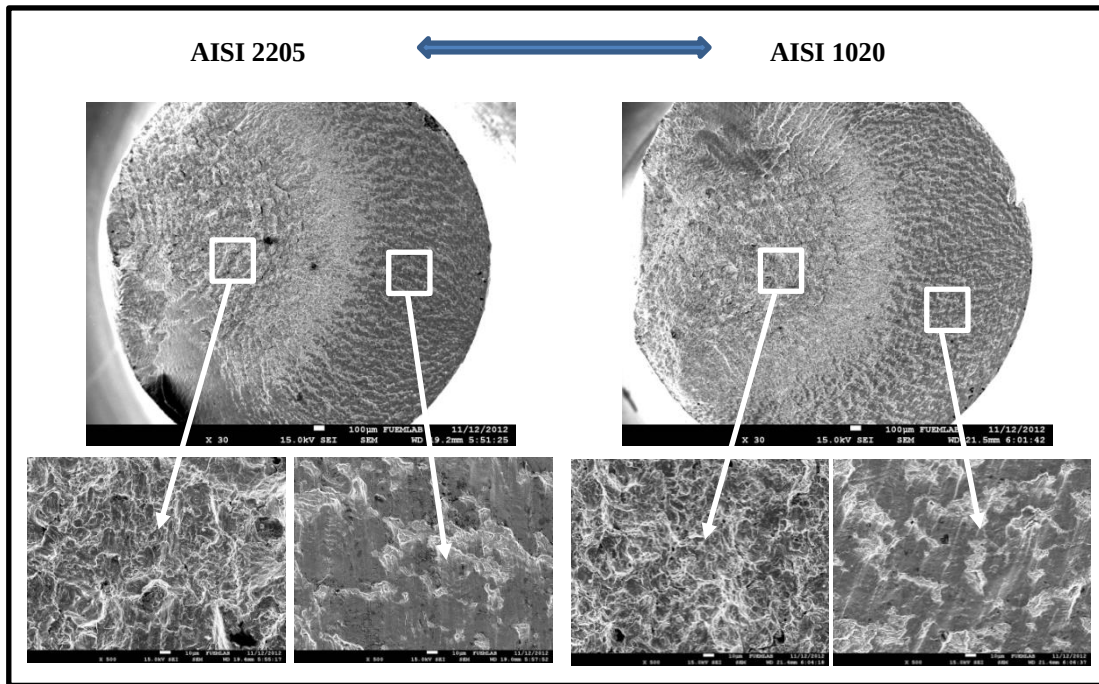
olmasına rağmen artan yüklerle, yorulma mukavemeti açısından benzer karakteristik özellikler sergiledikleri görülmektedir. Söz konusu her iki durum değerlendirildiğinde, 1300 dev/dk devir sayısı ve 30 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen bağlantılarda artan sürtünme süreleri ile daha kaliteli kaynaklı bağlantıların yapılabildiği tespit edilmiştir.

Malzeme kırık yüzeyleri özel bir öneme sahiptir ve mikro seviyedeki yetersiz birleşmelerin daha iyi anlaşılabilmesi için yorulma numunelerine ait kırık yüzey makro ve SEM fotoğrafları alınmıştır. S1 no' lu numunenin yapılan tüm yükleme değerlerinde, kopan parçalarına ait kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.72' de gösterilmektedir. Bu çalışmada, sürtünme kaynaklı numunelerin yorulma deneyi sonrasında iki malzemenin birleştirildiği ve kesitin daraltıldığı kaynak ara yüzeyinden koptuğu görülmektedir (Şekil 5.72). Kırılmanın kesitin dar olan kısmında meydana gelmesi literatür araştırmalarına uygun ve beklenen bir sonuçtur. Yapılan çalışmalarla, kaynaklı bağlantıların yorulma deneyi sonrasında kırılma bölgeleri incelendiğinde, kırılmanın bağlantının en zayıf ve hassas bölgesi olan ısıdan etkilenmiş bölgede ya da çentik olan yerden (birleşme hattı üzerinde) kırıldığı bildirilmiştir [76].

S1 no' lu numunenin 260 MPa gerilme altında kırılan yorulma numunesine ait SEM fotoğrafları Şekil 5.73' te gösterilmiştir. S1 no' lu numuneye ait SEM fotoğrafları incelendiğinde, her iki malzeme tarafında çatlak başlangıç bölgeleri parlak, ani kırılma bölgelerinin ise ağ şeklindeki bir yapıda, lifli bir görünüme sahip olduğu görülmektedir. Çatlak başlangıç bölgelerinde çatlağın başlangıcından itibaren karşılıklı iki metalin birbirine sürtünmesi nedeni ile yüzeyler daha düzgün görülmektedir.



Şekil 5.72. S1, no' lu numune yorulma deneyi sonrası kırık yüzey fotoğrafları

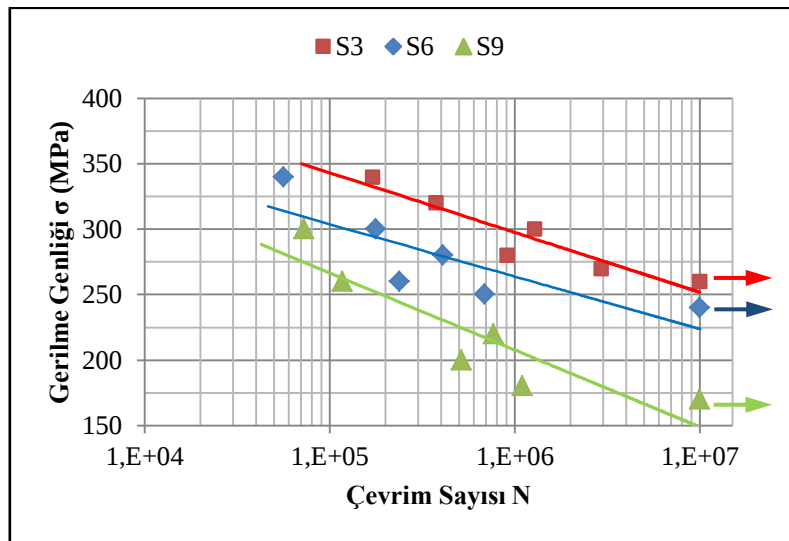


Şekil 5.73. S1 no' lu numune 260 MPa gerilim ile yapılan yorulma deneyi sonrası kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı, 50 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi kullanarak birleştirilen S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait yorulma sınırları Tablo 5.27' de verilmiştir. Lineer elastik kırılma mekaniğinde, kırılmanın çatlak veya entiğın olduğu bölgelerde başladığı kabul edilir. Buna göre, kaynaklı bağlantıların yorulma ömrü, kaynağın başlangıç ve bitiş noktalarındaki çatlak büyümesi dikkate alınarak yapılır ve kaynaklı bağlantılardaki çatlak ilerlemesinin, uygulanan gerilme ve çevrim sayısına bağlı olarak değiştiği kabul edilir. Bu nedenle; bu çalışmada da, yorulma grafikleri gerilme ve çevrim sayısına bağlı olarak çizilmiştir. S3, S6, S9 no' lu numunelere ait S-N grafikleri karşılaştırmalı olarak tek diyagramda şekil 5.74' te gösterilmiştir. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait yorulma sınırlarının sırası ile 260, 240 ve 170 MPa olduğu görülmektedir.

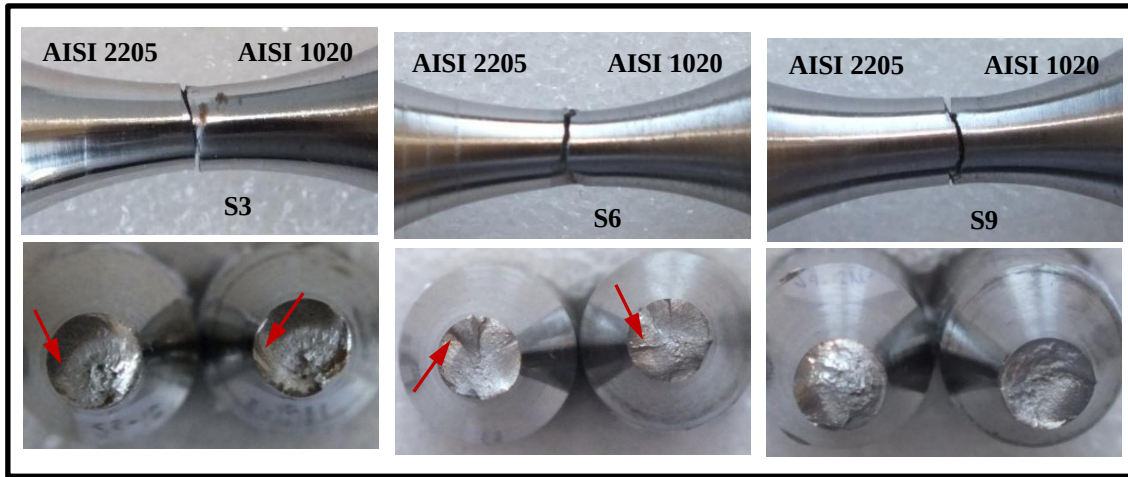
Tablo 5.27. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					ekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak arayüzey sertliği (HV)	Yorulma Sınırı (MPa)
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc.(MPa)	Yığma Süre.(sn)			
S3	1300	8	50	100	4	633,790	308	260
S6		6			3	625,409	296	240
S9		4			2	600,344	293	170



şekil 5.74. S3, S6 ve S9 no' lu numunelere ait S-N grafikleri

Şekil 5.74’ te verilen S-N grafiği incelendiğinde, sürtünme süresinin azalması ile birlikte yorulma sınırının azaldığı görülmektedir. S3 ve S6 no’ lu numunelerinin yorulma sınırlarının birbirine yakın olduğu ancak sürtünme süresinin 4 sn’ ye düşürüldüğü S9 no’ lu numunede yorulma sınırının hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. S9 no’ lu numunede yetersiz devir sayısı, düşük sürtünme süresi ve yüksek sürtünme basıncı nedeni ile kaynak dikişinde bir süreksizlik meydana geldiği ve bu süreksizliğin bir çatlak gibi davrandığı düşünülmektedir. Böylece ek gerilme yaratan yoğunlaşma ve yorulma çatlaklarının ilerlemesi ile deney numunesi kısa sürede hasara uğradığı görülmüştür. Şekil 5.75’ te S3, S6 ve S9 no’ lu numunelerin 300 MPa gerilme ile yorulma deneyi sonunda kırılan numunelere ait fotoğrafları verilmiştir. Şekil 5.75 incelendiğinde, S3 ve S6 no’ lu numunelerde yorulma çatlaklarının yüzeyde başlayarak numune eksenine dik doğrultuda ilerlediği görülürken S9 no’ lu numunede yüzeyde başlayan net bir çatlak görülmemesi bu sonucu doğrular niteliktedir.



