

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 4340
ÇELİĞİ İLE PASLANMAZ ÇELİKLERİN YORULMA
DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

134774

Engin ÜNAL

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSYON MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

134774

ELAZIĞ, 2003

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 4340
ÇELİĞİ İLE PASLANMAZ ÇELİKLERİN YORULMA
DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Engin ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 22.10.2003 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / ~~başarısız~~ olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK

Üye: Doç. Dr. Nuri ORHAN

Üye: Yrd. Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05.11.2003 tarih ve 41-2 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren ve her zaman desteğini gördüğüm danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK'a teşekkür ederim.

Deneylerin yapılması ve yorumlanması esnasında bilgilerine ve yardımlarına başvurduğum bölümümüz öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK'e, Metal Eğitimi öğretim üyelerinden Doç. Dr. Nuri ORHAN'a ve Yrd. Doç. Dr. Niyazi ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Gerek deneylerin yapılmasında, gerek tezin hazırlanmasında beni yalnız bırakmayarak her konuda yardımcı olan bölümümüz Yüksek Lisans Öğrencisi olan çok kıymetli arkadaşım Faruk KARACA'ya sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca emeği geçen fakültemiz teknisyenlerine ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde maddi destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Başkanlığı'na en derin şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	VI
SİMGELER LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. METALLERİN YORULMASI.....	7
2.1. Yorulma Mekanizması.....	8
2.3.1. Çatlağın Oluşması.....	10
2.3.2. Çatlağın İlerlemesi.....	13
2.3.3. Kırılma.....	14
2.3.4. Kaynaklı Parçaların Yorulması.....	16
2.2. Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler.....	17
2.3. S-N Diyagramları.....	19
2.4. Yorulma Deney makineleri.....	22
2.5. Yorulma Test Numuneleri.....	25
2.6. Yorulmaya Etki Eden Faktörler.....	27
2.6.1. Parça Biçiminin Etkisi.....	27
2.6.2. Parça Büyüklüğünün Etkisi.....	28
2.6.3. Yüzey İşlemleri.....	29
2.6.4. Korozif Ortamın Etkisi.....	30
2.6.5. Metalurjik Faktörlerin Etkisi.....	31
2.6.6. Sıcaklığın Yorulma Üzerine Etkisi.....	32
2.6.7. Zorlanma Alan Etkisi.....	33
2.6.8. Gerilme Gradyanının Etkisi.....	34
2.6.9. Metal Veya Alaşımın Soğukta İşlenmesi.....	36
2.6.10. Frekansın Etkisi.....	37
2.6.11. İmalat Yöntemlerinin Etkisi.....	37
3. SÜRTÜNME KAYNAĞI.....	39
3.1. Sürtünme Kaynağının Gelişimi ve Tanımlanması.....	39
3.2. Sürtünme Kaynağının Çeşitleri.....	42
3.2.1. Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı.....	42
3.2.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	43
3.2.3. Kombine Edilmiş (Hibrid) Sürtünme Kaynağı.....	44
3.3. Sürtünme Kaynağı Makinesinden Beklenen Özellikler.....	45
3.4. Sürtünme Kaynağında Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti.....	46
3.5. Malzemelerin Sürtünme Kaynağına Hazırlanması ve Dizaynı.....	48
3.6. Sürtünme Kaynağı Parametreleri.....	49
3.7. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları.....	51
3.8. Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları.....	51
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	54
4.1. Çalışmanın Amacı.....	54
4.2. Kullanılan Malzemeler.....	54
4.3. Sürtünme Kaynağı Deneyleri.....	55
4.4. Metalografik İncelemeler.....	56
4.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	57
4.6. Çekme Deneyi.....	57
4.7. Dönerek Eğmeli Yorulma Deneyi.....	57

5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	59
5.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....	59
5.2. Mikrosertlik Ölçümleri.....	61
5.3. Metalografik İncelemeler.....	65
5.4. Yorulma Deneyi Sonuçları.....	79
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	94
EK.1 EDAX Analiz Sonuçları.....	95



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Kayma bantlarının şematik görünüşü	9
Şekil 2.2 Tane içi ve taneler arası kırılma.....	15
Şekil 2.3 Konik — çanak kırılmasının oluşumu.....	16
Şekil 2.4 Yorulma deneyi ile ilgili gerilme - zaman çevrimi.....	18
Şekil 2.5. Sabit genleşme ve sinusoidal yükleme için S-N eğrileri.....	20
Şekil 2.6 Dönen eğilmeli yorulma cihazının şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.7 Dönen eğilmeli konsol tipi yorulma cihazının şematik olarak gösterimi.....	24
Şekil 2.8 Eğilmeli yorulma cihazının şematik olarak gösterimi.....	24
Şekil 2.9 Çekme-basma tipli yorulma cihazının şematik olarak gösterimi.....	25
Şekil 2.10 ASTM E - 466'ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri	26
Şekil 2.11. Yorulma deney numuneleri.....	28
Şekil 2.12 Isı ve yükleme sayısına bağlı olarak çizilen S -N eğrisi.....	33
Sekil 3. 1 Sürtünme kaynağı kademelerinin şematik gösterimi.....	40
Sekil 3.2 Sürtünme kaynağının uygulama şekilleri.....	41
Sekil 3.3 Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı.....	42
Sekil 3.4 Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı.....	42
Sekil 3.5 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı makinesinin şematik gösterimi.....	43
Sekil 3.6 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı işlem büyüklükleri.....	43
Şekil 3.7 Volan tahrikli sürtünme kaynağı makinesinin şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.8 Volan tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı işlem büyüklükleri.....	44
Şekil 3.9 Kombine edilmiş sürtünme kaynağında zamana bağlı işlem büyüklükleri.....	45
Şekil 3.10 Kaynak esnasında gerekli güç ihtiyacının yöntemlere göre karşılaştırılması.....	52
Şekil 4.1 Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi şematik resmi	55
Şekil 4.2 Sürtünme kaynak numunesi.....	56
Şekil 4.3 Metalografik muayene numunesi şekli.....	56
Şekil 4.4 Soğuk Çekme Numunesi.....	57
Şekil 4.5 Dönerek eğmeli yorulma cihazının şematik resmi.....	58
Şekil 4.6 Dönerek eğmeli yorulma deney numunesi.....	58
Şekil 5.1 1500 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI4340 - AISI304 çiftinin çekme eğrisi.....	59
Şekil 5.2 1800 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 304 çiftinin çekme eğrisi.....	60
Şekil 5.3 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI304 çiftinin çekme eğrisi.....	60
Şekil 5.4 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 440 çiftinin çekme eğrisi.....	61
Şekil 5.5 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 430 çiftinin çekme eğrisi.....	61
Şekil 5.6 1500 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 304 çiftinin mikrosertlik dağılımı.....	62
Şekil 5.7 1800 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 304 çiftinin mikrosertlik dağılımı.....	62
Şekil 5.8 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 304 çiftinin mikrosertlik dağılımı.....	63
Şekil 5.9 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 440 çiftinin mikrosertlik dağılımı.....	63
Şekil 5.10 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - AISI 430 çiftinin mikrosertlik dağılımı.....	64
Şekil 5.11 Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - Paslanmaz Çeliklerin mikrosertlik dağılımı.....	65

Şekil 5.12 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.....	66
Şekil 5.13 1800 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.....	66
Şekil 5.14 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.....	67
Şekil 5.15 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 440 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.....	67
Şekil 5.16 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 430 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.....	68
Şekil 5.17 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme - ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.....	68
Şekil 5.18 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme - ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.....	69
Şekil 5.19 1800 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme - ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.....	69
Şekil 5.20 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme - ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.....	70
Şekil 5.21 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 430 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme - ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.....	70
Şekil 5.22 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı.....	71
Şekil 5.23 1800 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı.....	72
Şekil 5.24 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 440 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı.....	72
Şekil 5.25 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 430 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı.....	73
Şekil 5.26 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 304 çeliğinde oluşan kayma bantları SEM fotoğrafı.....	73
Şekil 5.27 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 304 ana metal - ısıdan etkilenmiş bölge SEM fotoğrafı.....	74
Şekil 5.28 1500 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 430 kısmındaki tanelerin yönelmesini gösteren optik fotoğrafı.....	74
Şekil 5.29 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi optik fotoğrafı.....	75
Şekil 5.30 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 430 kaynaklı numunenin AISI 430 ısıdan etkilenmiş bölgesi optik fotoğrafı.....	75
Şekil 5.31 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 440 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme - ısıdan etkilenmiş bölgesi optik fotoğrafı.....	76
Şekil 5.32 1500 d/d'de AISI 4340 - 304 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.....	77
Şekil 5.33 1800 d/d'de AISI 4340 - 304 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.....	77
Şekil 5.34 2100 d/d'de AISI 4340 - 304 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.....	78
Şekil 5.35 2100 d/d'de AISI 4340 - 440 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.....	78
Şekil 5.36 2100 d/d'de AISI 4340 - 430 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.....	79
Şekil 5.37 AISI 4340 - 304 çiftinin devir sayısına bağlı çekme - yorulma dayanımı eğrisi.....	80
Şekil 5.38 1500 d/d AISI 4340 - 304 çiftinin S - N grafiği.....	80
Şekil 5.39 1800 d/d AISI 4340 - 304 çiftinin S - N grafiği.....	81
Şekil 5.40 2100 d/d AISI 4340 - 304 çiftinin S - N grafiği.....	81
Şekil 5.41 2100d/d AISI 4340-440 çiftinin S - N grafiği.....	82
Şekil 5.42 2100 d/d AISI 4340 - 430 çiftinin S - N grafiği.....	82
Şekil 5.43 AISI 4340 - 430 çiftinin devir sayısına bağlı S - N grafiği.....	83

Şekil 5.44 AISI 4340 çeliği ile 2100 d/d'da birleştirilen paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımı grafiği.....	83
Şekil 5.45 1500 d/d'da AISI 4340 - 304 çiftinin 1286 Mpa gerilmede 3845 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	84
Şekil 5.46 1500 d/d'da AISI 4340 - 304 çiftinin 1286 Mpa gerilmede 3845 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	85
Şekil 5.47 1800 d/d'da AISI 4340 - 304 çiftinin 1000 Mpa gerilmede 11482 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	85
Şekil 5.48 1800 d/d'da AISI 4340 - 304 çiftinin 929 Mpa gerilmede 34674 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	86
Şekil 5.49 2100 d/d'da AISI 4340 - 304 çiftinin 1000 Mpa gerilmede 6310 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	86
Şekil 5.50 2100 d/d'da AISI 4340 - 304 çiftinin 857 Mpa gerilmede 22387 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	87
Şekil 5.51 2100 d/d'da AISI 4340 - 440 çiftinin 857 Mpa gerilmede 4571 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	87
Şekil 5.52 2100 d/d'da AISI 4340 - 440 çiftinin 714 Mpa gerilmede 13183 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	88
Şekil 5.53 2100 d/d'da AISI 4340 - 430 çiftinin 643 Mpa gerilmede 30200 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	88
Şekil 5.54 2100 d/d'da AISI 4340 - 430 çiftinin 643 Mpa gerilmede 30200 çevrim sonucu kınlan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.....	89

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Çekme mukavemetine göre yorulma mukavemeti.....	36
Tablo 3.1. Sürtünme kaynağının diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması.....	53
Tablo 4.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri.....	54
Tablo 5.1. Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI4340 - Paslanmaz Çeliklerin çekme deneyi değerleri.....	59
Tablo 5.2. Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 - Paslanmaz Çeliklerin mikrosertlik değerleri.....	64
Tablo 5.3. AISI 4340 çeliği ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin yorulma dayanım değerleri...	79



SİMGELER LİSTESİ

σ	: Gerilme (N/mm ²)
$\sigma_{\max}$	: Maksimum gerilme (N/mm ²)
$\sigma_{\min}$	: Minimum gerilme (N/mm ²)
σ_{ak}	: Akma gerilmesi (N/mm ²)
σ_{emy}	: Emniyet gerilmesi (N/mm ²)
σ_m	: Ortalama gerilme (N/mm ²)
σ_a	: Gerilme genliği (N/mm ²)
n	: Çevrim sayısı
N	: Dayanma veya yorulma periyot sayısı
S	: Basınç (Mpa)
σ_D	: Yorulma sınırı (N/mm ²)
σ_A	: Yorulma sınırındaki gerilme genliği (N/mm ²)
K_f	: Yorulma dayanımı azaltma faktörü
R	: Gerilme oranı
A	: Genlik oranı
P_1	: Sürtünme basıncı (Mpa)
P_2	: Yığma basıncı (Mpa)
t_1	: Sürtünme süresi (sn)
t_2	: Yığma süresi (sn)
ϵ	: Uzama

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 4340 ÇELİĞİ İLE PASLANMAZ ÇELİKLERİN YORULMA DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Engin ÜNAL

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2003, Sayfa : 115

Ergitme kaynak yöntemlerinde uygulanan işlem şartlarına bağlı olarak, malzeme veya yerel geometrik etkilerin oluşturduğu süreksizliklerde meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, ferritik (AISI 430), martenzitik (AISI 440) ve östenitik (AISI 304) paslanmaz çeliklerin AISI 4340 çeliği ile farklı devir sayılarında sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirlikleri ve kaynaklı numunelerin yorulma dayanımları incelenmiştir.

Deney çalışmalarında, sürekli tahrikli sürtünme makinesi kullanılarak 1500, 1800 ve 2100 d/dak. işlem parametrelerinde sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin kaynak ara bölgeleri optik ve SEM mikroskopları ile incelenmiş, EDAX analizleri yapılmış ve mikrosertlik dağılımları Vickers sertlik skalasında belirlenmiştir. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Yorulma deneyleri dönerek eğmeli yorulma deney cihazında yapılmıştır. Ayrıca yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri SEM mikroskobunda incelenerek kırılma tipi belirlenmiştir.

Çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konunun önemi ve literatürdeki yeri verilmiştir. İkinci bölümde yorulma mekanizması, yorulmaya tesir eden faktörler ve yorulma ile ilgili temel kavramlar incelenmiştir. Üçüncü bölümde sürtünme kaynağı yöntemi, çeşitleri ve uygulama alanları tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde çalışmanın amacı, deney ve ölçme yöntemleri verilmiştir. Çalışmanın beşinci bölümünde deney bulguları ile ilgili literatür doğrultusunda tartışılarak yorumlanmış, altıncı ve son bölümde ise, deneylerin sonunda elde edilen sonuçlar verilerek, öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Sürtünme Kaynağı, Yorulma, Paslanmaz Çelik, AISI 4340 Çeliği.

ABSTRACT

Master Thesis

THE INVESTIGATION OF FATIGUE STRENGTH OF STAINLESS STEELS TO AISI 4340 STEEL WELDED BY FRICTION WELDING

Engin ÜNAL

Firat University

Graduate School of Science

Department of Mechanical Education

2003, Page : 115

The high stresses appeared in discontinuities resulting from material or local geometric effects according to process conditions in conventional welding methods play significant role in failure process of join welded.

In this study, weldability of ferritic (AISI 430), martenzitic (AISI 440) and austenitic (AISI 304) stainless steels to AISI 4340 steel by friction welding and fatigue strength of specimens welded have been investigated according to different rotation speeds.

In experiments, the welding zones of specimens joined in 1500, 1800 and 2100 cycle per minute by friction welding using a direct-drive friction welding machine were examined optic and Scanning Electron Microscopy (SEM) and analyzed by EDAX. The microhardness distributions on welding zone were determined at Vickers scale. The fatigue test and tensile test were performed to welded specimens in order to determine mechanical endurance. The fatigue tests were performed using a rotational bending fatigue test machine. In addition, fracture types were determined from fractographic examinations.