Şekil 5.75. 300 MPa gerilme altında yorulma sonucu kırılan S3, S6 ve S9 no’ lu numuneler

S3 ve S6 no’ lu numunelerde yorulma sınırı ana malzeme (AISI 1020) yorulma sınırından daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin ise kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde pekleşme nedeni ile oluşan sertlik artışı olduğu düşünülmektedir. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, Ochi vd. [28] yaptıkları bir çalışmada sürtünme kaynaklı bağlantılarda, seçilen kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemetlerinin ana malzeme yorulma mukavemetinden daha yüksek olabileceği gibi daha düşük değerlerde de çıkabileceğini belirtmişlerdir. Yorulma ömrünün ana malzemeye

göre yüksek çıkmasının pekleşme nedeni ile meydana geldiğini, düşük çıkmasının ise sürtünme ısısına bağlı sertlikteki azalma olduğunu kaydetmişlerdir.

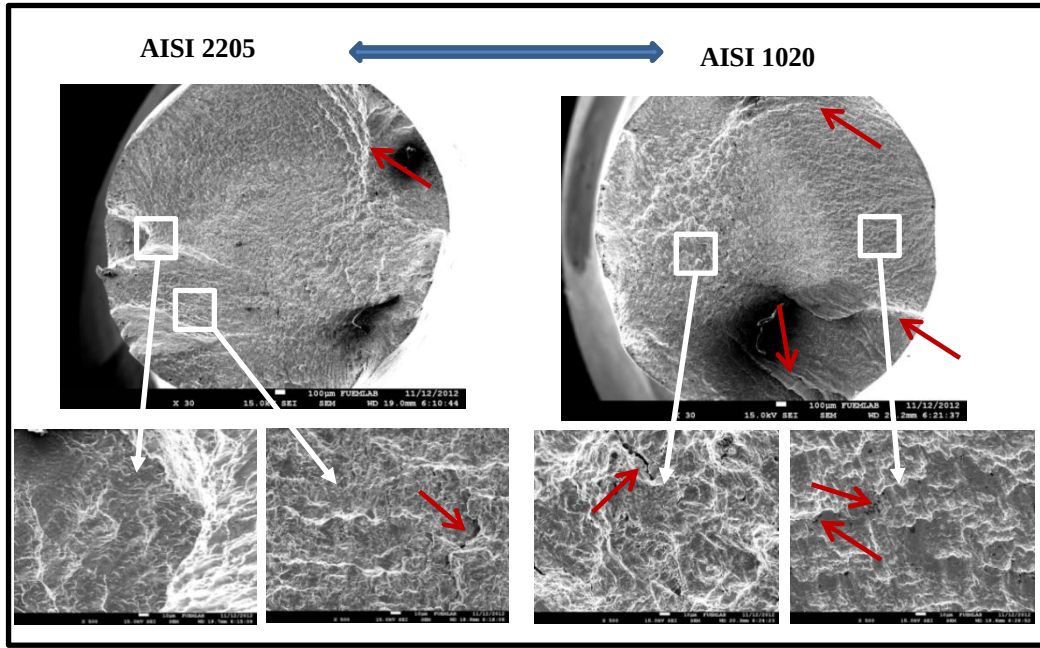
S3, S6 ve S9 no' lu numuneler bir önceki grupla karşılaştırıldığında, 1300 dev/dk devir sayısı, düşük sürtünme süresi ile birlikte yüksek sürtünme basıncının kullanılması yorulma sınırının önemli oranda azalmasına neden olduğu görülmektedir. Eksenel basıncının yüksek olması, malzemede fazla deformasyon oluşturur ve bu aşırı yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan inklüzyonlar arzu edilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenir. Bu durum kaynaklı bağlantının kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz olarak etkiler. Düşük olması ise elverişsiz şekillendirmeye dolayısıyla yüzeyler arasında tam bir bağlantının sağlanamamasına sebep olmaktadır [2,35]. Bu nedenle S9 no' lu numunede yorulma sınırının, AISI 1020 ana malzeme altında çıkmasının da diğer bir nedeni olabileceği düşünülmektedir.

Bununla birlikte yorulma dayanımları malzemelerin mikroyapıları, sertlikleri ve statik çekme dayanımları ile ilişkilidir. Genellikle sertlik ve çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma sınırı da yükselir. Dolayısıyla kaynaklı bağlantılarda da yorulma sınırı mikroyapı, sertlik ve çekme özellikleri ile ilişkili olarak değişmektedir [30]. Deneylerde elde edilen yorulma dayanımları, numunelerin çekme dayanımları ile birlikte değerlendirildiğinde yorulma dayanımının artan çekme dayanımlarıyla arttığı görülmektedir (Tablo 5.27). Bu sonuçlar literatür bilgileriyle de uygunluk göstermektedir.

1300 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen numunelerde en yüksek yorulma sınırı; 8 sn sürtünme süresinin kullanıldığı S1 ve S3 no' lu numunelerde elde edilmiştir. Sertlik ve çekme dayanımı da en yüksek çıkan bu deney numuneleridir. 1300 dev/dk devir sayısının kullanıldığı kaynaklı bağlantılarda, sürtünme süresinin azalması ile yorulma sınırının düştüğü görülmektedir.

Malzeme, parça boyutları ve şekli, ortam sıcaklığı ve yükleme şekli kırılma yüzeyi görünümünü değiştiren faktörlerdir. Deney boyunca parça şekli, ortam sıcaklığı ve yükleme biçiminin aynı olması nedeni ile numune kırık yüzeylerinin birbirlerine benzer görünüm sergiledikleri görülmektedir (Şekil 5.75). S3, S6 ve S9 no' lu numunere ait kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde; yorulma deneyleri boyunca bu gruba ait numuneler ve diğer guruplardaki kırılan numunelerin, kaynak ara yüzeyinden veya arayüzeye çok yakın bölgelerden koptukları tespit edilmiştir. Kaynak arayüzeyinden başlayan çatlağın AISI 1020 çelik tarafına doğru bir miktar ilerlediği görülmektedir (Şekil 5.75).

Kırık yüzey incelemelerinde makroskobik açıdan inceleme yapılarak kırık yüzeylerinin görünüşleri değerlendirmeye alınmıştır. Metalografik incelemelerde takip edilen ikinci yol kırık yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu ile (SEM) incelenmesidir. Bu inceleme kırığın tipini, sünek kırılma, gevrek kırılma veya hangi oranda sünek kırılmanın ortaya çıktığını belirlemek amacıyla yapılır [36]. Bu amaçla S9 no' lu numunenin 260 MPa gerilme altında yorulma deneyi sonucunda hasara uğrayan parçalarına ait kırık yüzey SEM fotoğrafları Şekil 5.76' da gösterilmiştir. SEM fotoğrafları üzerinde mikro çatlaklar oklar yardımı gösterilmektedir. AISI 1020 malzeme tarafında çatlak başlangıç bölgesindeki mikro çatlak sayısının AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafından daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun, malzemelerin sertlik ve mukavemet değerleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.76. S9 no' lu numunenin 260 MPa gerilim ile yapılan yorulma deneyi sonrası kırık yüzey SEM fotoğrafları

1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen bu numunelerin yorulma deneyinden sonra alınan kırık yüzey SEM fotoğraflarında; yorulma kırılmalarının tipik özelliği olan ve genellikle sünek malzemelerde belirgin olarak görülen yorulma çizgileri görülmektedir (Şekil 5.76). Bu numunelerde kullanılan devir sayısına (1300 dev/dk) bağlı olarak deformasyon miktarının düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5.76' de yorulma numunelerine ait kırık yüzey SEM fotoğrafları incelendiğinde çatlakların başladığı noktalar ile onu çevreleyen aynı merkezli eğriler ve bunların yanında taneli bir bölge görülmektedir.

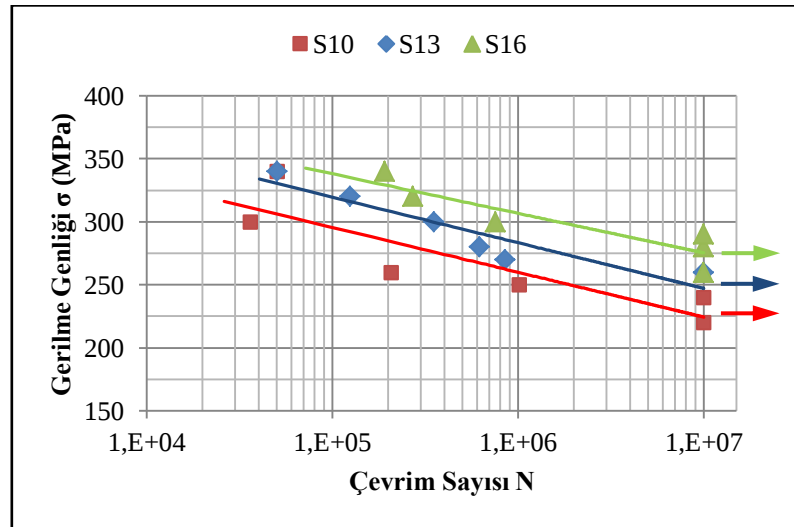
Taneli bölge ani kırılma bölgesi olup çatlağın ilerlemesi sonucunda geri kalan kesitin yükü taşıyamaz hale gelerek kırıldığı bölgedir. Çatlak başlangıç bölgesinde ise çatlak zamanla yüke bağlı olarak yavaş yavaş ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucu kırık yüzeyler taneli ve parlak görünüştedirler.

5.4.2.2. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deney Sonuçları

1500 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı ile 8, 6 ve 4 sn sürtünme sürelerinin kullanıldığı S10, S13 ve S16 no' lu numunelerin yorulma sınırları Tablo 5.28' de verilmiştir. Bu numunelere ait S-N grafikleri ise Şekil 5.77' de gösterilmiştir.

Tablo 5.28. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak arayüzey sertliği (HV)	Yorulma Sınırı (MPa)
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt. Bsc.(MPa)	Yıgma Bsc.(MPa)	Yıgma Süre.(sn)			
S10	1500	8	30	60	4	580,073	272	240
S13		6			3	605,777	272	260
S16		4			2	623,994	282	280



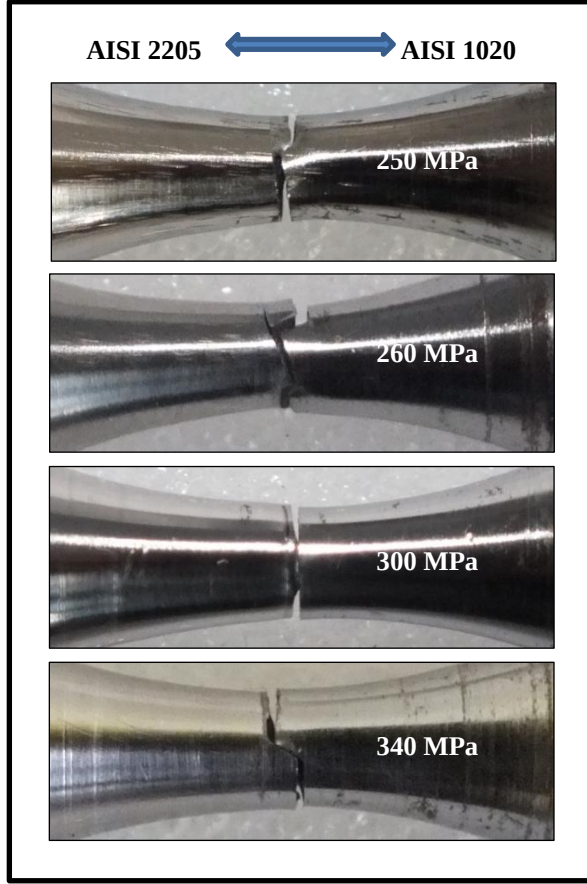
Şekil 5.77. S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait S-N grafikleri

S10, S13 ve S16 no' lu numunelere ait S-N grafikleri incelendiğinde, yorulma sınırının azalan sürtünme süresi ile birlikte kararlı bir şekilde arttığı görülmektedir. En yüksek yorulma sınırı sürtünme süresinin 4 sn olarak seçildiği S16 no' lu numunede 280 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu gruptaki diğer S10 ve S13 no' lu numunelerin yorulma sınırları ise sırası ile 240 ve 260 MPa olduğu görülmektedir. Devir sayısının sürtünme kaynaklı bağlantı arayüzey sıcaklığı üzerindeki önemli etkisi bilinmektedir. Artan devir sayısı ile birlikte bağlantı arayüzey sıcaklığı artmaktadır. Eksenel basınç etkisi ile kaynaklı bağlantı arayüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonun söz konusu bu yükselen sıcaklıkta meydana gelmesi durumunda ise, malzemelerin birincil katılaşma sırasında oluşmuş boşluk ve gözenekleri kapanır. Bunun yanında iri ve çubuksu taneler de kırılarak, yeniden kristalleşme neticesinde kaba döküm yapısı yerini ince taneli, homojen bir içyapıya bırakır. Bu sayede akma dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler görülür [75]. Bu durum S16 no' lu numunede yorulma sınırının yüksek olmasının temel nedenidir. Ancak, kaynak arayüzey sıcaklığının belirli değerler üzerine çıkması, sürtünme kaynaklı bağlantıların arayüzeyinde ADB bölgesinin genişlemesine ve bağlantı mukavemetinin olumsuz olarak etkilenmesine neden olmaktadır. Söz konusu durum; sürtünme süresinin S16 no' lu numuneye göre daha yüksek kullanıldığı S10 ve S13 no' lu numunelerde görülmektedir. Sürtünme süresinin sırasıyla 8 ve 6 sn seçildiği S10 ve S13 no' lu numunelerde ADB' nin S16 no' lu numuneye göre geniş olması bu numunelerin yorulma sınırının S16 no' lu numuneden daha düşük çıkmasına neden olmuştur (Şekil 5.20).

S10, S13 ve S16 no' lu numunelerin yorulma dayanımları, bu numunelerin çekme ve kaynak arayüzeyinden ölçülen mikrosertlik sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde yorulma sınırının artan çekme dayanımı ve artan sertlik değerlerine paralel değiştiği görülmektedir.

S10 no' lu numunede sırası ile 250, 260, 300 ve 340 MPa gerilme değerleri kullanılarak yapılan yorulma deney numunelerine ait kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.78' de verilmiştir. S10 no' lu numuneye ait makro fotoğraflar incelendiğinde, her bir numunenin kırılma şekli temelde benzerlik göstermesine rağmen 250 ve 260 MPa gerilme değerlerinin kullanıldığı deneylerde numunelerin kademeli bir zorlanmaya maruz kalarak kırıldığı, yük miktarındaki artışla birlikte 300 ve 340 MPa gerilme değerlerinin kullanıldığı numunelerde ise kırılmanın daha hızlı ve düz bir hat boyunca meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.78). S10 no' lu numuneye ait Şekil 5.78' deki kırık yüzey

fotoğraflarında, numunelerin yorulma sonunda, kaynak ara yüzeyinden kırılmaya başladığı ve yük miktarında artışa bağlı olarak kırılmanın AISI 1020 malzeme tarafına doğru bir miktar ilerlediği görülmektedir.

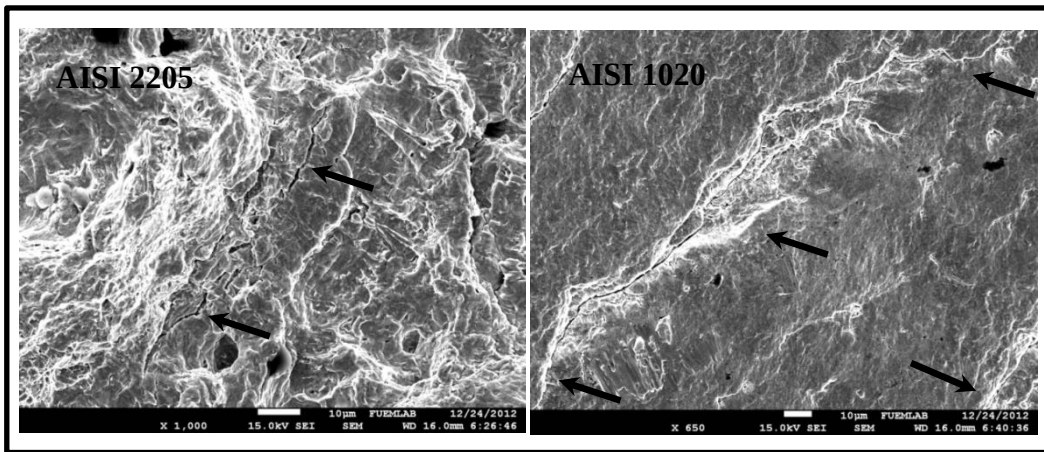


Şekil 5.78. S10 no' lu numunenin farklı gerilme değerleri altında yorulma sonucu kopan kırık yüzey fotoğrafları

S10 no' lu numune kullanılarak, farklı gerilme altında tamamlanan deney parçalarının her birinde meydana gelen kırılmanın şekil değiştirmesiz olarak gerçekleştiği görülmektedir. Yorulma zorlamaları sonucu meydana gelen kayma, tek yönlü zorlamalardaki gibi dislokasyonların oluşumu ve ilerlemesi ile açıklanır. Bu şekil değiştirme mekanizması, parlatılmış deney parçalarının yüzeyinde yorulma sınırına yakın zorlamalar altında kayma çizgileri oluşmasıyla görünür duruma gelebilir. Yorulma zorlaması sırasında tekrarlanan kalıcı şekil değiştirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu, malzemenin ayrılma dayanımının aşıldığı noktalarda mikroskobik boyuttan da küçük çatlaklar oluştuğu söylenebilir. Zorlama sırasında dışarıdan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak bunlar mikro ve makro çatlaklar olarak birleşir ve sonunda bu çatlaklardan

herhangi biri yorulma kırılmasına neden olur. Yorulma hasarlarında, hasar çok küçük ve sınırlı bir bölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden dışarıdan herhangi bir kalıcı şekil değiştirme görülmez ve bu nedenle yorulma kırılmaları şekil değiştirmesiz olarak nitelenir [77]. Şekil 5.78’ deki kırık yüzey makro fotoğrafları da incelendiğinde, numunelerin herhangi bir plastik şekil değişimine uğramadan kırıldıkları görülmektedir.

Bu grup içinde en yüksek yorulma sınırına sahip olan S16 no’lu numunenin 300 MPa gerilme altında, yorulma deneyi sonunda hasara uğrayan parçalarına ait SEM fotoğrafları Şekil 5.79’ da verilmiştir. Fotoğraflarda mikroçatlaklar net olarak görülmekte ve bu çatlaklar oklar yardımı ile gösterilmektedir. Şekil 5.79’ daki SEM fotoğrafları incelendiğinde, AISI 1020 çelik tarafında meydana gelen çatlaklar daha belirgin ve uzun bir hat boyunca ilerlerken, AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafındaki çatlakların daha küçük ve kısa olduğu görülmektedir. Bu durumun her iki malzeme arasındaki yapısal farklılıklar nedeni ile meydana geldiği düşünülmektedir.

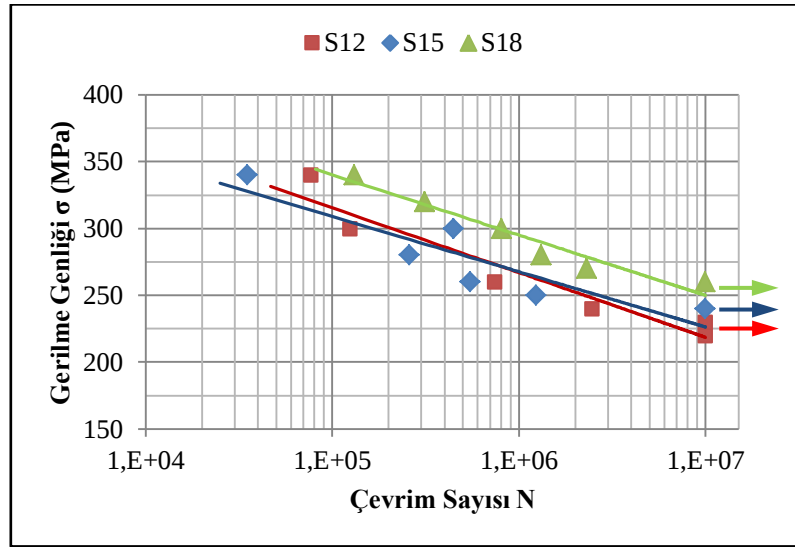


Şekil 5.79. S16 no’ lu numune 340 MPa gerilme değeri ile yapılan yorulma deneyinde meydana gelen mikro çatlaklar

1500 dev/ dk devir sayısı, 50 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4 sn) kullanılarak birleştirilen S12, S15 ve S18 no’ lu kaynaklı bağlantılara ait yorulma sınırları Tablo 5.29’ da verilmiştir. Bu numunelerin yorulma dayanım deneylerine ait S-N grafikleri Şekil 5.80’ de gösterilmiştir. Sürtünme süresi kademeli arttırılarak birleştirilen bu kaynaklı bağlantılara ait S-N grafikleri incelendiğinde, yorulma sınırları sırası ile 230, 240 ve 260 MPa olduğu görülmüş olup artan sürtünme süresine bağlı olarak yorulma sınırının düştüğü görülmektedir.