The study is consisting of six chapters. In the first chapter, importance of this subject and relevant literatures were explained. In the second chapter the mechanism of fatigue, the factors effecting to fatigue and basic concept presented. In the third chapter, the friction welding, various friction welding methods were explained. In fourth chapter the aim of study, material and method were presented. In fifth chapter results were discussed, and sixth and final chapter, general results were concluded and recommendations were given.

Keywords: Friction Welding, Fatigue, Stainless Steel, AISI 4340 Steel.

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte, farklı malzemelerin birleştirilerek kullanılması gereksinimi ortaya çıkmıştır. İki farklı alaşımdaki çeliğin birleştirilmesinde en uygun yöntemin kaynaklı birleştirme olduğu bilinmektedir (Anık, 1983). Kaynak işleminin sonrasında, kaynak bölgesinin özelliklerinin, birleştirilen farklı alaşımdaki çeliklerin özelliklerinden, doğal olarak farklı olması önemli sorunları gündeme getirmiştir. Çok değişik kaynak yöntemleri içerisinde, ergitme kaynak yöntemlerinin kullanılması, bu sorunları daha da artırmaktadır (Yılmaz, 1993). Kaynak sonrası oluşan bağlantının özelliklerinin belirlenmesinde, birleştirilen malzemelerin çeşitli özellikleri ile, birlikte oluşturdukları faz diyagramları önemli etkenlerdir (Bargel ve diğerleri, 1988). Bununla birlikte, birleştirilecek malzemelerin birbirinden farklı alaşımlar olması, hatta bunların çok sayıda bileşenden oluşması sonucunda, öngörülebilmesi imkansız problemlerle karşılaşmaktadır. Birleşme bölgesinde, bağlantıyı oluşturan malzemelerin bileşimine ve bileşenlerine bağlı olarak, bileşim ve özellik bakımından çok farklı bölgeler ortaya çıkar (Yılmaz, 1993).

Ergitme kaynağı yöntemlerinin cüruf kalıntısı, porozite gibi kaynak hatalarına açık bir yöntem olması ve soğuma nedenli makro düzeyde iç gerilmelerin oluşması, bu yöntemlerin önemli dezavantajları olup, kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Bu sebeple, farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde eğer boyutları ve şekilleri müsaade ediyorsa, bir ergitme 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, ergitme kaynağı yöntemlerine büyük üstünlük sağlamaktadır (Tülbentçi ve Yılmaz, 1989).

Bu katı hal kaynak yöntemlerinden en önemlisi ve uygulanabilirliği en fazla olan sürtünme kaynağı yöntemi ile ilgili çalışmalar, değişik malzemeler ve parametrelere göre, birçok bilim adamı tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çeşitli mühendislik tasarımlarında bir çok makina parçası, kullanım şartlarında değişen ve tekrarlanan gerilmelerin bileşik etkisi altında çalışır. Çalışma esnasında yükler düzensiz veya periyodik değişimler gösterebilir. Bu şartlar altında çalışan makina parçaları çekme ve akma mukavemetlerinin altında kırılabilir. Yorulma adı verilen bu olay ilk olarak 1829 yılında demir zincirleri üzerinde tekrarlı yüklerin etkisini araştıran W. A.S. Alber tarafından incelenmiştir.

19. Yüzyılın ortalarında demiryolu sistemlerinin hızlı gelişmeye başlamasıyla, demiryolu makaslarındaki yorulma kırılmalarının, tekrarlı yüklerin etkileri ile ortaya çıktığı sonucuna varılmış ve sık karşılaşılan bir problem olmuştur. Teknolojinin ilerlemesi ile 20. Yüzyılın başlarında, yüksek hızlı makineler, yüksek hızlı türbinlerin kullanılması ve havacılık endüstrisinin gelişmesiyle yorulma problemlerini anlamak ve önlemler geliştirmek için çalışmalar hızla artmıştır. Günümüzde yorulma problemlerini anlamak ve çözebilmek için bir

çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar özetlendiğinde, aşağıda belirtilen sonuçlar ile karşılaşılmıştır.

Paslanmaz çelikler için, dövme basıncı değerinin sürtünme basıncının iki katı olması gerektiği (Ishibashi ve diğerleri, 1983) tarafından deneysel bulgu olarak verilmiştir.

Paslanmaz çelikleri çeşitli endüstri sektörleri için uygulanabilir kılan, geniş bir yelpazedeki mekanik özelliklere ve korozyon mukavemetine sahip olmalarıdır. Bu yüzden dünya çapında paslanmaz çelik üretimi yıllardır düzenli olarak artmaktadır. Ekipmanların imalinde ve tesislerin inşasında kaynaklama önemli bir role sahiptir. Paslanmaz çeliklere uygulanan kaynaklama proseslerinde, son zamanlarda kaydedilen gelişmeler gözden geçirildiğinde, önceleri konvansiyonel ark kaynağına ilgi yönelmiş, daha sonra güç kırıışı metotlarına yoğunlaşmış ve son olarak katı hal birleştirme teknikleri uygulanmıştır (Gooch ve diğerleri, 1996). Halen günümüzde katı hal birleşme tekniklerinden olan sürtünme kaynağı, paslanmaz çelikler için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Itoh ve diğerleri (1989) yılında, kaynaklı parçaların, yorulma çatlaklarının kaynak metalinde başlaması ve kaynak hattına dik ilerlemesine dikkat ederek yorulma ömür tahmini yapmışlardır. Çalışmada, C-Mn-Si'lu çelik ve Östenitik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deneylerde kaynaklı ve kaynaksız numunelerde, yorulma çatlaklarının ilerlemesine neden olan kalıntı gerilme etkisini araştırmışlardır. Deneyler, gerilme oranının $R > 0$ olduğu, sabit ve değişken gerilme genliklerinde yapılmıştır. Kaynaklı parçalarda yorulma çatlaklarının büyümesinin, kalıntı gerilmelerin etkisine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca çatlak büyüme miktarını tahmin etmek için esas metalden alınan verileri kullanmanın da mümkün olduğunu göstermişlerdir. Yorulma ömür tahminlerini lineer elastik yorulma bağıntılarını kullanarak, yorulma çatlak ilerlemelerini ve kırılma yüzeylerini de SEM ve optik mikroskop kullanarak incelenmişlerdir.

Ishikawa ve Haze (1994) yılında, kaynaklı parçalarda ayrılma (cleavage) kırılmasının, kırılma şekilleriyle ilişkisini araştırmışlardır. Ayrılma kırılması işleminin hem kırılma tokluğu belirlenmiş hem de mikroyapıya etkisi araştırılmıştır. Özellikle bu çalışmada gevrek kırılma hali incelenmiştir. Isı tesiri altında kalan bölge, kaynaklı parçanın kalınlığı boyunca gözlenmiştir. Ayrılma kırılmaları, kalıntılarda yada martenzit gibi ikinci faz taneciklerinde başlamıştır. Numuneler eğilme gerilmesine maruz bırakılarak mikroskobik kırılma gerilmesi tayin edilmiştir.

Jenning (1971), 19 mm çaplı Cr – Mo / Cr çelik çifti kullanılarak, kaynak öncesi ve sonrası ısıt işlemler uygulayarak değişken tutulan parametrelerde sürtünme kaynak işlemini gerçekleştirmiştir. Elde etmiş olduğu bu kaynaklı bağlantılara eğme, çekme ve yorulma testleri uygulayarak kaynak kalitesini belirlemede etkili olan parametreleri araştırmıştır. Numunelere

uygulanan çekme ve yorulma testlerinde bütün kırılmalar kaynak bölgesi dışında olmuştur. Kaynak sonrasında uygulanan ısıtma işlemlerin mekanik özellikler üzerinde önemli etkileri olduğunu tespit etmiştir.

Voinov ve diğerleri (1972), 16 mm çaplı St 20 ve St 40 çelik çiftini $P_1 = 50$ Mpa, $P_2 = 100$ Mpa, $t_1 = 3$ sn ve $t_2 = 1,5$ sn değişkenlerini kullanarak yapmış olduğu sürtünme kaynaklı numunelere çentik darbe ve yorulma deneyleri uygulayarak $n = 1200 / 4200$ d/d dönme hızının kaynak kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek için parametre optimizasyonu yapmıştır. Yüksek dönme hızı çentik darbe dayanımında daha iyi sonuç verirken, yorulma deneyinde her iki dönme hızında da iyi sonuçlar alınmıştır.

Ellis (1977), literatüre dayanarak yapmış olduğu sürtünme kaynaklı birleştirmelerde kaynak kalitesini etkileyen parametrelerin; devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığılma basıncına bağlı olduğunu, ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerine en etkin parametrenin devir sayısı olduğunu ileri sürmüştür.

Fukuchi ve diğerleri (1997), sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş SUS 303 / SUS 303 paslanmaz çeliklerini yorulma deneylerine tabi tutmuş ve sürtünme kaynağının oluşturduğu, mikroyapıları incelemiştir. Kaynak bölgesine dairesel çentik açılmış numuneler kullanılarak yorulma ömrünün ana metale göre daha düşük olduğunu belirlemiştir.

Mohandas ve diğerleri (2000), sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş $\alpha + \beta$ Ti alaşımının mekanik özellikleri, sürtünme basıncının ve ısıtma işlemin mikroyapıda oluşturduğu değişikliklerin incelenmesi sonucu olarak yüksek basınçlı kaynakların mekanik özellikleri darbe dayanımı dışında ana metalinkilerle karşılaştırılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun ana sebebinin martenzit ve $\alpha + \beta'$ nın kaynamış mikroyapısına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. 700 ile 960 °C' de yapılan ısıtma işlemlerde darbe dayanımının 960 °C'de azaldığını bunun nedeni olarak mikroyapının zayıf direncine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Nishi ve diğerleri (2001), yorulma dayanımı ve yorulma davranışında tamamlanmış kaynak bölgesinin araştırılması için 316L paslanmaz çeliğinin kaynağının yorulma testini gerçekleştirmişlerdir. Kaynak metalinin yorulma çatlakları ilerleme testi, kaynağın artan yorulma ömrünü belirlemek için yapmışlardır. Tamamlanmamış kaynağın bir çatlak gibi davrandığını ve toplam yorulma ömrünü oldukça azalttığını görmüşlerdir. Kaynağın çatlak ilerleme değerlerinin, kaynak metalinkisiyle uyum gösterdiğini saptamışlardır.

Hong ve diğerleri (2002), yüksek mikroyapı gözlemi düşük çevrimli yorulma özelliklerine ferritin etkisini araştırmış, yorulma çatlaklarının başlangıcı ve ilerleme mekanizmaları yüklem doğrultusuna bağlı olan ferrit liflerinin doğrultusuna bağlı olarak çeşitlilik gösterdiği saptanmıştır. Yüklem doğrultusuna paralel olan ferrit lifleri oluşması durumunda ince bantların kaymasından dolayı yorulma çatlakları başlamakta ve ince çizgiler

boyunca ilerlediğini gözlemiştir. Ferrit liflerinin yükleme doğrultusuna dik olduğu durumlarda taneler arasında çatlak oluşum bölgesinin ortaya çıkmasını sağlar, çatlaklar önemli ölçüde yükleme doğrultusuna dik yüzeyde oluşur. Böylece tanecik sınırındaki çatlakların ilerlemesi hızlanır. Sonuç olarak paralel ferrit liflerinin yorulma özelliklerine az da olsa etkisi olduğu belirlenmiştir.

Park ve diğerleri (2002), yaptıkları çalışmada yüksek çevrimli yorulma ömrünün belirlenmesi için oluşturulan model mikroyapı değişimlerine bağlı olarak geliştirmişlerdir. Özellikle tanecik boyutuna bağlı olarak küçük çatlak ilerlemesi teorisi mikroyapı değişkinlerinin etkisi hesaplanarak deneysel verilerle karşılaştırılarak tutarlılık gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır.

Lin ve diğerleri (2002), martenzitik paslanmaz çelik kaynaklarında ısı yorulma çatlakları ömrüne ferritin etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar ferrit miktarı ve ısı yorulma çatlakları arasında lineer bir bağıntı olmadığı görülmüştür. Ferrit miktarının hacimce %31,5 den az olduğu zaman çatlak direnci için faydalı bir faktör olduğunu belirlemişlerdir.

Komotori ve diğerleri (2001), indiksiyonla yüzeyleri sertleştirilen dört farklı numune hazırlanarak sertleştirme kalınlığının yorulma özelliklerine etkisini araştırmak için döner eğmeli yorulma testleri uygulamışlardır. Sertleştirilmiş tabakanın genişlemesiyle yorulma ömrünün arttığı bu kalınlığın minimum 1,8 mm olması gerektiğini ileri sürmektedirler.

Yan ve diğerleri (2000), %45 C'lu çelik çentikli sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve yorulma testine tabi tutulmuştur. Sabit dağılımlı yükleme altındaki yorulma testinin istatistiksel ve deneysel analizleri küçük boyutlardaki çentikli sürtünme kaynaklı 1045 çeliğinin yorulma ömrü basınç dağılımının fonksiyonundan yorulma direnci katsayısı çıkarılarak istatistiksel analizlerle kontrol etmişlerdir.

Tjernberg (2000), merkezinde dairesel çatlak bulunan bir sürtünme kaynağının yorulma ömrü test edilen ömür ile hesap edilen yorulma ömrü ile karşılaştırılması sonucu kaynağın merkezindeki çatlak yarı çapı 5 – 6mm ve çatlak basınç yoğunluk faktörleri ağırlık fonksiyonu yöntemi ile hesap edilen artık gerilme merkezde olduğundan hesaplanan yorulma ömrü yorulma testlerinden ortalama %30 daha uzun çıkmakta, bunun sebebi merkezdeki gerilme basıncının hesaplanandan daha yüksek olduğunu ileri sürmektedir.

Yılmaz ve diğerleri (2003), sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş Alüminyum/Çelik çiftlerinin kaynak ara yüzeyi kalitesi, kaynak kalitesini belirlediğini ileri sürmektedir. Deneylerinde optik, elektron mikroskobu ve çekme deneyi ölçümleri yaparak kaynak bölgesinde intermetalik faz olduğunu görmüştür. İntermetalik bölgenin ara yüzeyi sürtünme süresinin karesiyle doğru orantılı olduğunu bunun da difüzyona neden olduğunu belirlemişlerdir.

Tavara ve diğerleri (2001), dubleks paslanmaz çelik kaynaklarında korozyon yorulmasının mekanizmasını analiz etmiş ve nikelin yorulma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Kimyasal bileşimi ana malzemeye benzer olan nikel miktarı ağırlıkça %2,8, %4,7 , %6,8 ve %9,8 olmak üzere dört çeşit elektrot kullandıkları numunelerin yorulma deneyleri sonucunda en iyi elektrodun %4,7 nikel içeren elektrot olduğunu saptamışlardır.

Iacoviello ve diğerleri (1999), 22Cr 5Ni dubleks paslanmaz çeliğinin yorulma davranışı çeşitli ısı çevrimlerle incelenmiş, yorulma deneyleri hava ortamında hem basınç değeri hem de yükleme doğrultusunun etkisini araştırdıkları çalışmada yüzey pürüzlülüğü analizleri, kırılma morfolojisi ve yorulma çatlakları ilerlemesi verileri arasındaki bağıntıyla birlikte, yüzey pürüzlülüğünün yorulma çatlaklarını yükleme şartlarına bağlı olarak etkilediğini görmüşlerdir.

Torres ve Voorwald (2001), AISI 4340 çeliğinin yorulma ömrünün arttırılmasında dört farklı parametrede uygulanan bilyeli dövme işlemi sonucunda döner eğmeli yorma testi kullanılmıştır. Yorulma deneyleri sonucunda, bilyalı dövme şiddetinin arttırılmasıyla basınçlı artık gerilmenin azaldığı ve bunun sonucu olarak da yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.