Tablo 5.29. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak arayüzey sertliği (HV)	Yorulma Sınırı (MPa)
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre.(sn)			
S12	1500	8	50	100	4	576,390	270	230
S15		6			3	587,370	277	240
S18		4			2	621,606	305	260

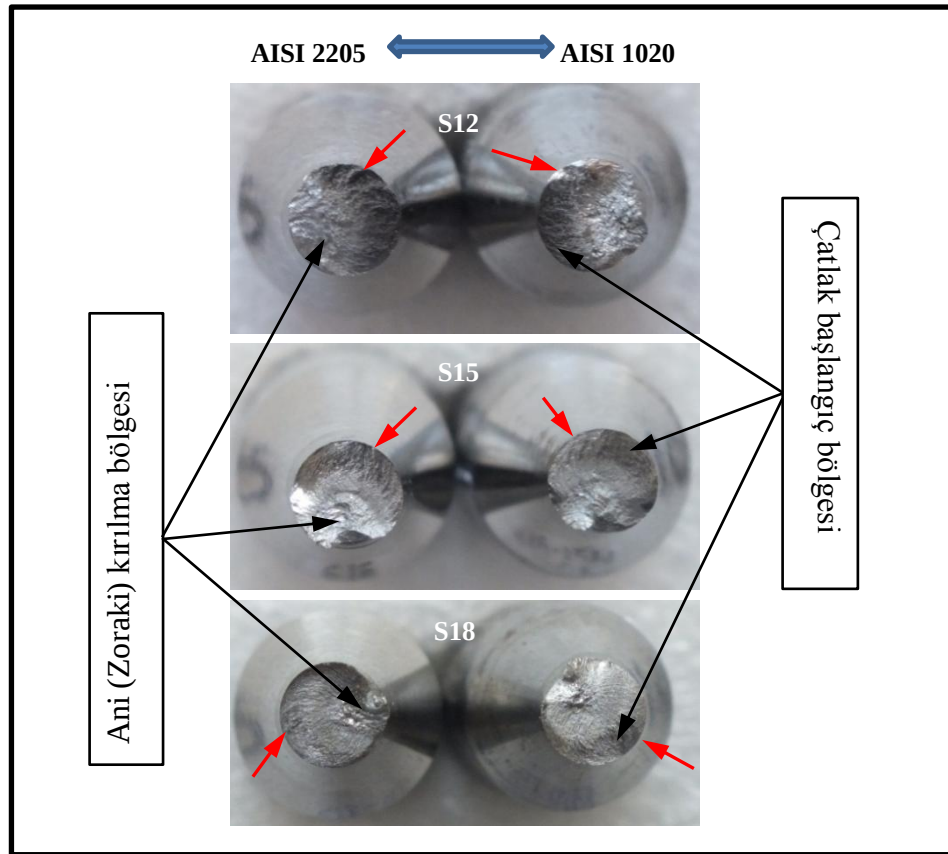


Şekil 5.80. S12, S15 ve S18 no' lu numunelere ait S-N grafikleri

Şekil 5.80' de verilen S-N grafiği incelendiğinde, S15 no' lu numunenin S12 no' lu numuneye göre yorulma sınırının 10 MPa daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak artan yüklerle, yorulma mukavemeti açısından her iki numunenin benzer değerlere sahip oldukları tespit edilmiştir. Yukardaki bilgiler ışığında sürtünme kaynaklı bağlantıların yorulma özelliklerinin maksimum devir ve minimum sürtünme sürelerinin kullanılması ile artırılabilceği belirlenmiştir. Ayrıca, sürtünme basıncı 20 MPa artırılarak birleştirilen bu kaynaklı bağlantılar, bir önceki grup ile kıyaslandığında; artan sürtünme basıncının yorulma sınırı üzerine olumsuz bir etki meydana getirdiği görülmektedir. Bu durumun, tanelerdeki yönlenme miktarındaki artışa bağlı olarak meydana geldiği düşünülmektedir.

Tablo 5.29’ da gösterilen yorulma sınırlarının, numunelerin çekme dayanımlarına bağlı olarak değiştiği, artan çekme dayanımı ile arttığı, azalan çekme dayanımı ile azaldığı görülmektedir. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde; kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımının kaynaklı bağlantıların mikro yapı, sertlik ve çekme özellikleri ile ilişkili olduğunu bildirmiştir [30].

S12, S15 ve S18 no’ lu kaynaklı bağlantıların yorulma deneylerinde, 300 MPa’ lık gerilme değerinin kullanıldığı numunelere ait kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.81’ de gösterilmiştir. Yorulma kırılması ve özelliklerinin gösterildiği bu fotoğraflarda yorulma çatlaklarının başladığı ve ilerlediği bölge ile zoraki kırılma bölgesi net olarak görülmektedir.



Şekil 5.81. S12, S15 ve S18 no’ lu numunelerin 300 MPa gerilme altında yorulma ile kırılan yüzey fotoğrafları

S12, S15 ve S18 no’ lu numunelere ait makro fotoğraflar incelendiğinde; numunedeki çatlaklar, çevrim sayısına bağlı olarak kararlı bir şekilde ilerlemiş ve numunelerin kırılmasına neden olmuştur. Heterojenlikler veya malzeme hataları yoksa yorulma hasarlarının ilk olduğu yer çoğunlukla yüzeyde veya yüzeyin hemen altındadır. Yapılan deneylerde kaynaklı numunelerin tamamında oluşan yorulma çatlaklarının

numune yüzeylerinden başladığı görülmektedir. Bu nedenle malzeme içinde ve kaynak merkezinde yorulma hasarına neden olacak hatanın bulunmadığı düşünülmektedir. Kırılma yüzeyi çıplak gözle incelendiğinde, tipik yorulma kırılmasını gösteren düz kısımlarla birlikte kaba taneli kısımlar görülmektedir. Kırılma yüzeyinde önce gözle sonra makro seviyede mikroskopla yapılan incelemeler sonucunda çevrim çizgileri rahatlıkla görülmektedir. Zoraki kırılma bölgesi, oval şeklinde ve gri renkli olup kesitin daha küçük bir bölümünü kapsamaktadır (Şekil 5.81).

Sabit devir sayısı (1500 dev/dk) kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılar, değişen sürtünme basıncına (30, 50 MPa) göre karşılaştırıldığında, artan sürtünme basıncı ile yorulma mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmektedir. En yüksek yorulma dayanımının 1500 dev/dk devir sayısının, 30 MPa sürtünme basıncı ve 4 sn sürtünme süresinin kullanıldığı S16 numunede olduğu görülmüştür. S16 no' lu numune aynı zamanda tüm numuneler içindeki en yüksek yorulma sınırına (280 MPa) sahip olan numunedir. Bu sonuç nedeni ile yüksek devir sayısı, düşük sürtünme basıncı ve düşük sürtünme süreleri ile sürtünme kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının arttırılabileceği düşünülmektedir.

1300 dev/dk ve 1500 dev/dk devir sayılarının kullanılarak yapılan sürtünme kaynaklı bağlantılarda, devir sayısı ile diğer kaynak parametrelerinin uyumlu olması durumunda yorulma dayanımları ana malzemeye (AISI 1020) göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. Voinov [31], sürtünme kaynaklı bağlantılarda düşük devir sayısı ve yüksek devir sayısı kullanmış elde ettiği verileri yorulma ömrü bakımından karşılaştırarak her iki tip devir sayısının da iyi sonuçlar verdiğini bildirmiştir.

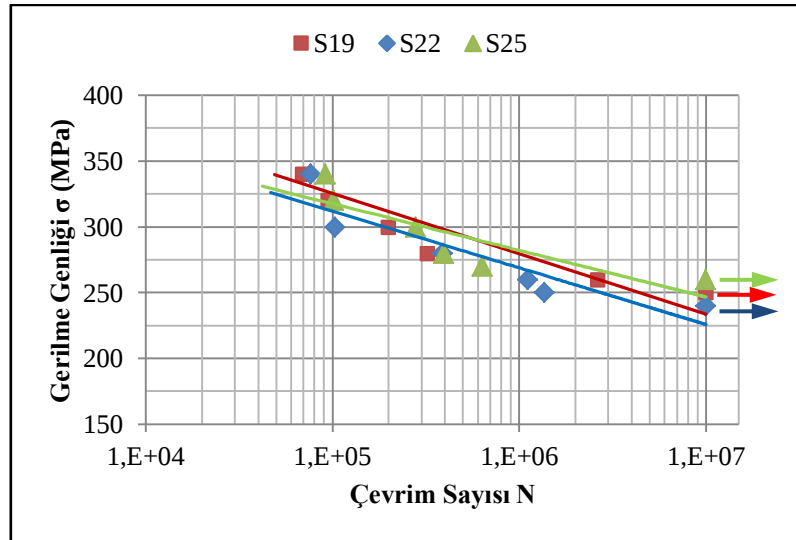
5.4.2.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Yorulma Deney Sonuçları

1700 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı ve 8, 6 ve 4 sn' lik üç farklı sürtünme süresinin kullanıldığı S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait yorulma sınırları Tablo 5.30' da verilmiştir. Bu numunelere ait yorulma dayanımlarını gösteren S-N grafikleri ise Şekil 5.82' de gösterilmektedir. S-N grafikleri incelendiğinde, bu numunelere ait yorulma sınırlarının sırası ile 250, 240 ve 260 MPa olduğu tespit edilmiştir. Yorulma sınırlarının azalan sürtünme süresi ile arttığı görülmektedir. Bunun temel nedeni, sürtünme süresindeki artışa bağlı yükselen sıcaklığın, kaynak arayüzeyinde bağlantı mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkileyen ADB bölgesinin genişlemeş olması sebebiyle ortaya

çıkmaktadır (Şekil 5.24). Sürtünme kaynaklı bağlantılarda ADB bölgesi; kaynak arayüzeyinde sıcaklık etkisi ile oluşan viskoz haldeki malzemenin dışarı atılamaması nedeni ile birleştirilen her iki metal çiftinin düzensiz şekilde karışması ile meydana gelmektedir. Meydana gelen bu düzensiz yapının varlığı ve genişliği bağlantı mukavemetini olumsuz olarak etkilemektedir. Bununla birlikte ADB deki yapının düzensizliğinin artması da bağlantı mukavemet değerlerindeki azalmayı arttırıcı yönde etki etmektedir. Deneylerde elde edilen yorulma dayanımları, numunelerin çekme dayanımları ile birlikte değerlendirildiğinde yorulma dayanımının artan çekme dayanımıyla arttığı görülmektedir. Ancak artan yüklerle birlikte, yorulma mukavemeti açısından her üç numunenin de birbirine çok yakın değerlere sahip oldukları tespit edilmiştir (Şekil 5.82).