Orhan ve Özlü (2003), martenzitik paslanmaz çelikle transmisyon çeliğinin sürtünme kaynağında, yığma basıncı parametresini 10, 20 ve 30 Mpa olarak uygulanan kaynaklı numunelerde transmisyon çeliğinde üç farklı bölgenin oluştuğu ve birleşme ara kesiti civarında sertliğin oldukça fazla olduğu, yığma basıncının arttırılmasıyla arakesitte sertliğin arttığı, bu malzeme çiftine ait bağlantının mekanik özellikleri üzerine olumsuz etkileri olabileceği kanısına varmışlardır.

Yilbaş ve diğerleri (1995), çelik – alüminyum ve alüminyum – bakır malzeme çiftleri kullanarak yapmış oldukları sürtünme kaynaklı birleştirmelere yorulma, çekme ve çentik darbe deneyleri uygulayarak üç temel parametrenin (dönme hızı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi) kaynak kalitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar 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 oluştuğu görülmüştür. Ancak, yüksek dönme hızı ve sürtünme basıncı, temas yüzeyi üzerindeki alüminyum oksit filminin kırılmasını sağlayarak ara yüzeyde yeterli deformasyonu sağladığı görülmüştür. Alüminyum – bakır çifti kaynaklı numunelere uygulanan kırılma testleri sonucunda kırılma yüzeyinde gri bir alüminyum tabakasının varlığından bahsetmişlerdir.

Armas ve diğerleri (1998), ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklerde düşük çevrimli yorulma esnasında dinamik zorlamanın grafiklerini çıkararak bu grafiklerden çeşitli sıçramaların olduğu, bu sıçramaların karbon atomlarından kaynaklandığını düşünmektedirler.

Yuri ve diğerleri (2000), TIG kaynağı ile birleştirilmiş SUS304L ve SUS316L

paslanmaz çelikleri için hem ana metalin hem de kaynakla birleştirilmiş numunelerin yorulma özellikleri incelenmiş, bu özelliklere δ -ferrit ve kaynak yapısının etkisini araştırmışlardır. Yorulma testlerinde kaynaklı metalin ana metale göre %35-70 arasında yorulma ömründe düşüş olduğu gözlenmiş ve δ -ferritin etkisini açık ve belirgin bir şekilde tespit edememişlerdir.

Krupp ve diğerleri (2001), metastabil östenitik paslanmaz çelikler monoton yüklü çevrimler esnasında kısmen martenzitik dönüşüm gerçekleştirirler. AISI 304, AISI 304L ve AISI 301 tipinde üç çeşit paslanmaz çelik kullanılan yorulma testlerinde numunedeki martenzitik dönüşümler önemli ölçüde; plastik gerilmenin frekansına, numunenin şekline, numunenin sıcaklığına, tane boyutuna ve kimyasal bileşimine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Sahin ve diğerleri (1998), bakır ve çelik çubukların sürtünme kaynağının araştırılması için teorik bilgiler ışığında belirlenen kaynak parametreleri ile birleştirilmiştir. Numunelerde kaynak kesitinde difüzyon boşlukları gözlemlenmiş, kaynağın mekanik özelliklerini etkileyen parametrelerin istatistiksel analizi sonucu devir sayısı, sürtünme süresi ve yükleme basıncı olduğunu saptamışlardır.

Schino ve Kenny (2003), küçük taneli östenitik paslanmaz çeliğinin yorulma davranışında tane boyutları 1 – 47 μ m arasında değişen numuneler kullanılarak yorulma direncinin tane boyutu arttıkça azaldığı gözlenmiştir.

Ogi ve diğerleri (2000), EMAR (elektromagnetik akustik rezonans) kullanarak % 0.45 karbonlu çeliğin dönerek eğmeli testi esnasında yüzeyde oluşan çatlak dalgalarını ve faz hızlarını incelemişlerdir. Silindir şeklindeki numunenin çevresinde merkezine dik yönde çatlak oluşumları gözlenmiş, yorulma ömrünü ve yorulma basıncının genişliğine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Alınan sonuçlardan ultrasonik özelliklerin artması çatlak ilerlemesinde çatlak gelişimi ile dislokasyonlarda aşırı değişikliklere sebep olduğunu saptamışlardır.

Nascimento ve diğerleri (2001), yüzeyi tungsten karbürle termal püskürtme yöntemiyle kaplanmış AISI 4340 çeliğinin dönerek eğmeli yorulma davranışının geleneksel sert krom kaplama yöntemi ile elde edilenden daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

Oliviera ve diğerleri (2001), temperlenmiş ve su verilmiş AISI 4340 çeliğinin yüzeyi 220 μ m kalınlığında termal spre y yöntemi ile Colmonoy 88 alaşımı ile kaplanmıştır. Ağırlıkça %4 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen döner eğmeli yorulma deneyinde kaplanmış numunenin yorulma dayanımının hava ortamındakine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kaplanmamış malzemenin korozyon yorulması ise hava ortamına göre çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

2. METALLERİN YORULMASI

Bir çok makina parçası ve yapı elemanı, kullanım esnasında tekrarlı yükler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlı yükler altında çalışan mekanik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeylerinde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayı görülür. Yorulma adı verilen bu olay ilk olarak 1829 yılında, demir zincirleri üzerinde bazı tekrarlı yükler uygulayarak, denemeler yapan W. A.S. Alber tarafından incelenmiştir.

Çalışma şartlarında gözlenen ilk yorulma sonucu kırılmalarının bir kaçı arabaların akslarında meydana gelmiştir. 19. Yüzyılın ortalarında demiryolu sistemlerinin hızla gelişmeye başlamasıyla, demiryolu akslarında yorulma sonucu oluşan kırılmalar, tekrarlı yük etkilerinin ne kadar önemli olduğu ve ciddi bir şekilde incelenmesini gerektiğini gösteren yaygın bir problem olarak ortaya çıkmıştır. Akma noktasının altında çalışan makine parçalarının çoğu, nedeni bilinmeyen sebeplerden dolayı kırılmışlardır. Açıklanamayan çalışma bozuklukları sık sık olurken, denemeler laboratuvarında akma noktasının altında kırılma şartları yeniden meydana getirilerek tekrarlanmıştır. 1852 ve 1870 yılları arasında Alman demiryolu mühendisi August Wöhler ilk olarak sistematik yorulma araştırmasını yaptı ve geliştirdi. Bir kaç farklı malzeme için deneyleri, büyük ölçüde demiryolu aksları üzerinde ve küçük miktarlarda eğilme, burulma ve radyal olarak tekrarlanan yüklerle geliştirdi. Wöhler temel verileri S-N diyagramı diye bilinen grafiklerde yorumladı (Collins 1981).

Teknoloji çağı diye bilinen 20. Yüzyılın başlarında, yüksek hızlı makineler, türbinlerin kullanılması ve havacılık endüstrisinin gelişmesiyle yorulma problemlerini anlamak için çalışmaların önemi giderek artmıştır. 20. Yüzyılın ortalarına kadar yorulma olaylarındaki çalışmalar, iki grupta incelenmiştir. Birinci grupta olarak metalurjistler ve fizikçilerin olduğu mikroskobik seviyede, ikinci grupta olarak da laboratuvarında deneysel verileri değerlendiren mühendislerin olduğu makroskobik seviye yapılmıştır. Bu periyot esnasında dislokasyon teorilerinin gelişmesiyle mikroskobik seviyede yorulmanın anlaşılması daha da ilerledi. Yorulma ömrünü ve gerilmesini daha iyi tahmin etmek için kullanılan yüksek hızlı bilgisayarların gelişmesiyle makroskobik seviyede önemli bir gelişme olmamıştır. Son olarak kırılma mekaniği fikri, farklı yorulma şartlarıyla karşılaşan bir dizayncıya faydalı pratik yeni bir yorulma ömür tahmini için temel olması kadar, çatlak yayılma davranışının anlaşılmasında da önemli bir katkı sağlamıştır (Collins 1981).

Mühendislik malzemeleri çalışma şartlarında sık sık dalgalı ve periyodik yüklere maruz kalırlar. Uçakların kanatlarına türbülanslı hava şok tesiri yapar, pistonlu motorların bağlantı çubukları ileri geri hareket ederken eğilmeye zorlanır, yaprak yaylar eğilir ve bozulur. Mühendislikte deformasyon sebeplerinin en yaygını yorulmadır. Çekme, basma, sürünme ve

kırılma testlerinde uygulanan gerilmeler düşük ya da statiktir. Yorulma yükleri, ileri-geri kuvvet uygulamalarına ya da açık-kapalı basınç tiplerine benzer dinamik yüklerdir. Bu değişken yüklere periyodik yükleme denir. Kırılma şekli daima gevrek kırılmadır. Çünkü uygulanan gerilmeler, malzeme sünek olsa bile malzemenin akma gerilmesinden genelde daha düşüktür. Kırılma olduğu zaman önemli bir derecede akma ya da uzama olmaz.

Metalurjistler malzeme davranışlarını belirleyerek, akla uygun teoriler geliştirmelerine rağmen, yorulmayla oluşan kırılmalara sebep olan nedenleri tam olarak açıklayamamışlardır (Swanson 1974).

Kırılma yüzeyleri makroskobik ölçüde genellikle çekme gerilmesinin doğrultusuna diktir. Bir yorulma deformasyonu, kesit yükü taşıyabilecek kadar büyük olmadığı zaman, parçaların sünek bir davranışla kırıldığı yerde oluşur. Yani parlatma etkisinden dolayı malzemenin pürüzlü olan bölgesinde çatlak ilerlediği için genellikle kırılma yüzeyinin oluşması gibi tanımlanabilir (Dieter 1988).

Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genleşmeler ve büzölmelerden doğan ısıl gerilmelerde neden olmaktadır. Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcak çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar.

Yorulma bozulmasının oluşması için üç temel faktör gerekir;

1. Yeteri derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesi,
2. Uygulanan gerilmenin oldukça geniş bir değerde değişimi ve dalgalanması,
3. Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrar sayısında etkimesi,

Bunlara ek olarak yorulma için şartları değiştirmeye eğiliminde olan gerilme konsantrasyonu, korozyon, sıcaklık, aşın yükleme, metalurjik yapılar, kalıntı gerilmeler ve birleşik gerilmeler gibi faktörler de sayılabilir (Dieter 1988).

2.1. Yorulma Mekanizması

Yorulma olayı sonunda cisimde kırılmanın ne şekilde meydana geldiğini açıklamak için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar daha önceki yorulma deneyleri ile birlikte cisimlerin iç yapısının da muayene edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Özellikle son yıllarda elektron mikroskoplarında elde edilen büyük gelişmeler sayesinde iç yapı muayenesi tekniğinde kaydedilen ilerlemeler bu araştırmalarda önemli sonuçlara varılmasını sağlamıştır. Ayrıca yorulmuş numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde ne tür değişimler olduğu da bu çalışmalarda ele alınmıştır. Böylelikle değişik yollardan pek çok sayıda araştırmalar yürütölmüş olmasına rağmen yorulmada her hali açıklayan genel bir kırılma teorisini oluşturmak mümkün olmamıştır. Bununla beraber bu konuda yapılan çalışmalar yorulmada kırılmanın ne gibi

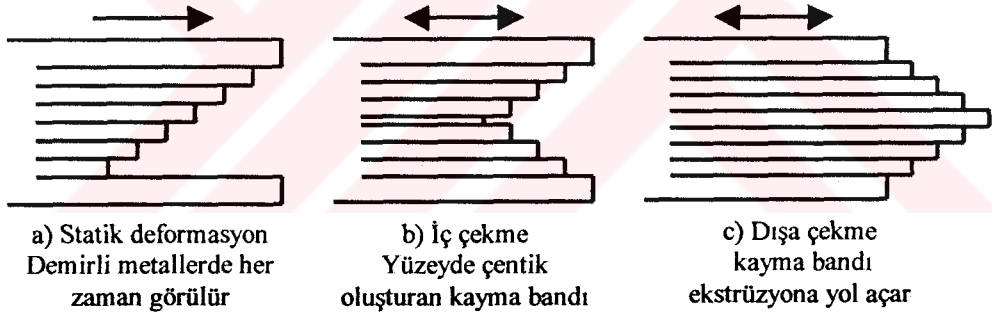
safhalar aşıldıktan sonra oluştuğunu bize kesin denilebilecek bir şekilde ortaya koymaktadır (Postacıoğlu 1981).

Yorulma mekanizmaları ile ilgili başlıca teoriler şunlardır:

Gough'a göre; Metal çevrimsel gerginlik altında aynı yönlü ve tek eksenli gerginlikte olduğu gibi aynı kristalografik yönlerde kayar.

Yalnız tek eksenli kayma, yapının her yerinde görülürken, yorulmada bazı tanelerde kayma hatları görülmez. Kayma hatları genellikle ilk birkaç bin çevrimde ortaya çıkar. Çevrim sayısı arttıkça, kayma bantları da artar. Fakat kayma bantlarının sayısı, çevrim sayısı ile doğru orantılı değildir. Bir çok metalde kayma, bir doygunluk değerine ulaşır. Bu, daha çok ağır kayma bölgelerinde görülür. İşte çatlaklar genellikle başlangıçta kayma bandına paralel olan ağır deformasyon bölgelerinde akışır. Çatlaklar yorulma sınırının altındaki gerilmelerde oluşmuştur. Yani; yorulma esnasında kaymanın oluşması, çatlağın oluşacağı anlamına gelmez. Yorulma testi bir yerde kesilip yüzey elektro parlatma ile parlatıldığı zaman bile yok olmayan inatçı kayma bantları embiryonik yorulma çatlaklarıdır. Bu tür bantla toplam yorulma ömrünün %5'inden sonra görülür. Bu bantlara küçük bir çekme gerilmesi uygulanmasıyla bantlar geniş çatlaklara dönüşür (Çapa 1972).

Wood'un mikro deformasyon teorisi:



Şekil 2.1 Kayma bantlarının şematik görünüşü (Çalık 1997).

Kayma bantları bir müddet sonra Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, yüzeyde çentikler ve pürüzler oluşturlar. Yorulma buradaki gerilme yoğunlaşması sonucu başlamaktadır.

Wood'a göre; yorulma çok küçük kayma hareketleri sonucu ($1\mu\text{m}$) oluşmaktadır. Halbuki, statik kayma bantları 100 ile 1000 μm boyunda olmalarına rağmen yorulmaya yol açmazlar.

Bu teoriye göre; küçük mikro kayma hareketlerinin sistematik bir şekilde önemli oranda bir deformasyon sertleşmesi meydana getirmeden büyük miktarda toplam deformasyona izin verdiğine inanılmaktadır.

Wood'un teorisi, yorulmanın iki aşamada meydana geldiğini ileri sürmektedir. Buna göre;

1. Aşama; Birinci aşama çatlak başlangıçta, inatçı kayma boyunca ilerler. Çok kristalli metallerde çatlak ilerlemesi ikinci çatlakla geçmeden önce, sadece birkaç atom çapı boyutunda ilerler. Birinci aşamada, çatlak ilerleme hızı genellikle çok düşüktür (sadece; birkaç $\mu\text{m}/\text{çevrim}$). İkinci aşamada ise, mikron/çevrim mertebesinde. Birinci aşamaya ait kırık yüzeyi genellikle belirgin özellikte değildir. İkinci aşamaya ait kırık yüzeyinde, her biri, her bir çevrimde oluşan kırığı gösteren çizgili bir görünüm vardır. Bu çizgiler, çekme gerilmesine diktir. Adeta, bu çizgiler sayılarak çevrim sayısı belirlenebilir. Bunlar ancak elektron mikroskobu ile görülebilir.

2. Aşama; Artık çatlak oluşmuştur. İnklüzyonlar yada ikinci faz parçacıkları, plastik deformasyon bölgesi içinde boşluklar oluşturularak birbirleri ve çatlak ucu ile birleşirler. Be nedenle, çatlak ilk duruma göre daha hızlı ilerler. Uzun ömürlü yorulmada ; $\sigma_{\max} < \sigma_{ak}$, $\sigma_{\min} < \sigma_{ak}$; ömrün tamamı çatlak oluşumu için harcanır. Malzemede platisite yoktur. Sadece kesit değişimi, yani süreksiz kısımda yerel plastik deformasyon vardır. Dolayısıyla çizik, çentik, kesit değişimi çatlak kaynağıdır (Çapa 1972).

Belirtildiği gibi değişken kuvvetlerin etkisi altında kaldıktan sonra bir cisimde meydana gelen kırılma iki safhada gerçekleşmektedir.

- a) Bir çatlak oluşması
- b) Bir çatlak ilerlemesi

2.3.1. Çatlak Oluşması

Değişken gerilmelerin etkisi altında bulunan bir metalde gerilme $\sigma_{\max}$ 'a ulaştığı zaman cisimde bir miktar plastik deformasyon meydana geldiğini kabul edelim. Bu başka bir deyişle $\sigma_{\max}$ değerine cismin akma sınırından daha büyük bir değer verilmesi demektir. Böyle bir durumda cisimde $\sigma_{\max}$ birinci defa uygulandığı zaman sünek cisimlerin bir özeliği olarak pekleşme olayı oluşur. Pekleşme olayı yükleme sayısı ile birlikte, yeni kayma düzlemlerinin meydana gelmesiyle, devamlı bir gelişme gösterir. Kolaylıkla anlaşılacağı gibi pekleşme hızı yükleme sayısı arttıkça bir azalma gösterecek ve en sonunda yükleme sayısı belirli bir değere ulaştıkça bu hız sıfır olacak veya bundan sonra pekleşmede bir gelişme olmayacaktır. Pekleşme olayının durması cismin iç yapısının kararlı bir duruma vardığını gösterir. Elektron mikroskobu ile yapılan incelemeler böyle bir durumun elde edildiğini açıkça göstermektedir. İç yapının bu kararlı durumunda cisimde dislokasyonlardan arınmış alt taneler meydana gelmiş bulunmaktadır. Bu alt tanelerin oluşturdukları şebeke deformasyona karşı koymakla bunun dışındaki bölgelerde cisim daha fazla deformasyon yapma olanağını elde etmiş olur. Bu

durumun bir sonucu olarak bazı yerlerde cisim diğer kısımlara göre çok daha fazla deformasyon yaparak “deformasyon yığılmaları” meydana gelir. Bu arada tane yüzeyindeki kusurlar da bu deformasyon yığılmasının artmasında etkin olurlar. İşte bu deformasyon yığılmasının bulunduğu bölgelerde diğer kayma düzlemlerinden farklı “persistent” denilen kalıcı kayma düzlemi bantları meydana gelir. Bu tür kayma düzlemleri yorulma olayının başında, örneğin bakır metalinde yorulma süresinin %5’ine ulaşıldığı zaman, teşekkül etmektedir. Bu kayma düzlemleri, boylarının yükleme sayısı ile birlikte artmasıyla, en sonunda çatlaklara dönüşmektedir (Postacıoğlu 1981).

Kayma düzlemlerinden itibaren çatlakların oluşması, kayma bantlarında intrusionların ve extrusionların meydana gelmesiyle gerçekleşir. Intrusion kayma bandının bir yerinde cismin içeriye doğru bastırılması extrusion ise dışarıya doğru itilmesidir. Hempel elektron mikroskobu ile yumuşak çelikte uygulanan gerilmenin yorulma sınırının altında bulunması halinde bile, bu tür çatlakların meydana geldiğini görmüştür. Graig çeliklerde yorulma süresinin %0.1’inde bu çatlakların oluşabileceğini yine elektron mikroskobu ile yaptığı bir araştırmaya dayanarak ileri sürmüştür. Bu çatlaklar yüzeyde veya yüzeyden çok az bir uzaklıkta, 2 mikron kadar meydana gelmeğe başlamaktadır. Yorulma kırılmalarının incelenmesinde yeni bir metot metal foliolarında bu çatlakların elektron mikroskobu ile doğrudan doğruya ve kolaylıkla görülebilmesidir.

Böylelikle yorulma olayında oluşan çatlakların plastik deformasyonlar sonunda meydana geldiği anlaşılmaktadır. Böyle bir sonuç karşısında, maksimum gerilmenin elastik sınırın altında olması halinde, plastik deformasyonlar meydana gelmemesiyle, yorulma kırılmasının oluşmaması gerekir. Ancak yapılan deneyler maksimum gerilme elastik sınırdan belirgin bir şekilde küçük olduğu hallerde de örneğin alternatif gerilme halinde, yorulma kırılmalarının oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bu çelişkili durum ancak akma sınırının altında cismin küçük de olsa, bir miktar plastik deformasyon yapmasıyla açıklanmaktadır.

Deneyler ve araştırmalar elastik deformasyonlar bölgesinde mikrodeformasyon denilen gayet küçük plastik deformasyonun oluştuğunu ortaya koymaktadır. Muhtelif metotlar uygulanarak ölçülebilen bu tür deformasyonlar belirgin bir akma sınırına sahip olan yumuşak çeliklerde bile meydana gelmektedir. Akma sınırında metalin yaptığı deformasyona göre çok küçük bir değere sahip olan bu mikrodeformasyonun statik yüklemelerde mühendislik problemlerinde büyük bir önemi yoktur. Buna karşılık bunların, değişken yüklerin uygulanması halinde cismin davranışları üzerine gayet belirgin etkileri vardır.

Burada söz konusu olan mikropplastiklik, dislokasyonun küçük miktarda hareketinden ve tane sınırındaki kaymadan ileri gelebilir. Bu tür deformasyonların meydana gelmesini şu olayların oluşumuna bağlamak mümkündür:

- Elastik deformasyonlarla birlikte bir ısı alış verişinin olması
- Tanelerin izotrop olmaması
- Saf olmayan maddelerin homojen bir şekilde dağılmaması.

Bir polikristal deformasyon yapınca, tanelerin izotrop olmamasından dolayı, gerilme ve deformasyon taneden taneye değişir. Bundan başka yükleme şeklinin bir sonucu olarak cismin her noktası aynı gerilme altında değildir ve aynı miktar deformasyon yapamaz. Elastik deformasyonun oluşmasıyla da bir sıcaklık değişimi meydana gelir. Deformasyonun üniform olmaması sıcaklığın cismin muhtelif yerlerinde değişik değerler almasına sebep olur. Bütün bu değişik durumların bir sonucu olarak, bu arada bazı tanelerin mekanik özelliklerinin en zayıf bulunduğu doğrultuda gerilmeye maruz kalmasıyla, dislokasyon hareketi başlarken sıcaklığın artması da tane sınırında viskoz bir kayma meydana getirir. Statik yükleme halinde meydana gelen sıcaklık farkları bir ısı akımı oluşturur. Gerilme bu durumda değişmediğinden zamanla bir üniform sıcaklığa kavuşan cisim çok küçük bir mikro deformasyon yapmakla yetinir. Yorulma halinde cisim değişken gerilmelerin etkisi altında bulunduğundan metalin zamanla üniform sıcaklığa kavuşması bahis konusu değildir. Bunun bir sonucu olarak yorulma halinde metallerde, elastik deformasyonlar bölgesinde, daha büyük miktarda plastik deformasyon meydana gelir. Bu tür deformasyonlar da yukarıda açıklandığı şekilde yorulma etkisi altında bulunan cisimlerde çatlakları oluşturur.

Yorulma etkisi altında tutulan bir cismin mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek değişmelerin bilinmesinin yorulma kırılmasına ışık tutması bakımından ilginç olabileceği düşünülmüştür. Bu amaçla muhtelif sayıda yükleme yapılmış, fakat mukavemetini kaybetmemiş numuneler üzerinde statik çekme deneyleri yapılmıştır. Yumuşak çelik üzerinde Bu şekilde yapılan deneylerde elde edilen değerlerden şu sonuçları çıkarmak mümkündür:

a) Yorulma sonunda bir mikro çatlak (büyüteç ile görülebilen veya uzunluğu 0.025mm mertebesinde olan) meydana gelmedikçe cismin çekme mukavemetinde bir azalma oluşmaz.

b) Cisimde makro çatlak meydana gelmemiş olmasına rağmen, yükleme sayısı belirli bir değeri geçmesi halinde, metalin gerilme – deformasyon eğrisi belirgin değişiklikler gösterir. Bu sonuç yorulma olayında gerçekleşen pekleşmenin, statik yüklemeye oluşan pekleşmeden farklı olduğunu gösterir.

c) Özellikle çatlak oluşuncaya kadar geçen devrede cismin sertliği yükleme sayısı ile beraber artar.

Ayrıca burada şunu da belirtelim ki yorulmuş numuneler üzerinde X ışınlarının difraksiyon metodunun uygulanması iyi sonuçlar vermektedir. Yumuşak çelikte, yorulma sınırının üstünde bir gerilme uygulayarak yorulma olayının meydana getirilmesi halinde, tanelerin orijinal yönlerini değiştirmek suretiyle devamlı bir düzensizliğe doğru yöneldiklerini,

yorulma sınırının altında bir gerilme halinde ise böyle bir değişimin oluşmadığını bu deney metodu ortaya koymuştur.

2.3.2. Çatlağın İlerlemesi

Yorulma olayı sonunda meydana gelen kırılma ancak oluşmuş bulunan çatlağın büyümesi ve gelişmesiyle gerçekleşir. Yalnız, hemen belirtelim ki bu durum yorulmada bir veya bir kaç çatlağın oluşması olayın muhakkak bir kırılma ile sonuçlanacağını kafiye göstermez. Bu sonucu destekleyen deneylerden biri maksimum gerilme değeri yorulma sınırından küçük olması halinde yorulma çatlaklarının meydana gelmesidir. Buradan şöyle bir sonuca varılmaktadır. Yorulma kırılmasına yol açan gerilme veya kuvvet çatlağı oluşturan değer değil, çatlağın gelişmesini sağlayan büyüklüktür.

Head, Orowan'ın teorisinde çatlağın gelişmesini şu şekilde açıklamaya çalışmıştır; Çatlak meydana geldikten sonra gerilme yığılmasından dolayı çatlak dibinde, maksimum gerilme akma sınırının altında olsa bile, belirli bir bölgede bir miktar plastik deformasyon oluşur. Böyle bir durumda çatlak dibinde artık elastik teorilerin uygulanması bahis konusu değildir. Orowan'a göre plastik deformasyonun meydana geldiği bölge elastik matriks içine yerleştirilmiş homojen olmayan elemanlardan oluşmaktadır. Gerilme heterojen elemanlarda daha büyük bir değer aldığından akma önce bu elemanlarda gerçekleşecektir. Bu olayın bir sonucu olarak heterojen elemanlarda ki yükün bir kısmı elastik matrikse aktarılmış olacaktır. Bununla beraber değişken gerilme yüklemelerinin devam etmesiyle heterojen elemanların akmaya karşı direnci yükselecek ve bunlara gelen yükler de artacaktır. Böylelikle yükün tekrarlanması sonunda çatlak dibindeki gerilmenin artmasıyla ulaştığı değer bu esnada plastik bölgede pekleşme olayının devam etmesiyle akma sınırının artarak aldığı değer üstünde ise çatlak gelişecek ve metalin iç kısımlarına doğru ilerleyecektir. Aksi halde başka bir deyişle belirli bir süre sonunda çatlak dibindeki gerilme, buradaki plastik deformasyonların artırdığı akma sınırından küçük ise çatlak duracak ve gelişmeyecektir. Çatlağın gelişmesi konusunda Head, şu ifadenin deney sonuçlarına iyi bir uygunluk gösterdiğini ileri sürmektedir.

$$\frac{dl}{dN} = \frac{l^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{a}} \cdot f(\sigma) \quad (1.1)$$

Bu bağıntıda (1), ($\sigma_{\max}$) gerilmesi altında N yükleme yapıldıktan sonra meydana gelen çatlak uzunluğunu gösteriyor; a ise çatlak dibindeki plastik deformasyonun olduğu bölgenin boyutudur, $f(\sigma)$ ise gerilmeye bağlı bir fonksiyondur. Yukarıdaki ifadenin şu şekilde de yazılabileceği kolaylıkla görülür .

$$\frac{1}{l} \times \frac{dl}{dN} = \left(\frac{1}{a} \right)^{1/2} \cdot f(\sigma) \quad (1.2)$$

Forst ve Dugdale'nin gözlemlerine göre (1/a) oranı sabit kalmaktadır. Bu durumda gerilmenin belirli bir değeri için dl/dN veya çatlak gelişme hızı doğrudan doğruya çatlak uzunluğu ile orantılı olmaktadır.

Burada şunu belirtelim ki 1.1 veya 1.2 ifadeleri iki halde geçerliğini kaybetmektedir. Birinci hal çatlak gelişmesinin herhangi bir engel tarafından örneğin tane sınırı tarafından durdurulması ikinci hal ise çatlak gelişmesi hızının birdenbire artması. Bu sonuncu durum büyüyen bir çatlak var olan bir çatlakla birleşmesi, çatlak cisim içinde gevrek karakterinde bir bölgeye ulaşmasıyla veya bir kusurla karşılaşması sonunda meydana gelebilir.

Sünek malzeme için yukarıda açıklanan yorulma kırılma mekanizmasının gevrek cisimler için de kesin bir şekilde geçerli olabileceği ileri sürülemez. Kırılgan malzemenin yorulma olayında davranışı özelliklerine bağlı olarak büyük değişimler göstermektedir. Bu konuda genellikle birçok kırılgan cisimlerde çatlak gelişmesi sünek cisimlerinkine göre, çok daha hızlı bir seyir izlediğini belirtebiliriz. Buna karşılık çok kırılgan cisimlerde yorulma olayının meydana gelmediği de görülmektedir. Başka bir deyişle bu cisimler, uygulanan gerilme artırılırken veya tek bir yüklemde kırılmaktadır. Böyle bir sonucu Gough ve Cox antimuan ve bizmutun tek kristalleri üzerinde yaptığı deneylerde elde etmişlerdir.

Sünek cisimlerde yorulma mekanizmasını şu şekilde özetleyebiliriz, Çatlakların oluşmasına plastik deformasyonlar sebep olmaktadır. Cisimde çatlak meydana geliş yorulma sonunda muhakkak bir kırılmanın meydana geleceğini göstermez. Asıl çatlak devamlı bir şekilde büyümesi ve gelişmesi cismin mukavemetini kaybetmesine yol açar. Bununla beraber yapılarda yorulma sonunda veya başka bir nedenle meydana gelen çatlaklar üzerinde durulmalı, bunlar devamlı kontrol altında tutularak tehlikeli veya tehlikesiz cinsten olup olmadığı anlaşılacak bu konuda gerekli tedbirler alınmalıdır.

2.3.3. Kırılma

Kırılma, malzemenin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı bir çatlak başlaması veya ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir (Uğuz 1996).

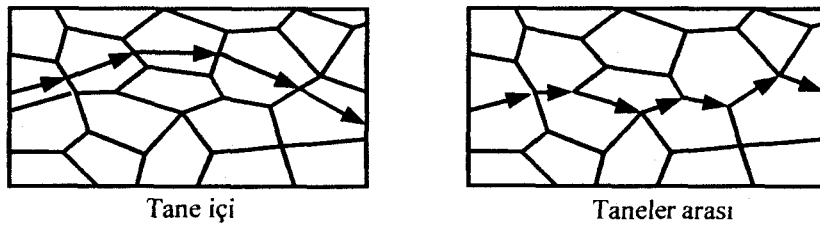
Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Akmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar kristal kafes düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyonların hareketini engelleyen hatalardır. Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır. Çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağlantılı

olarak lokal gerilme — şekil değiştirme alanları söz konusudur. Buradaki makroskobik hatalar olarak malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları verilebilir.