Tablo 5.30. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları

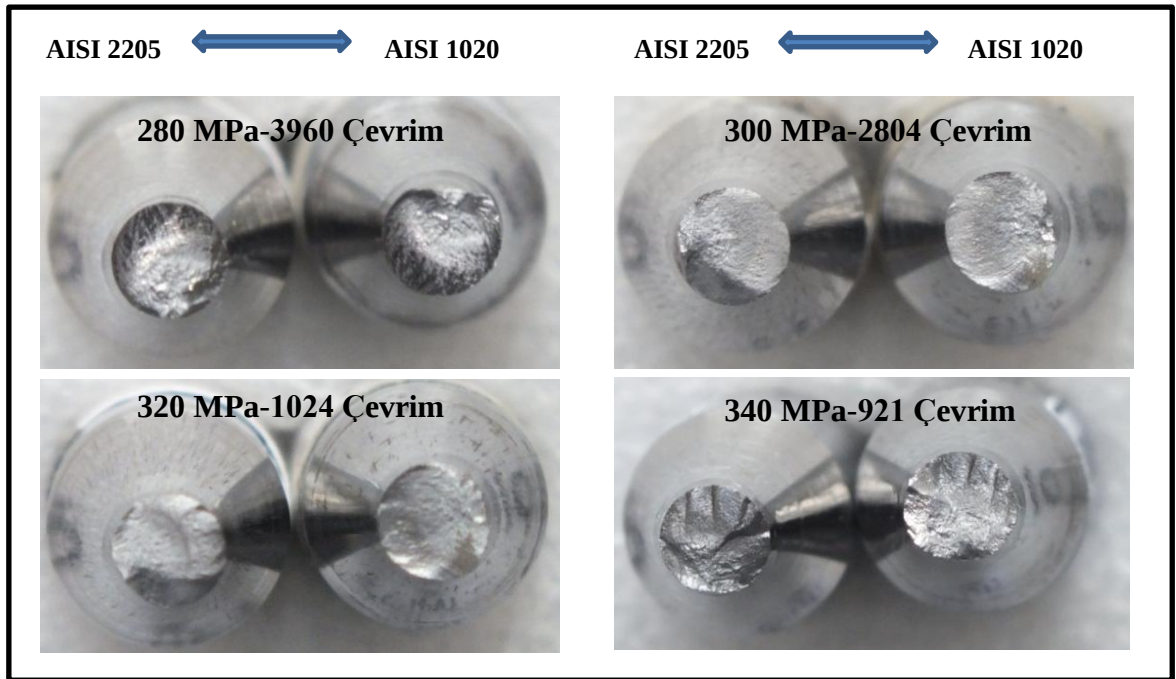
Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak arayüzey sertliği (HV)	Yorulma Sınırı (MPa)
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc(MPa)	Yığma Süre. (sn)			
S19	1700	8	30	60	4	554,347	273	250
S22		6			3	547,343	270	240
S25		4			2	595,198	269	260



Şekil 5.82. S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait S-N grafikleri

S19, S22 ve S25 no' lu numunelere ait yorulma sınırının ana malzeme yorulma sınırının üstünde olduğu görülmektedir. Bu durumun; sürtünme kaynaklı bağlantılarda dövme etkisi ile tane boyutlarının küçülmesi ve pekleşme nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Çünkü, dislokasyonların tane içinde sürdürdükleri hareketlerini tane sınırında durdurmak zorunda kalırlar. Bu engelleyici etkisinden dolayı tane boyutu küçüldükçe malzemenin akma dayanımında ve sertliğinde artış görülür. Diğer bir deyişle tane boyutu küçüldüğünde akma dayanımı artmaktadır [75]. Bunlara paralel olarak malzemelerin yorulma mukavemet değerlerinde de artış görülmektedir.

S25 no' lu numunenin yorulma deneylerindeki farklı yükleme değerleri sonunda kırılan parçalarına ait kırık yüzey makro fotoğrafları Şekil 5.83' te görülmektedir. Kırık yüzeylerin, temelde diğer kırık yüzeylerle benzer yüzeyler olduğu ancak artan devir sayısına bağlı olarak tanelerdeki deformasyon miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca, kırık yüzey makro fotoğrafları incelendiğinde, yorulma çizgilerinin farklı yönlenmiş olmasının tanelerin deformasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.83. S25 no' lu numunenin yorulma deneyi sonrası kırık yüzey fotoğrafları

Eğilme halinde en büyük çekme gerilmeleri yüzeyde olduğu için eğilmeye zorlanan malzemelerde hasar yüzeyde başlamaktadır. Şekil 5.83' te gösterilen fotoğraflarda da yüzeyde başlayan çatlakların numune eksenine dik doğrultuda ilerleyerek hasara neden oldukları açıkça görülmektedir. Bununla birlikte artan yükleme değerleri ile birlikte hasara

yol açan çatlak sayısının arttığı ve artan yükleme değerleri ile birlikte zoraki kırılma bölgesinin genişlediği, çatlak oluşumu ve ilerlemesinin meydana geldiği bölgenin ise daraldığı görülmektedir.

Şekil 5.83' te verilen makro fotoğraflar incelendiğinde, 280 MPa gerilme değerlerinde malzemede çatlağın başladığı ve ilerlediği bölgenin daha geniş olduğu çatlak başlangıçlarının net olarak görülmemesine rağmen çevrim çizgilerinin daha belirgin bir şekilde görüldüğü fakat, gerilme değeri 300 ve 320 MPa olan numunelerde ani kırılma bölgesinin daha büyük olduğu ve çatlakların daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte 340 MPa gerilme altında numune eksenine dik doğrultuda ilerleyen çatlak sayısı artmış ve kırılma çok kısa sürede tamamen gevrek kırılmaya benzer şekilde gerçekleşmiştir. 340 MPa gerilme altında kırılan numune ile yapılan yorulma deneyinde çevrim sayısının az olması çevrim çizgilerinin makro seviyede belirgin bir şekilde görülebilmesine neden olmuştur.

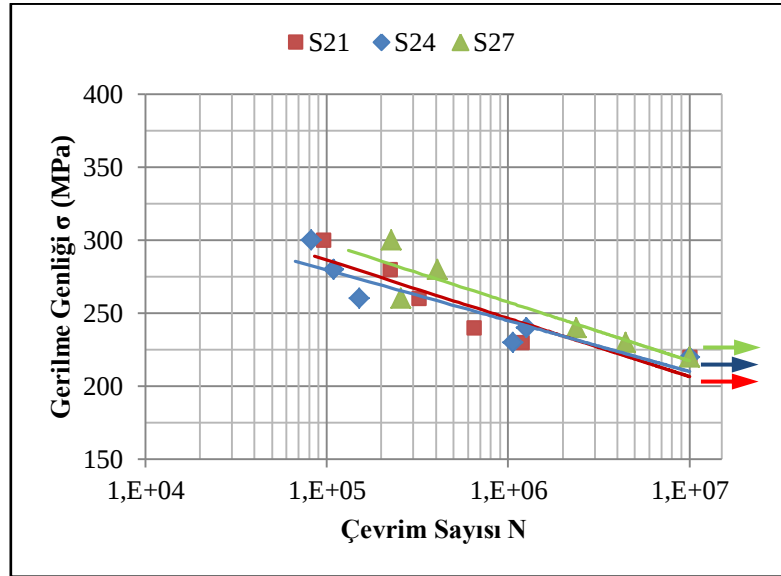
Devir sayısının 1700 dev/dk, sürtünme basıncının 50 MPa ve sürtünme sürelerinin 8, 6 ve 4 sn kullanıldığı S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait yorulma sınırları Tablo 5.31' de gösterilmektedir. Bu numunelere ait yorulma dayanım grafikleri ise Şekil 5.84' te verilmiştir. Her üç numunede yorulma sınırının aynı olduğu, değişen sürtünme sürelerine rağmen değişmediği görülmüş ve ana malzeme AISI 1020 çeliğinin yorulma sınırına (210 MPa) yakın sonuçlar elde edilmiştir. Literatür çalışmalarında kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarının ana malzemenin yorulma dayanımları ile benzer çıkabileceği bildirilmiştir [18,27]. Bu numunelere ait yorulma sınırı AISI 1020 çeliğine ait yorulma sınırından 10 MPa fazla olup 220 MPa olarak kaydedilmiştir.

Tablo 5.31' de S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait yorulma sınırları incelendiğinde, yorulma sınırlarının bir önceki grupta bulunan 1700 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı kullanılarak yapılan bir önceki grup ve 1300, 1500 dev/dk devir ile birleştirilen diğer serilerde yapılan kaynaklı bağlantılara göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun, yorulma hasarlarında önemli bir husus olan dövülmüş veya haddelenmiş malzemelerin yönsel yorulma özellikleri nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir [78]. Her üç numunenin birleştirilmesinde artan devir sayısı, artan eksenel basınç etkisiyle gerek tanelerin aldığı yönlülük gerekse ADB bölgesindeki düzensiz yapının genişlemesi yorulma dayanımının düşmesine yol açmıştır. Yorulma sınırının, tanecik boyutu ikincil fazın hacim oranı ve çözünen atomlar veya mikroyapı değişkenlerinden büyük ölçüde etkilendiği bilinmektedir [29]. Bununla birlikte sürtünme

kaynaklı bağlantılarda kaynak arayüzeyinde meydana gelen ADB bölgesinde dışarı yönlendirilememiş ve düzensiz bir yapıda olan karışım bölgesinin ve bu bölge içindeki süreksizliklerin gerilme yoğunlaşmasına neden olarak yorulma dayanımını düşürdüğü düşünülmektedir [78].

Tablo 5.31. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait yorulma deney sonuçları

Numune no	KULLANILAN PARAMETRELER					Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak arayüzey sertliği (HV)	Yorulma Sınırı (MPa)
	Devir (dev/dk)	Srt. Süre. (sn)	Srt.Bsc.(MPa)	Yığma Bsc.(MPa)	Yığma Süre.(sn)			
S21	1700	8	50	100	4	576,572	306	220
S24		6			3	588,189	314	220
S27		4			2	618,335	316	220



Şekil 5.84. S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait S-N grafikleri

Kaynaklı bağlantılardaki yorulma hasarları; malzeme mikroyapısı ile yük altında malzeme deformasyonuna bağlı olarak meydana gelen elastik-plastik şekil değiştirme ve bağlantı hasar modları ile değerlendirilmelidir [26,30]. Yorulma kırılmaları; plastik şekil değiştirme, çekme gerilmesi ve yorulma çevrimli gerilmesinin aynı zamanda etkisiyle