Malzeme cinsine, sıcaklığına, gerilme durumuna ve yükleme hızına bağlı olarak metotlar çok çeşitli kırılma türleri gösterebilir. Kırılma genel anlamda gevrek ve sünek olmak üzere iki şekilde oluşur. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve esnasında önemli ölçüde plastik deformasyonla tanımlanır. Kırılma yüzeylerinde bu plastik deformasyon gözlenir. Plastik deformasyon esnasında mikroböşlukların oluşması ve bunların birleşmesi sonucu çatlak ilerler. Sünek kırılma yüzeyi mat ve lifli görünür. Gevrek kırılma ise hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro deformasyonla tanımlanır. Gevrek kırılma eğilimi, azalan sıcaklık, artan deformasyon hızı ve çentığın meydana getirdiği üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılmada plastik deformasyon, hemen hemen hiç yer almaz ve çatlak düşük yüzey enerjisine sahip belirli kristolografik düzlemler boyunca hızla ilerler ve ani kırılmaya neden olur. Kırılma yüzeyi ayrılma düzlemlerinin taneden taneye yön değiştirmesi nedeniyle taneli bir görünüme sahiptir. Gevrek kırılma çoğunlukla HMK ve sıkı paket hekzagonal kristal kafes yapısına sahip metallerde gözlenir. Tane sınırlarının gevrekleşmesine etki eden faktörlerin olmadığı durumlarda yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısına sahip metallerde gevrek kırılma gözlenmez (Uğuz 1996).

2.3.3.1. Gevrek Kırılma

Gevrek kırılma çatlağın hızla ilerlemesinden meydana gelir. Kırılmadan önce malzemede plastik deformasyon oluşmaz. Metalik bağlı malzemelerden, kovalent bağlı malzemelere gidildikçe gevrek kırılma eğilimi artar. Gevrek kırılma genellikle ayrılma (cleavage) veya yorulma düzlemleri diye adlandırılan belirli kristolografik düzlemler boyunca meydana gelir. (Ayrılma kırılma düzlemi en düşük yüzey enerjisi seviyesine sahip düzlemdir.) Ayrılma kırılması sonucu, kırılma yüzeyi granüler (taneli) görünümlü ve kırılma yüzeyi parlaktır.



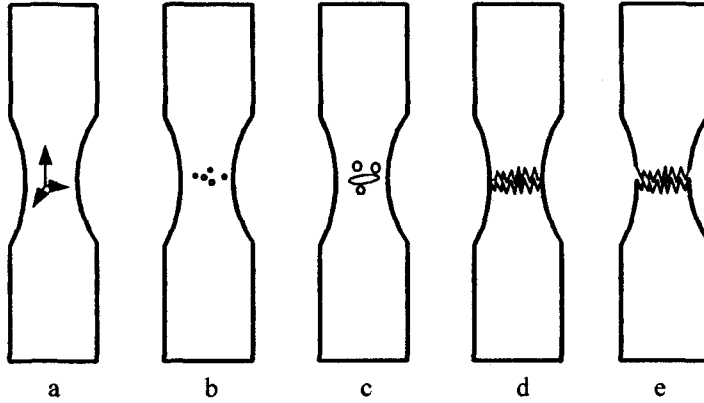
Şekil 2.2 Tane içi ve taneler arası kırılma.

Çatlak bir taneden diğerine taneler içerisinde geçerek ilerliyorsa, bu tür gevrek kırılmaya "transgranüler" (tane içi) kırılma denir. Bazı durumlarda tane sınırları, tane sınırı

içerisindeki ayrılma düzlemlerinden daha zayıftır. Bu durumda çatlak, tane sınırları boyunca ilerler ve bu tür gevrek kırılmaya "intergranüler" (taneler arası) kırılma adı verilir (Geçkinli 1986). Şekil 2.2 'de tane içi ve taneler arası kırılma gösterilmiştir.

2.3.3.2. Sünek Kırılma

Sünek kırılma, plastik deformasyon oluşturan kırılma diye tanımlanabilir. Sünek kırılmada çatlakın ilerlemesi yavaştır. Çatlakın ucunda plastik deformasyon oluşur ve bunun sonucu olarak çatlak ucu kütleşir. Çatlakın ilerlemesi için önce plastik deformasyondan doğan atom boşluklarının teşekkülü ve bunların bir araya gelmesi gerekir. Plastik deformasyon olduğu için numunelerin kırılması için harcanan enerji gevrek kırılmaya oranla çok fazladır. Çok sünek malzemeler ayrılma öncesi bir hat boyunca uzar. Bozulmanın bu türüne genellikle kırılma (rupture) denir. Üniform olarak uzarken iç yapıdaki partiküllerde çatlama oluşur veya partikül ile matriks ara yüzeyi ayrılır ve mikroboşluklar meydana gelir. Boyun verme, mukavemette artışın olduğu yerde ve plastik kararsızlığın olduğu noktada başlar. Çünkü uzama sertliği, kesit azalmasını karşılamak için yetersiz kalır (Şekil 2.3.a). Bu da maksimum yükte olur. Bu bölgede boyun oluşumu, üç eksenli gerilme halinde ortaya çıkar. Çekmenin hidrostatik etkisi boyun bölgesinin merkezinde numune eksenine boyunca etkiler. Bu bölgede çok sayıda boşluk oluşur (Şekil 2.3.b) ve sürekli uzama altında merkezi çatlak büyür ve birleşir (Şekil 2.3.c). Merkezi çatlak boyunca bu boşluklar ilerler. Bu çatlak numune yüzeyine ulaşana kadar numune eksenine düşey bir doğrultuda ilerler. Oluşan çatlak kritik boyya ulaşınca kalan bölge halka şeklinde çekme eksenine ile 45° 'lik açı yapan düzlemlerde hızla ilerler (Şekil 2.3.d). Kırılan parçalardan birinin yüzeyi konik diğerinin ise çanak şeklindedir.



Şekil 2.3 Konik — çanak kırılmasının oluşumu.

2.3.4. Kaynaklı Parçaların Yorulması

Kaynak teknolojisi endüstriyel gelişiminde önemli bir etkiye sahiptir. Kaynaklı imalat mekanik ve bilgisayar kontrollü olabilip, üretim ve imalat fiyatlarını azaltır. Kaynaklı

birleştirme bir çok endüstri dalında, gemi inşasında, otomobil üretiminde karşımıza çıkar. Kaynak teknolojisi oldukça komplekstir.

Sanayileşmiş ülkelerde haddelenmiş çeliklerin %40 - %50'si kaynak edilebilir özelliklerde üretilir ve çoğunlukla kaynak konstrüksiyonlarında kullanılır. Bu konstrüksiyonlarda kaynak bağlantıları sadece statik zorlamalar değil, aynı zamanda yorulma zorlamaları altındaki özellikleri önem kazanmıştır (Güleç ve Aran 1983).

Yorulma çatlaklarının oluşumu, tek yönlü çekme gerilme bölgesinde, bulunan bir düzlemsel hatanın kenarlarında gerilme artışı büyüklüğüne, ilk çekme gerilmesi doğrusuna dik olan düzleme, tasarlanan numunenin boyut ve şekline bağlıdır. Verilmiş bir düzlemsel hata için maksimum gerilme yoğunluğu, düzlemsel hatanın başlangıç çekme doğrultusuna dik olduğu zaman oluşur ve düzlemsel hata başlangıç çekme doğrultusuna paralel olduğu zaman yaklaşık olarak sıfırdır. Böylece düzlemi, levha düzlemine paralel olan düz tabakalar gibi aynı düzlemde çekme — gerilme dalgalanmalarına maruz kalan: düzlemsel hatalar levhanın yorulma ömründe bir azalmaya neden olur. Bununla birlikte bu düz tabakalar, levhanın kalınlık doğrultusunda çekme — gerilme dalgalanmalarına maruz kaldığı zaman yorulma ömrü için oldukça zararlı etkileri olabilir (Uğuz 1996).

Kaynakta yorulma çatlakları, ya iç kusurlarda (gözenek, birleşme eksikliği ve cüruf gibi) ya da kaynak ucunda ve genellikle cüruf gibi kalıntılarda oluşur. Kaynaklı parçalarda yorulma çatlakları genellikle kaynak uçlarında başlar ve ilerler (Gurney 1968).

Sonuç olarak yorulma çatlağı ve ilerlemesi ergitme eksikliği ya da soğuk çatlak hataların bir gaz paketi veya gözenekliliğinden daha hızlıdır. Hatanın boyutu ve frekansı kaynak işlemine ve geometrisine bağlıdır.

Kaynak bağlantılarda yorulma dayanımının düşük olmasının sebebi dış ve iç etkilerdir. Burada iç etki olarak nufuziyet hataları, cüruflar, gözenekler ve kaynak malzemesindeki diğer hatalar olabilir. Dış etkiler ise çoğunlukla dikiş yüzeyi ile ilgilidir. Ayrıca kaynaklı parçaların yorulma mukavemeti kaynak profilinin şekline bağlıdır.

2.2. Yorulma Deneyi İle İlgili Terimler

Çevrim: Gerilme — zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denir.

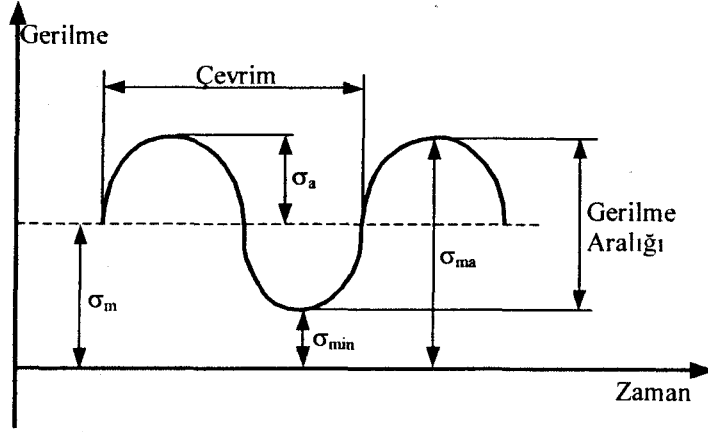
Maksimum gerilme, $\sigma_{\max}$: Gerilme periyodundaki en büyük gerilme,

Minimum gerilme, $\sigma_{\min}$: Gerilme periyodundaki minimum gerilme,

Ortalama gerilme, σ_m : En büyük ve en küçük gerilmenin cebirsel toplamının yansına eşittir,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.3)$$

Gerilme genliği, σ_a : En büyük ve en küçük gerilmenin cebirsel farkının yansına eşitti



Şekil 2.4 Yorulma deneyi ile ilgili gerilme - zaman çevrimi.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.4)$$

Çevrim sayısı, n : Deney sırasında herhangi bir durumda uygulanan periyot sayısı,

Dayanma veya yorulma periyot sayısı, N : Malzemenin kopma esnasındaki periyot sayısı. Genellikle ondalıklı kesir ya da 10^6 'nın katları olarak gösterilir,

N periyodundaki yorulma dayanımı, σ_N : Gerilme koşulları altında, deney numunesinin N periyodu süresince dayanabileceği gerilme değeri,

Yorulma sınırı, σ_D : İstatistik metotlarıyla belirlenen gerilme koşulları altında bir malzemenin sonsuz sayıdaki gerilme periyotlarına dayanabileceği en büyük gerilme,

Yorulma sınırındaki gerilme genliği, σ_A : Belirtilen ortalama gerilme değeri σ_m ise;

$$\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_a \quad (1.5)$$

Periyot oranı, n/N : Uygulanan gerilme periyotlarının, kopma gerilmesi periyotlarına oranı.

Yorulma dayanımı azaltma faktörü, K_f : Düz, parlatılmış deney numuneleri yorulma sınırının, gerilme konsantrasyonlu deney parçaları yorulma sınırına oranıdır.

Gerilme oranı, R : Bir periyottaki en küçük gerilmenin, en büyük gerilmeye oranıdır.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.6)$$

Genlik oranı, A : Gerilme genliğinin, ortalama gerilmeye oranıdır.

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (1.7)$$

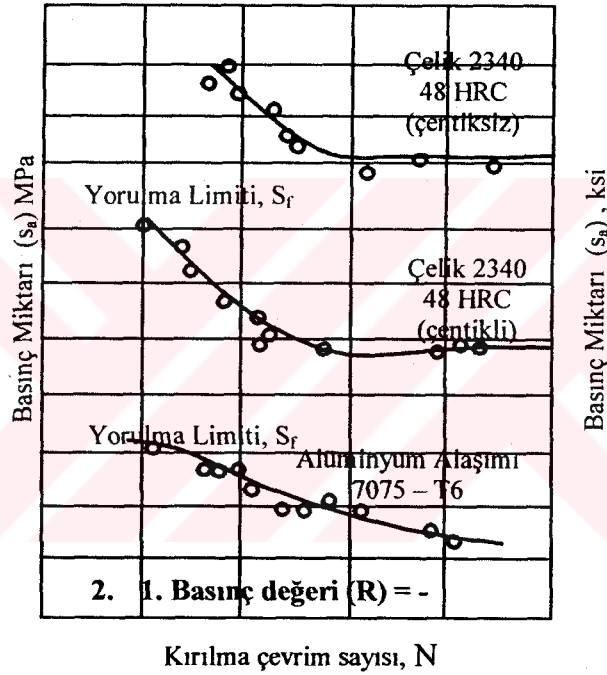
2.3. S-N Diyagramları

Bir cismin yorulma ile ilgili karakteristiklerini bulmak için malzeme pülzator denilen yorulma aletinin çenelerine tespit edilir. Önce $\sigma_{\min}$ bir (b) değerini alacak şekilde test cihazında gerekli ayarlama yapılarak numuneye $P_{\min} = F_0 \cdot b$ eksenel kuvveti uygulanır. $\sigma_{\max}$ için a_1 gibi oldukça büyük bir değer seçilir. Bu işlemler yapıldıktan sonra alet çalıştırılarak gerilemenin $\sigma_{\min} = b$ ve $\sigma_{\max} = a_1$ gibi iki değer arasında kalacak şekilde belirli bir frekansla değişen kuvvet uygulanmasına başlanır. Deneye tabi tutulan malzeme belirli bir süre bu gerilme değişikliğine maruz kaldıktan sonra kırılır. Aletin sayacından kırılmanın hangi yükleme sayısında oluştuğu anlaşılır. Kırılmaya sebep olan bu sayı N_1 ise, N_1 ile a_1 birbirine ait bir çift değerdir. Deneye $\sigma_{\min}$ 'a daima (b) değerine eşit tutarak $\sigma_{\max}$ 'a a_1 den daha küçük değerler vererek devam ederiz. Böylelikle $\sigma_{\max}$ 'un a_2, a_3 değerleri için sırasıyla $N_2, N_3, \dots$ gibi kırılmaya sebep olan yükleme sayılarını buluruz. Bu şekilde elde edilen ve birbirine ait a_i, N_i değerlerini y eksenini gerilmeyi ve x eksenini $\log N$ 'yi gösteren birer nokta ile gösteririz. Bu noktaları sırasıyla birbirine birleştirmek suretiyle veya bunlara en yakın bir şekilde bir eğri geçirmek suretiyle Wöhler eğrisi adı ile bilinen bir diyagram elde edilir. Bu diyagrama İngiliz teknik literatüründe (S - N) eğrisi denilmektedir (Şekil 2.5) (Boyer 1986).

Bu eğri genel olarak iki kısımdan ibarettir. Birinci kısımda N arttıkça $\sigma_{\max}$ değerlerinde çok fazla miktarda azalmalar olmaktadır. Başka bir deyişle bu kısımda eğrinin büyük bir eğimi vardır. İkinci kısım ise eğimi çok küçük olan ve N arttıkça eğimi azalan ve en sonda yatay bir doğruya asimptot olan bir eğri karakteristiğine sahiptir. Eğrinin birinci ve ikinci kısımları bir B noktasında kesişerek oldukça keskin bir köşe oluşturmaktadır. Çeliklerde (B) noktasının apsisi $10^6 - 10^7$ arasında değişmektedir. Buna karşılık mukavemeti daha düşük olan alaşımlarda aynı noktanın apsisi çok daha geniş bir aralık içinde örneğin alüminyum ve bakır alaşımlarında 450 ile 8.3 milyar aralığında, değişir.

S - N eğrisinin asimptot olduğu yatay doğrunun ordinatı Y_1 ise $\sigma_{\max} = Y_1$ olması halinde ne kadar fazla sayıda yükleme yapılırsa yapılsın malzemede kırılma olmayacaktır. Şu halde Y seçilen $\sigma_{\min}$ 'un (b) değeri için malzemenin yorulma sınırıdır.

$\sigma_{min}=b$ iken σ_{max} Y_1 'e eşit veya bundan daha küçük kaldıkça yorulma sonunda bir kırılma gerçekleşmeyecektir. Bununla beraber, açıklanan nedenlerden dolayı bu Y değeri yani yorulma sınırı bir (k) emniyet katsayısına bölünerek $(k>1)$ bir emniyet gerilmesi σ_{emy} bulunmalı ve yapıda değişken kuvvetlerin etkisiyle meydana gelen gerilmeler bu σ_{emy} değerinden daha büyük olmamalıdır. Bir $S - N$ eğrisinin çizilmesi için $(8 - 10)$ noktaya ihtiyaç vardır. Yukarıdaki şekilde σ_{min} 'un bir b_1 değeri için Y_1 yorulma sınırı nasıl bulunduğu açıklanmıştır. σ_{min} 'a b_1 den farklı b_2, b_3 değerleri verilmek suretiyle Y_2 ve $Y_3...$ gibi yorulma sınır değerleri bulunmak suretiyle bir malzemenin yorulma ile ilgili karakteristikleri bulunmuş olur.



Şekil 2.5. Sabit genleşme ve sinusoidal yükleme için $S - N$ eğrileri (ASM Handbook, 1992).

$S - N$ eğrisinin yukarıda belirtilen duruma ve özellikle yatay bir doğruya asimptot olması veya başka bir deyişle bir yorulma sınırına sahip olması genellikle demir, çelik alaşımları, alüminyum ve magnezyum alaşımları için gerçekleşmektedir. Bir çok metallerin ve genellikle metal dışındaki cisimlerin özellikle betonların, doğal taşların seramik malzemenin $S - N$ eğrilerinin bir yatay asimptotları yoktur. Bu nedenle bu tür cisimler için yorulma sınırı diye bir karakteristik bahis konusu değildir.

Bir taraftan mühendislik işlerinde karşılaşılan bir çok cisimlerin yorulma sınırına sahip olmaması, diğer taraftan bu karakteristiğın, buna sahip olan cisimlerde zorlukla saptanmasından

dolayı yorulma sınırı yerine yorulma mukavemeti denilen bir karakteristiğin esas alınması daha uygun görülmüştür. Yorulma mukavemeti belirli bir sayıda yükleme sonunda cisimde yorulma kırılmasını meydana getirmeyen en büyük gerilme olarak tanımlanmaktadır. Belirli yükleme sayısı incelemeler sonunda muhtelif kuruluşlar tarafından saptanmaktadır. Çelik yapılarda yorulma mukavemeti 10 milyon yüklemede kırılmaya sebep olmayan gerilme olarak alınmaktadır. Uluslararası Kaynak Enstitüsü kaynaklı bileşimler için bu belirli yükleme sayısı olarak 2×10^6 değerini vermektedir. Alüminyum alaşımlarında yorulma mukavemeti 10^8 sayıda yükleme sonunda kırılmaya sebep olmayan en büyük gerilme olarak bulunur. Bu açıklamadan yorulma sınırı ile yorulma mukavemetinin birbirinden tamamen farklı konular olduğu anlatılmaktadır.

Bir çok hallerde ve bir çok bakımdan S – N eğrisinin denkleminin bilinmesinde fayda vardır. Bu konuda yapılan çalışmalar sonunda bir hiperbol karakteristiğine sahip olan S–N eğrisi için muhtelif fonksiyonlar ileri sürülmüştür. Bunların biri Weibull tarafından verilen şu fonksiyondur.

$$(\sigma_{\max} - Y)^m \cdot N = k \quad (1.8)$$

Bu denklem tabiatıyla $\sigma_{\min}$ 'un belirli bir değeri için geçerlidir Y, $\sigma_{\min}$ 'un belirli bu değeri için yorulma sınırıdır. N, $\sigma_{\max}$ 'un belli bir değeri için kırılmaya sebep olan yükleme sayısıdır. 1.8 denkleminde yer alan (m) ve (k) birer sabittir. Stulen ise yalnız alternatif gerilme hali için geçerli olmak üzere şu denklemi vermiştir.

$$\sigma_{\max}^n \cdot N \left(1 - 0.5 \frac{N}{N_e} \right) = k_1 \quad (1.9)$$

Bu denklemde (n) ve k_1 malzeme ile ilgili katsayılarıdır. N_e ise yorulma mukavemetinin saptanmasında kabul edilen yükleme sayısıdır.

Bir S – N eğrisinin çizilmesi için en aşağı 8 – 10 noktaya veya 8 – 10 yorulma deneyinin yapılmasına ihtiyaç vardır. Bu, her bir deney saatlerce ve günlerce sürdüğüne göre, bir S – N eğrisinin bir kaç ay devam eden deneyler sonunda elde edilebilmesi demektir. Böyle bir durum ve ayrıca yorulma deneylerinde biraz sonra açıklanacağı gibi önemli bir dağılmanın olması araştırmacıları yorulma karakteristiğinin hızlı metotlar uygulayarak ve kabil olduğu kadar az numune kullanarak saptanmasına sevk etmiştir. Böyle bir sonuç başka bir deyişle yorulma sınırının çok az süren deneyler sonunda elde edilmesi en basit bir şekilde 1.8 veya 1.9 denklemlerini kullanarak gerçekleştirilir. $\sigma_{\max}$ 'a oldukça yüksek üç veya iki değer vermek suretiyle yapılan yorulma deneylerinde elde edilen sonuçlar bu denklemlere götürülerek yorulma sınırı

veya mukavemeti bulunabilir. Yalnız hemen belirtilmelidir ki bu şekilde elde edilen karakteristikler malzemenin sahip olduğu gerçek yorulma sınırı ve mukavemetinden bir miktar fark etmektedir.

Fransa'da Prot tarafından geliştirilen metot da yorulma deneyinde $\sigma_{\max}$ sabit tutulacağı yerde özel bir tertibat ile belirli bir α_1 hızı ile küçük bir değerden itibaren artırılmaktadır. Bu şekilde yürütülen deney sonunda gerilmenin σ_k gibi bir değere ulaşması ile cisim kırılmaktadır. Eğer S – N eğrisinin lineer eksen takımına göre bir hiperbol olduğu ve ayrıca lineer toplam hasar kanununun geçerli olduğu kabul edilirse kolaylıkla gösterilir ki yukarıdaki şekilde elde edilen ve birbirine ait bulunan σ_k ve α değişkenleri arasında şu bağıntı vardır.

$$\sigma_k = A + B\sqrt{\alpha} \quad (1.10)$$

Burada B katsayısı malzemenin emsine bağlı bulunmakta ve her malzeme için belirli değer almaktadır. A'ya gelince bu doğrudan doğruya malzemenin yorulma sınırıdır. Şu halde B'nin bilinmesi halinde yukarıda açıklanacak şekilde yapılan bir yorulma deneyinde, bulunan σ_k değeri ve deneyde seçilen α . değeri 1.10 ifadesinde yerine konularak yorulma sınırı derhal bulunacaktır. B'nin bilinmemesi halinde iki değişik α değeri deney yapılarak sonuç elde edilecektir. Prot bu metodu alternatif gerilme hali için uygulamış ve elde ettiği sonuçların yukarıdaki ifadeyi tatmin edici bir şekilde sağladığını görmüştür. Mc Keown, Prot'nun metodunu kırılmanın 500.000 yüklemde olmasını sağlayacak şekilde α 'yı seçmek suretiyle uygulamıştır. Bulduğu σ_k değeri ile, normal deneyleri uygulayarak elde edilen malzemenin yorulma mukavemeti arasında bir korelasyonun olabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlara göre koordinatları σ_k ve $\sqrt{\alpha}$ olan noktalar belirli bir doğru veya bir eğri üzerinde yer almaktadırlar. Özellikle kurşun ve bakır alaşımlarında bu konuda çok iyi bir korelasyonun bulunduğunu araştırma ortaya koymuştur. Çelik alaşımlarında ise bir miktar dağılma göze çarpmaktadır. Bu sonuçlardan, Prot deney metodundan bazı değişikliklerin yapılmasıyla, çok olumlu sonuçlar elde edilebileceği anlaşılmaktadır (Postacıoğlu 1981).

2.4. Yorulma Deney Makinaları

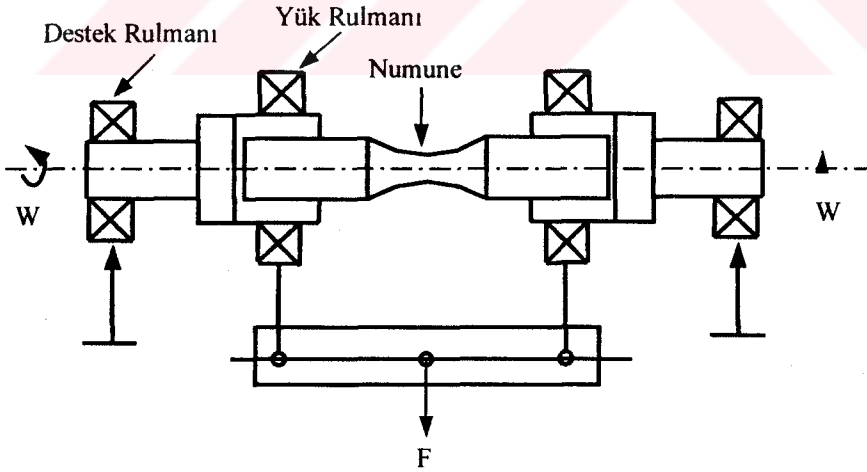
Yorulma yüklerine maruz kalan makina parçalarının ya da yapılarının imalatı, kullanılan malzemenin davranışını belirlemek için laboratuarlarda yapılan deneyler sonunda elde edilen sonuçlara dayanır. Bu cihazlar numuneye uygulanan gerilme türüne göre şöyle sınıflandırılır (Swanson 1974).

1-Dönen — eğmeli makinalar

a- Sabit eğme moment tipli

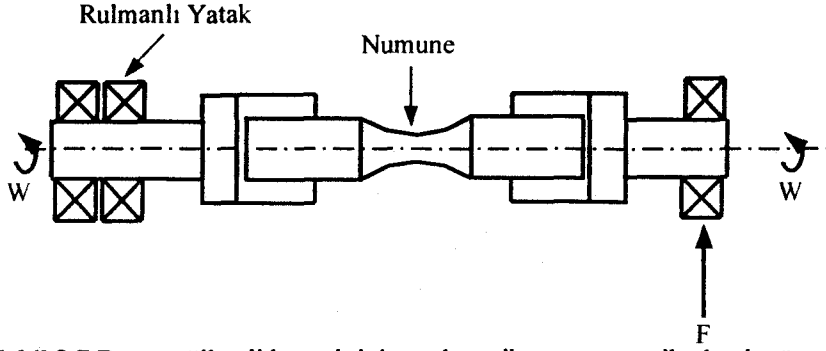
- b- Değişken (konsol kiriş) eğilme tipli
- 2- İleri — geri eğilmeli makineler
- 3- Eksenel gerilmeli makineler
 - a- Çekme — basma kuvvet tipli
 - b- Rezonans tipli
- 4- Titreşimle oluşturulan tekrarlı yüklü makineler
 - a- Mekanik
 - b- Elektro manyetik
- 5- Tekrarlı burulmalı makineler
- 6- Birleşik gerilmeli makineler
- 7- Bilgisayar kontrollü makineler
- 8- Özel uygulamalar için parça test makineleri.

Sabit eğilme momentli, dönen eğmeli makineler Şekil 2.6.'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu tip cihazda yüke maruz çeneler arasında dönen kiriş bölgesi bütün uzunluk boyunca sabit eğilme momentine maruzdur. Bu sabit momentin etkisi altında olan numune, boyuna bir eksenle miller vasıtasıyla dönmeye maruz kalırlar. Numunenin yüzeyindeki her noktada tamamen değişken gerilme — zaman ilişkisi vardır. En çok kullanılan ve imalatı kolay olan dönen — eğmeli yorulma cihazları 600-1200 d/d arasında frekansa sahiptirler.



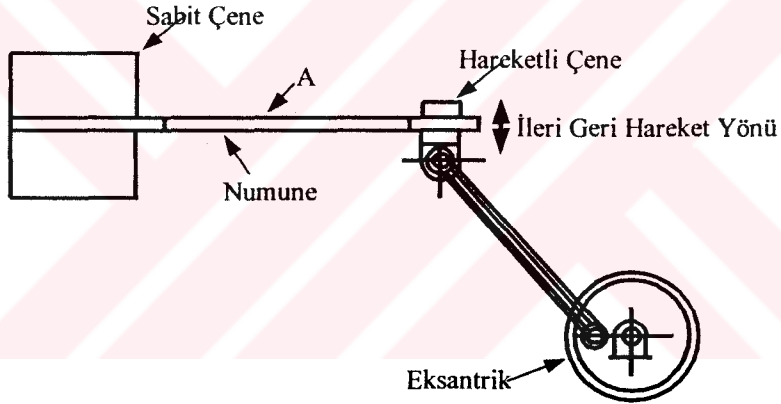
Şekil 2.6 Dönen eğilmeli yorulma cihazının şematik gösterimi.

Dönen — eğilmeli yorulma test cihazlarının konsol kiriş (cantilever) tipi Şekil 2.7.'de gösterilmiştir. Kiriş boyunca eğilme momenti değişkendir. Kritik kesitin eksenel konumu ve uygulanan gerilme seviyesi önemlidir.



Şekil 2.7 Dönen eğilmeli konsol tipi yorulma cihazının şematik olarak gösterimi

Yapılan deneylerde sık sık levha numuneler kullanıldığı için düz levhalı makinalar denen ileri — geri eğilmeli makinalar yapılmış ve Şekil 2.8.'de gösterilmiştir. Makinaların ayan ya tamamen değişen gerilmelerle ya da eksantrik krankın ortalama deplasman miktarı değiştirilerek yapılır. Bu makinalar sabit bir saptırıcıdır. Uygun bir feedback kontrol sistemi ile cihaz sabit bir kuvvet makinası gibi kullanılabilir.