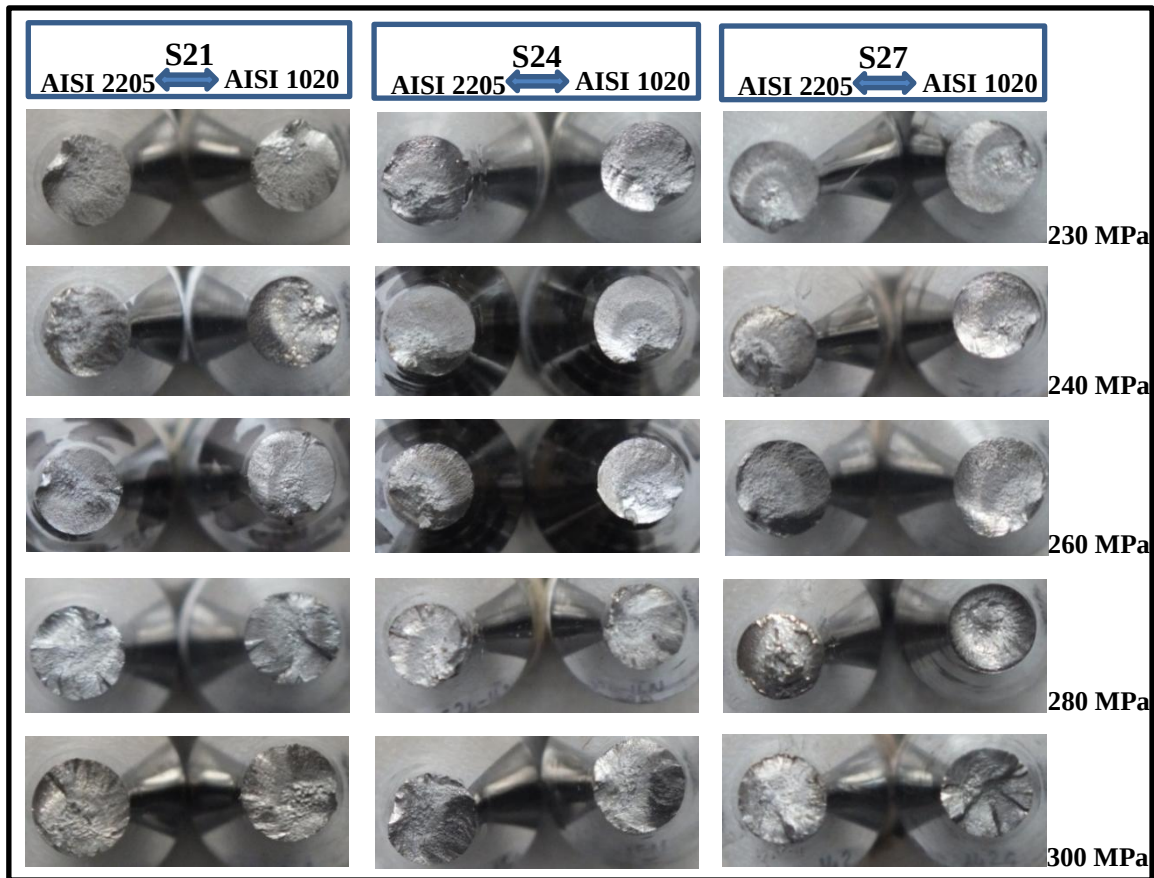
ortaya çıkmaktadır [36]. Bu nedenle bu üç faktörün meydana gelmemesi halinde, yorulma çatlakları meydana gelmeyecek ve ilerlemeyecektir. Belirli bir gerilme genliği altında uygulanan çevrim, malzemede şekil değiştirme çatlakların başlamasına neden olmakta ve aralıklarla uygulanan çekme gerilmeleri ise oluşan bu çatlakların ilerlemesinde etkili olmaktadır. Bu doğrultuda yorulma mekanizmasına tesir eden temel faktörlerin biri plastik deformasyondur [36]. Sürtünme kaynağında 1700 dev/dk, 50 MPa sürtünme basıncı ile birleştirilen S21, S24 ve S27 no' lu numunelerde yüksek çalışma sıcaklığı ile birlikte yüksek sürtünme basıncının kullanılması, plastik deformasyonun şiddetini artırmaktadır. Bu durum numunelerin yorulma dayanım özelliklerinin azalmasına yol açmaktadır.

1700 dev/dk devir sayısının kullanıldığı kaynaklı bağlantılarda yüksek dönme hızı nedeni ile 1300 ve 1500 dev/dk ile birleştirilen diğer numunelere göre malzemeye ısı girdisi fazla olmaktadır. Bunun sonucunda da kaynak işlemi esnasında bağlantı arayüzündeki malzeme plastik şekil verme sıcaklığına ulaşınca kadar ısındığından kaynak bölgesinde soğuk şekil verme sertleşmesine uğramış yapı tavlanamakta, bu durumda sertlik kaybına neden olması ve sertliğin düşmesi beklenmektedir [49]. Sertlik değerlerindeki azalma ile birlikte yorulma sınırının düşmesi beklenen bir durumdur. Ancak 1700 dev/dk devir sayısının kullanıldığı S19, S20, S21, S25, S26, S27 no' lu numunelerde sertlik değerleri 1300 ve 1500 dev/dk ile birleştirilen diğer numunelere göre yüksek çıkmış olmasına rağmen yorulma sınırlarının azaldığı görülmektedir. Bu durumun sıcaklık artışı ile birlikte tanelerin aşırı deformasyona uğraması nedeni ile meydana geldiği düşünülmektedir. Dolayısıyla sürtünme kaynaklı bağlantılardaki sertlik değerlerinin artmasının yorulma sınırlarını her zaman arttırmayacağı düşünülmektedir. Ancak aynı parametre gurubu içinde birleştirilen numunelerin sertlik değerleri ile yorulma sınırlarının karşılaştırılabileceği düşünülmektedir. Çünkü yorulma sınırları aynı çıkan S21 S24 ve S27 no' lu numunelerin kaynak arayüzüne yakın bölgelerinde ölçülen mikrosertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 5.38). Bununla birlikte devir sayısı ve sürtünme basıncının birlikte artırılması ile tanelerin yönlendirilmesi için yorulma sınırının önemli miktarda azaldığı tespit edilmiştir (Tablo 5.30-31).

1700 dev/dk devir sayısının kullanıldığı bu numune gurubunda sürtünme basıncının 50 MPa' a çıkartılması ve sürtünme süresinin kademeli olarak (8, 6 ve 4 sn) azaltılması yorulma sınırını değiştirmemiştir. Her üç numunenin yorulma sınırları aynı çıkmış ancak sürtünme süresi bu grup içindeki diğer numunelere göre daha düşük olan S27 no' lu

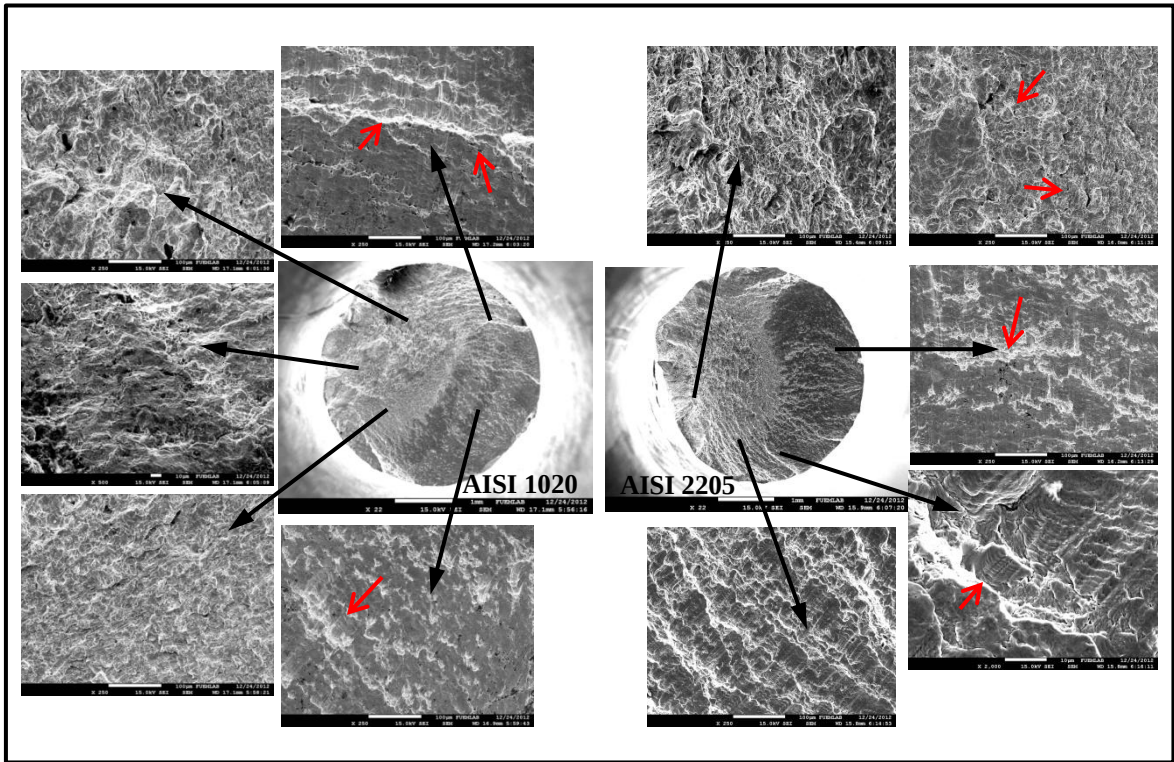
numunenin, S21 ve S24 no' lu numunelere göre artan yüklerle birlikte daha iyi yorulma mukavemetine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.84).

S21, S24 ve S27 no' lu numunelere ait yorulma deneyi sonunda kırılan parçalara ait kırık yüzey fotoğrafları Şekil 5.85' te verilmiştir. Bu numunelerdeki kırılma şeklinin diğer kaynaklı bağlantılarda olduğu gibi şekil değiştirmeden ani olarak gerçekleştiği görülmüştür. Her üç numunede, yüke bağlı olarak kırılma yüzeyleri birbirine benzerlik göstermektedir. Şekil 5.85' teki kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde, ilk küçük çatlakların numune eksenine dik doğrultuda oluştuğu ve ilerleyerek büyüdüğü görülmektedir. Özellikle artan yüklerde çatlakların daha büyük ve belirgin olarak meydana geldikleri görülmektedir. Toribo vd [79] yorulma kırılması sürecinin; kaynaklanmış bölge ve çevresinde, mekanik özelliklerin bozulmasından kaynaklandığını bildirmiştir. Bu mekanik bozulmanın mikrosertlik ölçümleri ve metalografik analiz ile tespit edilebileceğini belirtmiştir.



Şekil 5.85. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerin yorulma deneyi sonrası kırık yüzey fotoğrafları (Yükleme değerleri sırası ile 230, 240, 260, 280 ve 300 MPa)

S24 no' lu numunenin 300 MPa gerilme ile yorulma sonunda kırılan yüzeylerine ait SEM fotoğrafları Şekil 5.86' da gösterilmiştir. Çatlak başlangıç bölgeleri pürüzsüz ve parlak bir görünüme sahip iken ani kırılma bölgesinde, ağ şeklinde bir yapının meydana geldiği görülmektedir. S24 no' lu numune SEM fotoğraflarında yük miktarındaki artış nedeni ile son kırılma yüzeyinin tüm kesite oranının arttığı görülmektedir. Son kırılma yüzeyinin hemen hemen tamamının yorulma çatlakları ile çevrildiği görülmektedir. Lee vd.[12] yorulma deneylerinde, ilk küçük çatlakların numune eksenine dik doğrultuda oluştuğunu ilerleyerek büyüdüğünü tespit etmişler. Özellikle ana çatlakların kaynak ara yüzeyi boyunca büyüdüğünü, plastik deformasyonun yaklaşık 0,9 çevrim oranında meydana geldiğini plastik deformasyonun görülmesinden kısa bir süre sonra ise kırılmanın meydana geldiğini bildirmişler.