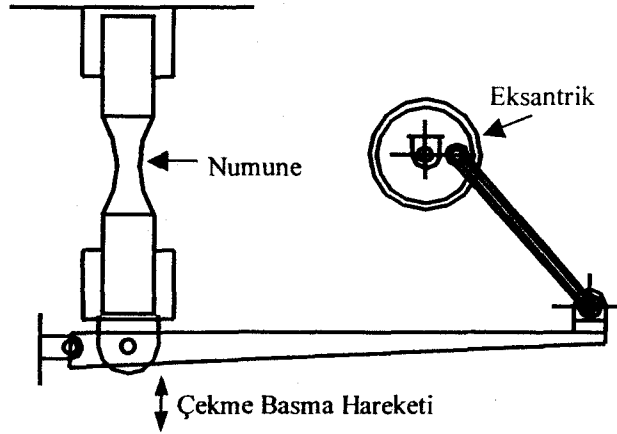


Şekil 2.8 Eğilmeli yorulma cihazının şematik olarak gösterimi

Direk gerilmeli makinalar da, numune eksenine doğrultusunda itme ve çekmeyle bir numuneye doğrudan çekme ve basma gerilmesi uygulanır. Şekil 2.9'da gerilme — zaman ilişkisi verilen sistemin bir ucu ankastreye bağlı tutulurken, gerilme miktarı numunenin diğer ucuna bağlı bir ayar sistemi ile hareket ettirilebilen eksantrik krankla yapılır. Bu makina temelde sabit sapma tiplidir, fakat sabit bir kuvvet makinası gibi kullanmak için mevcut sisteme konsol eklemek gerekir. Sıfırdan farklı ortalama gerilme deneyleri bu makinayla kolayca yapılır. Çünkü ortalama gerilme, bağlı ucun pozisyonunun hareketiyle kolayca değiştirilebilir.

Rezonans tipli direk — gerilmeli yorulma test cihazları, çenelere yerleştirilen yorulma numuneleri ile yaylı kavramadan oluşan iki titreşim sistemidir. Davranış frekansında kütlenin

hareketi rezonansa sebep olur ve titreşim genliğini kontrolü ile numune arzu edilen gerilme seviyesine maruz bırakılır.



Şekil 2.9 Çekme-basma tipli yorulma cihazının şematik olarak gösterimi

Titreşimli yorulma makinaları sık sık yorulma testleri için kullanılır. Özellikle eğilme durumunda numunede meydana gelen değişiklikler titreşim bağıntıları yardımı ile çözülmeye çalışılmaktadır. Tekrarlı burulma makinalarında dairesel kesitli numuneler kullanılır. Tekrarlı burulma verileri tek eksenli olmadığı için açıklamak ve kullanmak daha zordur. Bu cihazlar yaygın olarak kullanılmaz.

2.5. Yorulma Test Numuneleri

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllara kadar değişik araştırmacılar kullandıkları cihaza uygun farklı numune tipleri geliştirmişlerdir. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir. ASTM E – 466’da eksenel gerilmeli yorulma deneyi için Şekil3.1’de gösterilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir. Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallar şart koşulmalıdır;

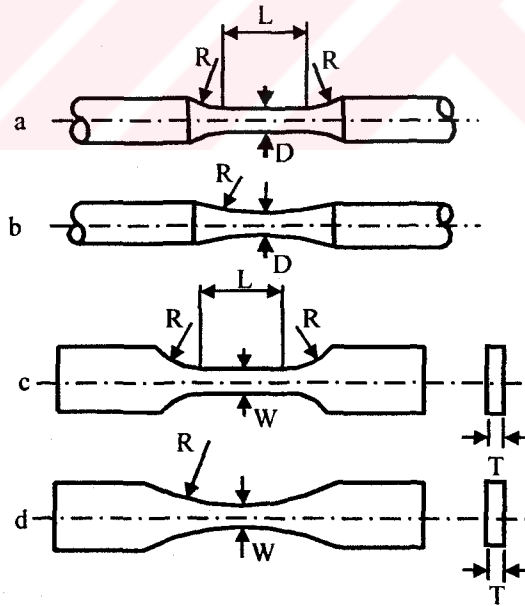
- 1- Numune öyle dizayn edilmelidir ki çatlama numunenin daraltılmış kesitinde olsun.
- 2- Numunenin daraltılmış kesiti öylesine seçilmelidir ki maksimum gerilmenin mutlak değeri deney cihazının çalışma kapasitesinin en az %25’inde, minimum gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2.5’inde oluşsun.
- 3- Numune boyutları öylesine seçilmelidir ki numunenin doğal frekansı, cihazın frekansının en az 2 misli olsun.

Numunenin alındığı parçanın dikdörtgen veya dairesel kesitli olmasına göre ASTM standartlarındaki numune şekilleri değişmektedir.

A. Dairesel kesitli numuneler: Şekil 15'de (a) ve (b) şekilleri ile gösterilen numuneler için daraltılmış kısmın çapı için 5 ila 25 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 numunenin her iki ucundaki kavisli bölgede R eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın D çapının en az 8 katı olmalıdır.

(b) numunesinde D çapına sürekli bir radius ile geçilmektedir. (a) numunesinde ise belirli bir daraltılmış uzunluk söz konusudur. Daraltılmış kısmın L uzunluğu D çapının en az üç katı olmalıdır. Ancak basma gerilmelerinin uygulanacağı durumlarda burkulmaları önlemek amacıyla L uzunluğu, D çapını dört katından fazla olmalıdır.

B. Dikdörtgen kesitli numuneler: Bu numuneler kesiti daraltılması tek boyutta ve genellikle genişlikte yapılır. 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 sekiz katı olmalıdır. Daraltılmış kısımda W genişliğinin T kalınlığına oranı 2 ila 6 arasında olmalı ve daraltılmış kısmın kesiti tercihen 20 ila 650 mm² arasında seçilmelidir. Daraltılmış kısmın L uzunluğu daraltılmış kısımdaki W genişliğinin en az üç katı olmalı, basma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda ise dört katını geçmemelidir. Diğer özellikler dairesele kesitli numunelerle benzer durumdadır.



Şekil 2.10 ASTM E – 466'ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri

DIN 50113'te dönen eğme gerilmelerinin uygulandığı yorulma deneyi için numune şekilleri ve boyutları verilmektedir. Bu deney türü için genellikle dairesele kesitli numuneler

tavsiye edilmektedir. Çubuğun kendisi numune olarak kullanılabileceği gibi, özel olarak belirli bölgesi daraltılmış numuneler de kullanılmaktadır. Çentik hassasiyetini ölçmek için numuneye aşağıdaki türlerde çentikler açılmaktadır:

- a) Numuneyi halka şeklinde çeviren V ve U tipi çentikler,
- b) Numuneyi enlemesine kateden delikler,
- c) Ani kesit değişimlerini sağlayan çıkıntılar.

Yorulma deney numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gereklidir. Talaş kaldırma işlemi keskin bir kalem ucu ile yapılmalı ve iç gerilmelerin oluşmamasını engellemek için aşırı deformasyonlardan (büyük pasolardan) ve aşırı ısınmalardan kaçınılmalıdır. Talaş kaldırma esnasında özellikle enlemesine çizik ve çentiklerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Talaş kaldırma işleminden sonra numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara işlemi uygulanmalıdır. Ancak bu işlemler sayesinde temiz ve parlak yüzeyler elde edilebilir.

Numune uzun zaman saklanacak ise, parlatılmış yüzey korozif olmayan bir yağla kaplanarak korunmalıdır.

Numune hazırlama işleminden sonra yüzey kalitesinin 20 büyütmeli bir mercek altında kontrolü genellikle tercih edilmektedir (Kayalı ve diğerleri 1983).

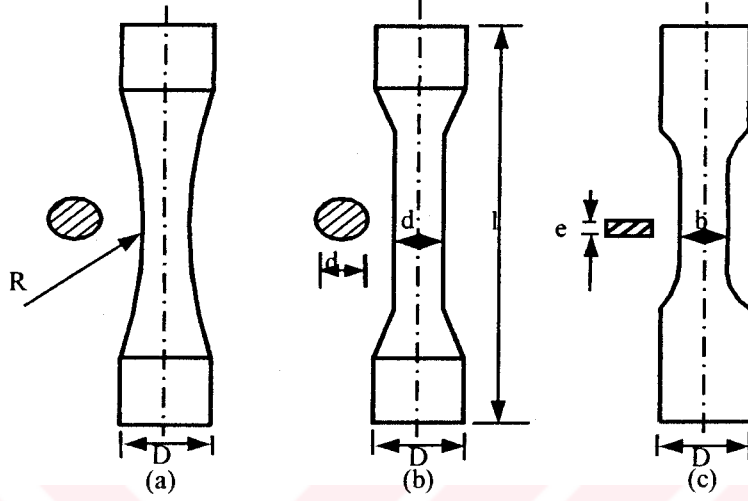
2.6. Yorulmaya Etki Eden Faktörler

Yorulma mukavemeti bir çok değişik faktörlerin etkisi altında bulunmaktadır. Bu faktörlerin etkiye şeklinin bilinmesiyle ve bu etkiye şeklini göz önünde tutarak hareket edilmesiyle yorulma deneylerinde daha yeknesak veya dağılması daha az olan sonuçların elde edilmesi kabil olacaktır. Ayrıca böylelikle deney sonuçlarının daha iyi bir şekilde yorumlanarak; yorulma etkisine maruz kalan bir malzeme daha elverişli koşullar altında kullanılmış olacaktır.

2.6.1. Parça Biçiminin Etkisi

Yorulma deneyine tabi tutulan numunelerde gerilme yığılmasının yorulma mukavemetine Önemli bir etkisi olduğu yukarıda açıklanmıştır. Numune şeklinin değişmesiyle cismin kesitindeki gerilme yığılmasının durumunun değiştiği bilinmektedir. Buradan farklı numune şekillerinin malzemenin yorulma mukavemetini değiştirebileceği anlaşılmaktadır. Numune şekli cisimde gerilme yığılmasının minimum olmasını sağlaması halinde yorulma mukavemeti maksimum değerini alabilecektir. Bu bakımdan dairesel kesitli çubuklar için Caquot (torique) epruvet olarak isimlendirilen numuneler üzerinde deneyler yapılmasını önermektedir. (Şekil

2.11 a) da görüldüğü gibi böyle bir numune, eksen boyunca geçen kesitleri simetrik R yarı çaplı iki daire yayı ile çevrenmekte ve bu suretle numunenin tam ortasında kesit en küçük değer almaktadır. Pratikte bu şekilde numunelerin elde edilmesinde zorlukla karşılaşıldığından bunun yerine (Şekil 2.11 b) de gösterilen numuneler kullanılır.



Şekil 2.11. Yorulma deney numuneleri.

Levha halindeki numuneler için ise (Şekil 2.11 c) deki numuneler üzerinde yorulma deneyleri yapılmalıdır. Bu numunelerde gerek D/d oranı ve gerek D/b oranı 2 - 2.5 arasında, D'nin büyük değerleri için bu orana küçük değerler verilmek suretiyle değişir. Burada ayrıca şunu da açıklayalım ki gerilme yığılmasının etkisiyle kesiti dikdörtgen veya kare şeklinde olan numunelerin yorulma mukavemeti, kesiti dairesel olan numunelerin yorulma mukavemetinden belirgin derecede küçüktür. Yorulma mukavemeti dikdörtgen kesitli numunelerde Y_d ile ve dairesel kesitli numunelerde Y_c ile gösterilirse Y_d/Y_c oranı çeliklerde 0,90 civarında ve alüminyum alaşımlarında da 0,80 - 0,70 arasında değerler alır (Tauscher 1983).

2.6.2. Parça Büyüklüğünün Etkisi

Yorulma üzerinde önemli bir etkisi olan faktör de deneyi yapılan numunelerin boyutlarıdır. Yapılan pek çok deneyler numunenin boyutunun artmasıyla yorulma mukavemetinin azalmakta olduğunu göstermektedir. Bu konuda bir örnek olarak şunu verebiliriz. Çelikler üzerinde yapılan deneylerde alternatif gerilme halinde, numune çapının 8 mm. den 150 mm. ye yükselmesiyle yorulma sınırı $25,2 \text{ kgf/mm}^2$ den $14,7 \text{ kgf/mm}^2$ ye düşmüştür. Boyutun yorulma mukavemeti üzerine bu etkisinin iki nedenden ileri geldiği düşünülmektedir. Birincisi boyut ve bunun sonunda hacmin artmasıyla cismin dış yüzey alanı artmakta ve bu suretle yorulma etkisiyle çatlama kolaylaşmaktadır. İkincisi malzemenin hacminin artması ile kusurlu noktaların ve bölgelerin miktarı artmakta ve bu yüzden malzeme

daha küçük kuvvetler altında yorulmaya karşı mukavemetini kaybedebilmektedir(Postacıoğlu 1981).

Laboratuarlarda, yorulma deney aletlerinin uygulayabileceği maksimum kuvvetin pek büyük olmamasından dolayı boyutları küçük numuneler üzerinde yorulma deneyinin yapılması zorunluluğu vardır. Boyut artmasıyla yorulma mukavemetinin azalması laboratuarlarda elde edilen yorulma mukavemeti değerlerine güvenimizi azaltmaktadır. Güvenilir sonuçların elde edilmesi için yapıdaki boyutlara sahip numuneler üzerinde yorulma deneyleri yapılmalıdır ki bunun gerçekleştirilmesi ya olanak dışıdır veya çok pahalıya mal olmaktadır. Hakiki boyutta numuneler kullanarak yalnız uçaklar üzerinde yorulma deneyleri yapılmaktadır. Bu bakımdan laboratuvar deneylerinde bulunan sonuçlar belirli bir oranda küçültülerek yapı elemanlarına ait yorulma mukavemetlerinin elde edilmesi yoluna gidilmelidir.

Uçak elemanları üzerinde 1/1 ölçeğinde yapılan yorulma deneylerini üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar:

1. Gövdeye tespit edilmiş kanatlar üzerinde yapılan deneyler.
2. Gövdenin yorulma deneyi.
3. Uçak takımlarının yorulma deneyleri.

Bunların arasında en ilginç gövdenin yorulma deneyidir. Bu maksatla uçak gövdesi en ufak bir boşluk kalmayacak şekilde kapatılır ki zaten bu her uçakta gerçekleşen bir durumdur. Uçak dış taraftan, havada iken maruz kalacağı kuvvetlerle yüklenir. Gövdenin içine su sevk edilerek buna basınç uygulanır. Bu suretle gövde iç basınca maruz kalmakla uçak yüksek bir irtifada iken meydana gelen durum yaratılmış olur. Dış kuvvetlerin ve iç basıncın değerleri bir programa göre değiştirilerek yükleme işlemine başlanır. Belirli sayıda yükleme yapıldıktan sonra gövdede bir çatlak meydana gelip gelmediği kontrol edilir. Aynı zamanda gövdenin muhtelif yerlerine yerleştirilen ekstansometrelerle deformasyonlar kaydedilir. Üç ay kadar devam eden böyle bir deneyde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek uçak gövdesinin emniyetli bir şekilde maruz kalacağı kritik yükleme sayısı bulunur. Uçağa yerleştirilen aletler ile uçak kullanılırken yükleme sayısı kaydedilir. Yükleme, kritik yükleme sayısına ulaşıncaya kadar servisten çıkarılmalıdır (Bahmani ve diğerleri 1997).

2.6.3. Yüzey İşlemleri

Yorulma kırılmasının açıkça yüzeyden başladığı görülmüştür. Bu yüzden yüzey temizliği çok önemlidir. Yüzey işlemleri ezme, dövme, sementasyon, kaplama gibi işlemlerden oluşur ve bunlar yorulma mukavemetini arttırmış olur (Çelik 1995).

Doğrultma: Elemanlar üretim ve nakliyat esnasındaki çalışma şartlarında çatlama göstermeksizin plastik olarak deforme olabilirler. Bu parçalar uygun şekilde ısıtma ile pres veya

haddelemede doğrultulabilirler. İlk deformasyon ve devamında çalışma işlemleri artık gerilmeler veya gerilme arttırıcıları meydana getirebilir.