Şekil 5.86. S24 no' lu numune 300 MPa gerilim ile yapılan yorulma deneyi sonrası kırık yüzey SEM fotoğrafları

Sabit devir sayısı altında, sürtünme basıncı parametrelerine göre yorulma sınırları karşılaştırıldığında, artan sürtünme basıncı ile yorulma mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmüştür. Sabit devir (1700 dev/dk) altında 30 ve 50 MPa sürtünme basıncı ile 8, 6, 4 sn' lik sürtünme sürelerinin kullanıldığı sürtünme kaynaklı bağlantılarda en yüksek

yorulma sınırının S25 no' lu numunede olduğu tespit edilmiştir. Bu numunede 30 MPa sşrtşnme basıncı ve 4 sn' lik sşrtşnme sşresi kullanılmıştır. Bu sebeple, sşrtşnme kaynaklı bağlantılarda, yşksek devir sayısı kullanıldığında minimum sşrtşnme sşresi ile dşşşk sşrtşnme basıncının kullanılması ile yapılacak birleştirmeler ile yorulma dayanımları arttırılabileceği belirlenmiştir. S21, S24 ve S27 no' lu numunelerin yorulma sınırlarının aynı olmasına rağmen artan yşklerde dşşşk sşrtşnme sşresinin kullanımı ile yorulma mukavemetinin artması bu sonucunu doğrular niteliktedir.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı kimyasal bileşime sahip olan AISI 2205/ AISI 1020 çelik çifti farklı üretim parametreleri kullanılarak katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile birleştirilerek, kaynaklı bağlantılarda işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkileri incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır.

- ❖ Farklı kimyasal bileşime sahip AISI 2205/AISI 1020 çelik çifti tarafımızdan tasarım ve imalatı gerçekleştirilen sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.
- ❖ Kaynaklı bağlantılara ait makro ve mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, numunelerin tamamında bağlantı mukavemetini olumsuz etkileyebilecek çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgenin olmadığı görülmüştür.
- ❖ Farklı işlem parametreleri kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılar üzerine yapılan makro yapı analizi sonuçlarından; artan devir sayısı, sürtünme süresi ve eksenel basınca bağlı olarak dışarı taşan malzemenin miktarında ve boyca kısalma artışı kaydedilmiştir. Boyca kısalma, en çok AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında meydana gelmiştir. İki malzeme arasındaki boyca kısalma farkı, AISI 2205 çeliğin ısı iletim katsayısının AISI 1020 çeliğinkinden yaklaşık üç kat daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- ❖ Kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan mikroyapı fotoğraflarından, sürtünme kaynaklı bağlantıların literatürde belirtilen dört temel bölgeden meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgelerin kaynak arayüzeyinden başlayarak esas metale doğru sıralandığında a. Aşırı deforme olmuş bölge, b. Deforme olmuş bölge, c. Kısmen deformasyona uğramış bölge ve d. Esas metal olduğu görülmüştür.
- ❖ Kaynak sonrası arayüzeyde, değişken parametrelere bağlı olarak en önemli yapısal değişim ADB ve DB' de meydana geldiği görülmüştür. Aşırı deformasyona uğramış bölge, kaynak arayüzeyinin sürtünmesi ile termo-dinamik etki sonucu iki metalin karışımından oluşan bir bant olarak ortaya çıkmaktadır. Deformasyon bölgesinin ise

kullanılan parametrelere bağılı olarak numune eksenine göre dik yönlenmiş ve küçülmüş tanelerden meydana geldiği görülmüştür.

- ❖ Yüksek çevresel hız ve yüksek sürtünme basıncı kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantılarda, arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesinin artması ile birlikte dışarı taşan malzeme miktarı artmıştır. Dışarı taşan malzeme miktarı arttıkça ADB ve DB bölgelerinin daraldığı görülmüştür. Ancak yüksek sürtünme süreleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda IEB' nin bağlantının her iki tarafında da genişlediği görülmüştür.
- ❖ Devir sayısı, sürtünme süresi ve eksenel basınç kuvvetinin ADB ve DB bölgelerinin genişliği ve bu bölgelerde meydana gelen yapısal değişim üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- ❖ Sürtünme basıncı ve yığma basıncının oluşturduğu plastik deformasyon etkisi ile kaynak arayüzeyinde, viskoz hale gelen malzemelerin (akış yönüne doğru) haddeleme izlerine dik doğrultuda yönlendikleri görülmüştür.
- ❖ Kaynaklı bağlantıların deformasyona uğramış bölgelerinde meydana gelen tane küçülmesi ve plastik deformasyon miktarındaki değişimin, devir sayısı ve sürtünme basıncının değişimine paralel olarak değiştiği tespit edilmiştir.
- ❖ Kaynaklı bağlantıların birleşme hattına dik doğrultuda yapılan mikrosertlik taraması sonucu elde edilen sertlik verilerinden, bütün kaynaklı bağlantılar benzer sertlik profiline sahip olup sertlik, ADB bölgesinde bir maksimum değerden başlayarak DB bölgesinde düşüş sergileyip esas metal sertliğine ulaştığı görülmüştür.
- ❖ Kaynak arayüzeyinden ölçülen en yüksek sertlik S27 no' lu numunede 316 HV, en düşük sertlik değeri ise S26 no' lu numunelerde 268 HV olarak ölçülmüştür.
- ❖ Kaynaklı bağlantıların arayüzeyinde ölçülen sertlik ölçümlerinden, en önemli sertlik artışı 8 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda ortaya çıktığı görülmüştür.
- ❖ Bütün kaynaklı numunelerde esas malzemeden kaynak arayüzeyine doğru gidildikçe sertlik değerinde plastik deformasyonun sebep olduğu bir artış meydana geldiği görülmektedir. Ancak AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde, element geçişi ve soğuma hızına bağılı olarak sertliğin ana malzeme (AISI 2205) sertliğinin altına düştüğü tespit edilmiştir.

- ❖ 1300, 1500 ve 1700 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda kırılmanın, arayüzeyden başlayıp 45°' lik açıyla AISI 1020 çelik tarafından boyun vermeksizin meydana geldiği görülmüştür.
- ❖ 40 ve 60 MPa sürtünme basıncı kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testi sonunda kırılmanın, boyun vererek, koni-çanak oluşumu ile sünek bir şekilde ortaya çıktığı görülmüştür.
- ❖ En yüksek çekme mukavemeti S3 no' lu numunede 633,790 MPa, en düşük çekme mukavemeti ise S7 no' lu numunede 487,674 MPa olarak elde edilmiştir. Ancak, genelde en yüksek çekme gerilmesi 4 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda elde edildiği belirlenmiştir.
- ❖ 1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen numunelerde, en iyi çekme mukavemeti 8 sn sürtünme süresi, 40 ve 50 MPa sürtünme basıncı ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda elde edilmiştir. 1500 ve 1700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen numunelerde, en iyi çekme mukavemeti 4 sn sürtünme süresi ile birleştirilen kaynaklı bağlantılarda elde edilmiştir. Bu sonuçlardan ve literatürde belirtildiği gibi, mukavemetli kaynaklı bağlantılar elde etmek için düşük devir yüksek sürtünme süresi, yüksek devir düşük sürtünme süresi kullanılarak gerçekleştirilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır.
- ❖ Çekme test sonuçlarından, her bir kaynak parametresinin kaynaklı bağlantının kalitesini bir miktar etkilediğini ancak mekanik ve metalurjik özelliklere en önemli etkinin kullanılan sürtünme kaynak parametrelerinin (devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi) uyumlu seçilmesi ile elde edildiği görülmüştür. Bununla birlikte farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzeme çiftlerinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde; kaynak parametrelerinin çok dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir.
- ❖ Farklı işlem parametreleri kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılara uygulanan döner eğmeli yorulma test sonuçlarından, çekme mukavemeti değerlerinde olduğu gibi yorulma dayanım değerlerinin de kaynak parametrelerine göre değiştiği görülmüştür.
- ❖ Toroit şekilli olarak yapılan yorulma numunelerinin tamamının kesitin ince olan kısmından, kaynak arayüzeyinden veya kaynak arayüzeyine çok yakın AISI 1020 çelik tarafında zig-zag bir arayüzey yapısıyla kırıldığı görülmüştür.

- ❖ En yüksek yorulma dayanımı 280 MPa olarak S16 no' lu numunede en düşük yorulma dayanımı S9 no' lu numunede 170 MPa olarak kaydedilmiştir. 1300 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda en iyi yorulma dayanımı 8 sn sürtünme süresi ile birleştirilen S1 ve S3 no' lu numunelerde kaydedilmiştir. 1500 ve 1700 dev/dk devir sayısı kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda en iyi yorulma dayanımı 4 sn sürtünme süresi ile birleştirilen S16, S18, S25 ve S27 no' lu numunelerde elde edilmiştir.
- ❖ Yorulma deney sonuçlarına göre kaynaklı bağlantılara ait yorulma sınırı, devir sayısının 1300 dev/dk' dan 1500 dev/ dk' ya çıkartılması ile önce artmıştır. Ancak devir sayısının 1500 dev/dk' dan 1700 dev/dk' ya çıkartılması ile yorulma sınırının düştüğü görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Çil, E.**, 2009. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş paslanmaz çelik ve bakır parçaların kaynak bölgesi özelliklerinin incelenmesi, *Y.Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [2] **Özdemir, N.**, 2002. Tane küçültülmüş düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [3] **Çelik, Ö.**, 2008. Sürtünme kaynağı yapılmış farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Y.Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [4] **Gürler, M.**, 2000. Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- [5] **Vill, V. I.**, 1962. Friction Welding of Metals, AWS, Newyork.
- [6] **Ellis, C. R. G.**, 1977. Friction Welding, Some Recent Applications of Friction Welding, *Weld. And Metal Fab.*, 207-213.
- [7] **Itoh, Y. Z., Suruga, S., Kashiwaya, H.**, 1989. Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stres field, *Engineering Fracture Mechanics*, 33, 3, 397-407.
- [8] **Yilbaş, B. S., Şahin, A. Z., Kahraman, N., Al-Garni, A. Z.**, 1995. Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 49, 3-4, 431-443.
- [9] **Yan, J. H., Zheng, K., Zhao, K.**, 2000. Prediction of fatigue life and its probability distribution of notched friction welded joints under variable-amplitude loading, *International Journal of Fatigue*, 22, 6, 481-494.
- [10] **Hong, H .U., Rho, B. S., Nam, S. W.**, 2002. A study on the crack initiation and growth from δ -ferrite/ γ phase interface under continuous fatigue and creep-fatigue conditions in type 304L stainless steels, *International Journal of Fatigue*, 24, 10, 1063-1070.
- [11] **Satyanarayana V. V., Reddy, M. G., Mohandas, T.**, 2005. Dissimilar metal friction welding of austenitic–ferritic stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 160, 2, 128–137.
- [12] **Lee, D. G., Jang, K. C., Kuk, J. M., Kim, I. S.**, 2004. Fatigue properties of inertia dissimilar friction-welded stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156, 1402–1407.

- [13] **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, 19-20, 2504-2509.
- [14] **Özdemir, N., Orhan, N.**, 2005. Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al, *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 1, 63-70.
- [15] **Chai, G.**, 2006. Fatigue behaviour of duplex stainless steels in the very high cycle regime, *International Journal of Fatigue*, 28, 1611–1617.
- [16] **Şahin, M.**, 2007. Evaluation of the joint interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding, *Materials and Design*, 28, 2244-2250.
- [17] **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.
- [18] **Şahin, M.**, 2009 Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding, *Materials and Design*, 30, 135-144.
- [19] **Sathiya, P., Aravindan, S., Haq, N. A., Paneerselvam, K.**, 2009. Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques, *Journal of materials Processing Technology*, 209, 5, 2576-2584.
- [20] **Li, W., Yu, M. Li J., Zhang, G., Wang, S.**, 2009. Characterizations of 21-4N to 4Cr9Si2 stainless steel dissimilar joint bonded by electric-resistance-heat-aided friction welding, *Materials and Design*, 30, 4230–4235.
- [21] **Çelik, S., Ersözlü, İ.**, 2009. Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels, *Materials and Design*, 30, 970-976.
- [22] **Tavares, S. S. M., Scandian, C., Pardal, J. M., Luz, T. S., Silva F. J.**, 2010. Failure analysis of duplex stainless steel weld used in flexible pipes in off shore oil production, *Engineering Failure Analysis*, 17, 1500-1506.
- [23] **Mitelea, I., Craciunescu, C. M.**, 2010. Parameter influence on friction welding of dissimilar surface-carburized/volume-hardened alloyed steels, *Materials and Design*, 31, 2181–2186.
- [24] **Nip, K. H., Gardner L., Davies, C. M., Elghazoulia, Y.**, 2010. Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel, *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1, 96-110.
- [25] **Taban, E., Gould, E. J., Lippold, J. C.**, 2010. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization, *Materials and Design*, 31, 2305-2311.

- [26] **Pakandam, F. Varvani-Farahani, A.**, 2010. A comparative study on fatigue damage assessment of welded joints under uniaxial loading based on energy methods, *Procedia Engineering*, 2, 2027–2035.
- [27] **Nascimento M. P., Voorwald H. J. C.**, 2010. Considerations on corrosion and weld repair effects on the fatigue strength of a steel structure critical to the flight-safety, *International Journal of Fatigue*, 32, 1200–1209.
- [28] **Ochi, H., Yamamoto, Y., Ogawa, K., Tsujino, R., Sawai, T., Suga, Y.**, 2003. Evaluation of tensile strength and fatigue strength of SUS304 stainless steel friction welded joints, *The International Society of Offshore and Polar Engineers Conference*, 1098-6189.
- [29] **Beden, S., M., Abdullah, S., Ariffin, A. K. Asady-AL, N. A., Rahman M. M.**, 2009. Fatigue life assessment of different steel-based shell materials under variable amplitude loading, *European Journal of Scientific Research*, 29, 1, 157-169.
- [30] **Paventhana R., Lakshminarayanan P. R., Balasubramanian V.**, 2011 Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints, *Materials and Design*, 32, 1888–1894.
- [31] **Voinov, V. P.**, 1972. Fatigue Strength of Friction- Welded Joints Between Steels 20 and 40 Kh, *Weld. Prod.*, 51-54.
- [32] **Şahin, M., Akata, E. H., Gülmez, T.**, 2007. Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding, *Materials Characterization*, 58, 1033–1038.
- [33] **Çalik, A.** 2009. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels, *International Journal of Physical Sciences*, 4 (9), 514-518.
- [34] **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.
- [35] **Dinç, D.**, 2006. AISI 1040 ve AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması, *Y. Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [36] **Hasçalık, A.**, 1998. Yaprak yay yapımında kullanılan 35 Cr 4 çeliginin fretting yorulma davranışının araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [37] **Anık, S.**, 1991. Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar, İstanbul.
- [38] **Gül, A.**, 2006. Farklı metalsel malzemelerin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi, *Y.Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [39] **Ersözlü, İ.**, 2006. Sürtünme kaynak makinasının bilgisayar kontrollü çalıştırılması ve SAE 4140 ve SAE 1050 çeliklerine uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [40] **Sönmez, F.**, 2007. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmesi yüksek hız çeliği (HSS) ve AISI 1040 çeliklerinde mukavemet ve metalurjik özelliklerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [41] **Yılmaz, M.**, 1993. Farklı takım çeliklerinin sürtünme kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] AWS, Resistance and Solid-state Welding and Other Joining Processes, Welding Handbook, Miami, 1980, S240
- [43] **Tylecote, R.Y.**, 1968. The solid phase welding of metals, Edward Arnold Ltd., London, 1-150.
- [44] **Duffin, F. D., Bahrani, A. S.**, 1973. Frictional behaviour of mild steel in friction welding, *Elsevier*, 26, 1, 53-73.
- [45] <http://www.mtiwelding.com> Worldwide Joining&Welding Solution. 12 Aralık 2011.
- [46] **Murti, K. G. K., Sundersan, S.**, 1983. Parameter optimisation in friction welding dissimilar materials, *Metal Constriction*, 15, 331-335.
- [47] **Saygın, M.**, 2006. AISI 1020 çeliklerinde yorulmanın borlama dayanımına etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [48] **Akkuş, A.**, 2006. Galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik saçların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] **Odabaş, C.**, 2004. Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri, Eczacıbaşı yayınları, İstanbul.
- [50] **Cunat, P.J., Pont, J.**, 2007. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Malzemeler ve Kullanımları Serisi, Cilt 3, Euro Inox, Lüksemburg, Fransa (Çeviri Dr. Caner Batıgün, Ankara, Türkiye).
- [51] **Kurt, B.**, 2005. Ti-6Al-4V alaşımı ile farklı tip paslanmaz çeliklerin difüzyon kaynağı, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [52] **Tolungüç, B., Yurtışık, K., Tirkeş, S., Gür, H. C., Batıgün, C., Ertürk, T., Gürbüz, R.**, 2012. S2205 DP. Çeliklerin hibrit plazma ark kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı dönüşümleri, *Mühendis ve Makine, Tmmob makine mühendisleri odası aylık dergisi*, 624, 77-82.

- [53] **Aran, A., Temel, A. M.,** 2004. Paslanmaz Çelik Üretimi, Kullanımı, Standartları, Sarıtaş Teknik Yayın No:1, İstanbul.
- [54] http://www.pasiad.org.tr/modules.php?name=Universal_Module&op=ViewItem&vid=4 Paslanmaz Çelik Sanayicileri ve İşadamları Derneği. 05 Mart 2011.
- [55] **Dolutaş H., Cavcar M.,** 2001. DP. Çeliklerin Kaynağı, Oerlikon kaynak elektrodları ve Sanayi A.Ş.
- [56] **Balbi, M., Avalos, M., Bartali, El A., Armas, A. I.,** 2009. Microcrack growth and fatigue behavior of a duplex stainless steel, *International Journal of Fatigue*, 31, 11-12, 2006-2013.
- [57] **Karcı, A.,** 2009. Uçak yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı, *Doktora Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [58] <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=958> Stainless Steel Grade 2205. 08 Mart 2011.
- [59] <http://www.ekipmuhendislik.com.tr/teknik-bilgiler/paslanmaz-celik-cesitleri.htm> Paslanmaz Çelik Çeşitleri. 10 Eylül 2011.
- [60] **Sakin, R.,** 2004. Bilgisayar destekli, çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, *Doktora Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [61] **Güleç, Ş., Aran, A.,** 1993. Malzeme Bilgisi”, İTÜ Makine Fakültesi, Ofset Atölyesi.
- [62] **Aran, A.,** “Yorulma Zorlaması ve Kırılması”, İTÜ Makine Fakültesi, Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [63] **Özsaraç, U.,** 2005. Raylı taşıtlarda teker bandajı-ray sisteminde dolgu kaynağı ve sabo parçaların aşınma ve yorulma davranışlarının incelenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [64] **TS ISO 1143,** 2002. Metaller-Dönen çubuk eğme yorulma deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [65] **Kumru N.,** Metalik Malzemelerde Yorulma Dayanımını İncelemek için Kullanılan Yorulma Makinaları, <http://www2.bayar.edu.tr/somamyo/docs/dergi/sayi4/4sayi7.pdf> 22 Aralık 2010.
- [66] **Aran, A.,** 1981. Kırılma Mekaniği Seminer Notları, *Tübitak Marmara Araştırma Merkezi*, Gebze.

- [67] **Özdemir, E. T.**, 2009. Kaynaklı çelik konstrüksiyonda oluşan kısa yorulma çatlakları, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [68] **TS 1487** Metallerin Yorulma Deneyi Genel Prensipleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [69] **TS EN ISO 6892-1** 2011. Metalik Malzemeler- Çekme Deneyi- Bölüm 1: Oda Sıcaklığında Deney Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [70] **Cingi, M.**, 2008. Oksit kaplı titanyum ve alaşımlarının yorulma davranışının incelenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [71] **Genel, K.**, 2000. İyon nitrülenmiş AISI 4140 çeliğinin yorulma ve korozyonlu yorulma davranışı, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [72] **Ozan, S., Çay, V. V.**, 2004. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 420 / AISI 1010 çelik çiftinin arayüzey mikroyapı özelliklerinin incelenmesi”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*.
- [73] **Westgate, S., A., Dunkerton, S. B.**, 1985. Friction and flash welding-mechanical properties reviwed, *The Welding Int. Research Bul.*, 49-53.
- [74] **Şık, A., Ertürk, İ., Önder, M.**, 2010. AA2024 Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 2, 139-147.
- [75] **Aran, A., Demirkol, M.**, 1995. Plastik Şekil Verme ve Teknolojisi, İTÜ Makine Fakültesi İmal Usulleri Ders Notları, İstanbul.
- [76] **Külekçi M. K., Şık, A., Kaluç, E.**, 2008. Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded oap joints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36/9, 877-882.
- [77] **Yaylacı, E.**, Malzemelerin Yorulması <http://eyupyaylaci.com/malzemelerin-yorulmasi> 25 Temmuz 2012.
- [78] **Ünal E.**, 2003. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 4340 çeliği ile paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımlarının araştırılması, *Y.Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [79] **Toribio, J., Kharin, V., Ayaso, F., Gonzalez, B., Matos, J., Vergara, D., Lorenzo, M.**, 2009. Failure Analysis of a lifting platform for tree pruning, *26th meeting of the Spanish Fracture Group*, 17, 4, 739- 747.
- [80] **Kırık, İ., Özdemir, N., Sarsılmaz, F.**, 2012. Microsture and mechanical behaviour of friction welded AISI2205/AISI1040 steel joints, *Materials testing in Joining Technology*, 54, 683–687.

ÖZGEÇMİŞ

Serdar MERCAN 1975 Sivas doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Sivas' ta tamamladı. 1994 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Ana Bilimdalı, Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümünde lisans eğitime başlayarak 1998 yılında bitirdi. 1999 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği İmalat ve Kontrüksiyon Ana Bilim Dalında yüksek lisans çalışmalarına başladı ve 2002 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1999 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Kangal Meslek Yüksek Okulunda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılında askerlik hizmetini tamamladı. 2005 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümüne Öğretim Görevlisi olarak atandı ve halen bu görevine devam etmektedir. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Bölümünde doktora öğrenimine başladı. CAD-CAM-CAE programları konusunda deneyimlidir. Evli ve iki çocuk babasıdır.