Kaplama: Metal yüzeylerde kaplama, kaplanan parçaların yorulma mukavemetine zararlı olabilir. Karbon ve düşük alaşımlı çelikler, özellikle yüksek sertliğe sahip çelikler, birleşik asit veya alkali temizleme çevrimleri ve kaplama çevrimi esnasında bünyesine hidrojen alması nedeni ile hidrojen zararına hassaslardır. Kadmiyum gibi yumuşak bir kaplama malzemesi çelikten hidrojen çıkışına engel olabilir ve hidrojen zararına yol açabilir. Bununla beraber, kadmiyum kaplamanın zararlı etkileri aşağıda tavsiye edilen işlemlerle önemli ölçüde azaltılabilir. 190 °C fırında tutmak için takriben 8 – 24 saatin ardından 6 – 8 A/dm² gibi yüksek akım yoğunluklarında kaplama yapılır. Düşük hidrojen birikmesi sağlayan kaplama banyosu sağlamak için günlük bir uygulama istenilen bir durumdur.

Krom gibi sert kaplama malzemeleri genellikle ana metalde çökelme olduktan sonra çekme gerilmeli bir durumdadır. Çatlaklar kaplama malzemesinde gelişir ve ana metalde çatlamaya neden olur. Ana metalde çatlak gelişimi basma artık gerilme uygulayarak önlenabilir.

Temizleme: Bir iş parçasının yüzeyinden yağ, gres veya diğer kalıntıların uzaklaştırılması için bazen temizleme gerekebilir. Bu iş için bir çözücü içerisinde daldırma veya basit kimyasal temizleme eriyiği kullanılabilir.

Alüminyumdan gres ve yağ kaldıran alkali çözeltiler yüzeye saldırdıklarından dolayı, çoğu temizleme amaçları için tatmin edici değildir. Bununla beraber koroziif aksiyonu yok etmek için uygun şekilde mani olunan alkali çözeltiler başarılı bir şekilde kullanılabilir. Temizleme işlemi temiz suda çalkalama ve ardından kurulama ile bitirilmelidir (ASM Hndbook 1992).

2.6.4. Koroziif Ortamın Etkisi

Bir cisim koroziif ortamın içinde iken değişken kuvvetlerin etkisi altında kalması halinde korozyon yorulması denilen durum meydana gelir. Bu durum yorulma olayının en tehlikeli halidir. Zira korozyon metalin yüzeyini pürüzlü hale sokarak çentik etkisini oluşturur. Çentik etkisiyle de korozyon yorulmasında cismin yorulma mukavemetinde büyük miktarlarda azalma meydana gelir.

Korozyon yorulmasının belli başlı karakteristiklerini kısaca şöyle özetlemek kabildir.

a) Bu tür yorulma olayında, diğer hallere göre daha fazla sayıda çatlak meydana gelir. Çünkü çatlak büyüdükçe elektrokimyasal etki azaldığından dolayı çatlağın yayılma hızı azalma gösterir. Böylelikle yeni çatlakların oluşması için gerekli zamanın bulunması çatlak sayısını arttırır.

b) Korozyon yorulmasında S – N eğrilerinin yatay bir asimptodu yoktur, başka bir deyişle eğrinin ordinatı yükleme sayısı artıkça devamlı olarak azalmaktadır. Şu halde bu halde yorulma sınırından bahsedilemez ancak yorulma mukavemeti terimi geçerlidir. Yalnız burada şunu belirtelim ki korozyona uğramış bir metal, korozif ortamdan alınarak, laboratuvar atmosferinde yorulma deneylerine tabi tutulursa böyle bir metalin S – N eğrisinin şekli korozyon etkisi görmemiş metalinkinden fark etmez. Bu durumda S – N eğrisini yatay bir asimptotunun bulunması, iki durum arasında önemli bir farkın bulunduğunu ortaya koyar. Korozyona uğramış numunenin yorulma mukavemeti veya sınırında, korozyon görmemiş cisme göre belirgin bir azalma vardır, başka bir deyişle yatay asimptotun ordinatı daha küçük değer alır.

c) Korozif yorulma halinde cismin yorulma mukavemeti, cismin çekme mukavemeti ile birlikte bir artış göstermez. Bu karakteristik, metalin çekme mukavemetine bağlı olmayan bir büyüklüktür. Su içinde tutulan numuneler üzerinde yapılan yorulma deneylerinde karbon miktarı %0,03 ile %1,09 arasında bulunan çeliklerin yorulma mukavemetlerinin, alternatif gerilme halinde, çekme mukavemetine bağlı olmadan 8,25 – 13,5 kgf/mm² aralığında değerler aldığı görülmüştür. Bahis konusu çeliklerin çekme mukavemetleri ise, 32 – 155 kgf/mm² arasında kalmakta idi.

Korozyon yorulmasına karşı korunma genel olarak iki yöntem ile gerçekleştirilir. Birisi mekanik işlemlerle metalin yüzeyinin sertleştirilmesi, diğeri korozyon olayını durdurucu maddelerin kullanılması. Bu sonuncu halde anodik bir kaplamanın yapılması, kaplamanın devamlılığın gerektirmediginden, daha güvenilir sonuçlar verir.

Birbirine değmekte olan iki cisim değişken kuvvetlerin etkisi altında bulunuyorsa sürtünme olayının işe karışmasıyla sürtünme korozyonu denilen bir olay kendini gösterir. Sürtünme sonunda ince toz halinde elemanlar, metalden ayrılır ve sonra da yüksek ısı derecesine maruz kalarak oksitlenirler. Çelik alaşımlarında bu suretle demir Fe₂O₃ tozları meydana gelir. Bunlar metalin yüzeyinde çizgiler meydana getirerek malzemenin yorulma mukavemetini büyük ölçüde azaltırlar. Sürtünme korozyonunu kabil olduğu kadar ortadan kaldırmak için genel olarak iki metot uygulanabilir. Birisi iki elemanın birbiri üzerinde hareket etmesini önleyen tedbirler almak, diğeri bu hareketin önlenmemesi halinde iki elemanın arasında sürtünme katsayısını azaltmak amacıyla, yağlama tekniğine başvurmak gereklidir (Postacıoğlu 1981).

2.6.5. Metalurjik Faktörlerin Etkisi

Yorulma çatlaklarının başlamasında inklüzyonların tipi, şekli ve büyüklüklerinin rolü vardır. Yapılan çalışmalar, oksit inklüzyonların yorulma hızlandırıcı yönde etki ettikleri ve bu

tip inklüzyonların büyüklüklerinin artması ile yorulma çatlaklarının başlama ihtimalinin arttığını göstermiştir.

Isıl işlemler, haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri sonucunda metallerin tane boyut ve şekli değişmektedir. Tane boyutunun küçülmesi yorulma mukavemetini arttırmaktadır.

Kimyasal bileşimin yorulma mukavemetine etkisi, ısıtım işlem ve mikroyapının etkisinden azdır. Genellikle bütün ısıtım işlemler yorulma mukavemetine etki ederler (Karagöz, Akagündüz 1996).

2.6.6. Sıcaklığın Yorulma Üzerine Etkisi

Sıcaklığın oda sıcaklığının altına düşmesi halinde gerek çentiksiz ve gerek çentikli numunelerin yorulma mukavemetinde bir artış olur. Bu artış özellikle yumuşak çelik için sert çeliklerden daha fazladır. Çekme mukavemeti de bilindiği gibi sıcaklık düştükçe artarsa da bu yorulma mukavemetindeki artıştan daha azdır. Yorulma mukavemetindeki bu artış -200°C ye kadar devam eder. R – M diyagramının şekli düşük sıcaklıklarda normal sıcaklıklardan farklı değildir (Kurban 1993).

Yüksek sıcaklıklarda yorulmada sünme olayının da oluşmasından dolayı iki durum söz konusudur. θ_f ile metallerde sünme olayının başladığı sıcaklık derecesini gösterirsek bu iki halden biri θ nın θ_f den küçük olması diğeri ise θ nın θ_f den büyük olmasıdır Coxand, Glennye 1986).

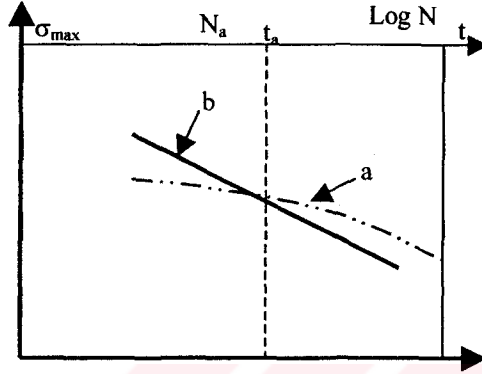
Sıcaklık derecesinin θ_f den küçük olması halinde karbon çeliklerinde yorulma mukavemeti sıcaklık derecesiyle birlikte şöyle bir değişme gösterir : Yorulma mukavemeti $\theta = 100^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman minimum değerini aldıktan sonra sıcaklık derecesiyle beraber artar ve 350°C de maksimum değerine ulaşır. Bu sıcaklık derecesinden sonra, çekme mukavemetinin azalmasına benzer bir şekilde, sıcaklık derecesi arttıkça devamlı olarak azalır.

Sıcaklık derecesinin θ_f den büyük olması halinde metallerin sünme yapmasıyla olay çok daha karmaşık bir durum kazanır. Bu halde kırılma olayı bazen yorulma sonunda ve bazen de sünme sonunda olabilir. Kırılmanın hangi şekilde meydana geleceği belirli bir sıcaklıkta yapılan yorulma ve sünme deneylerinde bulunan sonuçları aynı bir eksen takımında göstermek suretiyle anlaşılabilir. Bu maksatla x ekseni yükleme sayısını veya sünmede kırılma süresini y ekseni $\sigma_{\max}$ veya uygulanan sünme gerilmesini gösteren bir eksen takımı alınır.

Bu eksen takımında belirli bir sıcaklığında yapılan deneylerde bulunan sonuçlara dayanarak $\sigma_{\max}$ ın belirli bir değeri için S – N eğrisi (b eğrisi) ve a – t sünme eğrisi (a eğrisi) çizilir (Şekil 1.12).

Bu iki eğrinin kesiştiği A noktasının apsisi N_A veya t_A ise (bu N_A sayıda yükleme t_A süresinde yapılıyor demektir), yükleme süresinin N_A dan veya t_A dan küçük olması halinde

kırılma sünme sonunda buna karşılık sürenin N_A dan t_A dan büyük olması halinde ise yorulma olayının etkisiyle mukavemetini kaybetmektedir. A noktasının koordinatları ve özellikle apsisi sıcaklık derecesine ve yorulma deneyindeki σ_{min} değerine bağlı bulunmaktadır. Bu büyüklüklere muhtelif değerler verilerek çizilecek $S - N$ ve $a - t$ eğrilerine dayanarak yüksek sıcaklıkta yorulma etkisiyle kırılmanın oluşmaması için cisme uygulanacak σ_{max} 'un hangi değerden küçük kalması gerektiği bulunabilir.



Şekil 2.12 Isı ve yükleme sayısına bağlı olarak çizilen S - N eğrisi

Coffin ve Tavernelli'nin karbon çelikleri üzerinde yaptığı araştırmada; 400°C'ye kadar artan sıcaklıklarda yorulma belirtileri görüldüğü, bunun üzerindeki sıcaklıklarda ise yorulma mukavemetinde bir iyileşme görülmektedir (Çapa 1972). Bu durum, malzemede meydana gelen deformasyon yaşlanmasından kaynaklanmaktadır. Bazı malzemelerde, optimum sıcaklık ve frekansta, zorlanma yaşlanması meydana gelmekte olup, plastik deformasyonların azalması sonucu, akma sınırı ve çekme mukavemeti artmaktadır (Cox ve Glenny 1968).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerin sertliği arttıkça yorulma mukavemetinin de doğrusal olarak arttığını göstermektedir (Kurban, 1993).

2.6.7. Zorlanma Alanı Etkisi

Miner M. A. Her gerilme alanında ($\Delta\sigma$), hasarın liner olarak dağıldığını kabul etmiş ve bu hipoteze uygun olarak (xx) bağıntısını vermiştir.

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1.11)$$

Burada; n_i sabit i seviyesinde kısmi yükleme sayısı ve N_i sabit i seviyesinde yorulma ömrüdür. Hasarın her zaman liner olarak dağılmadığı ve yüksek zorlanma seviyelerinde, ilk yükleme sayılarında hasarın daha fazla olduğu görülmüştür (Çapa 1972). Coffin, gerilme alanı

yerine, plastik zorlanma alanını ($\Delta\epsilon_p$) parametre kabul ederek, Miner bağıntısına benzeyen ve daha kullanışlı olan aşağıdaki bağıntıyı verilmiştir.

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_e}{N_e} = 1 \quad (1.12)$$

Burada; $n_e = \Delta\epsilon_i$ sabit e seviyesinde kısmi yükleme sayısı ve $N_e = \Delta\epsilon_i$ sabit e seviyesindeki yorulma ömrüdür. Yapılan deneyler Miner hipotezine benzer sonuçlar vermiştir (Kurban 1993).

2.6.8. Gerilme Gradyanının Etkisi

Gerilme gradyanı parça kesitinde gerilmenin genel olarak değişimidir. Örneğin eğilme ve burulma zorlamalarında elastik şekil değişimi bölgesinde doğrusal olarak azalarak tarafsız eksende sıfır değerine ulaşır.

Çapları farklı olan iki parçanın yüzeyindeki gerilme aynı ise, çapı büyük olan parçada çok daha büyük bir hacim yüksek gerilme altında kalır. Yüksek düzeyde zorlanan malzeme hacminin artması ile malzeme kusurlarının bulunma olasılığı da artacağından, büyük çaplı parçalarda eğilme veya burulma yorulma dayanımları küçük çaplılara göre daha düşüktür. Çekme veya basma zorlamalarında ise gerilme gradyanı etmeni bakımından belirgin bir boyut etkisi yoktur.

Eksenel bir kuvvetin uygulandığı prizmatik bir çubukta delik ve bütün çevresi boyunca çentik bulunmasının gerilme durumunda şu iki önemli değişikliği meydana getirdiğini biliyoruz.

a) Çentik ve deliğin bulunduğu kesitte artık gerilme üniform bir şekilde yayılmaz. Çentik dibinde veya delik kenarından maksimum değerini aldıktan sonra, çentik ve delikten uzaklaştıkça değeri gittikçe küçülür.

b) Çentik ve deliğin bulunduğu kesiti çevreleyen bir bölgede üç eksenli gerilme hali meydana gelir. Çubuğa uygulanan eksenel kuvvetin bir çekme kuvveti olması halinde bu durumda oluşan asal gerilmelerin üçü de çekme gerilmesidir.

Delik kenarında veya çentik dibinde meydana gelen maksimum gerilmenin, kesitteki üniform gerilmeye oranı, veya α gerilme yığılma katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Pratikte en çok rastlanan durumlara göre α katsayısı (1,5 – 3,2) aralığı içinde değer alır.

Belirgin bir akma olayı gösteren sünek cisimlerde delik ve çentik bulunması bunların mekanik özelliklerinde bir azalma meydana getirmez. Zira σ_{max} 'un akma sınırına ulaşması halinde delik kenarında veya çentik dibinde akma olayının başlamasıyla, burada gerilmede bir artış olmaz iken delik ve çentikten uzak noktalarda gerilmenin artmasıyla uygulanan eksenel kuvvette ki artma karşılanmış olur. Bu gelişme delik ve çentiğin bulunduğu kesitte gerilme

yayılışı üniform bir hal alınca kadar devam ederek akma sınırının delikli ve çentikli numunelerde azalmasını önler. Diğer taraftan delik ve çentiğin bulunduğu kesiti çevreleyen hacimde meydana gelen üç eksenli gerilme durumunda asal gerilmelerin üçünün de çekme gerilmesi olması, bilindiği gibi, cismin mukavemetini belirgin derecede artırır. Bu sebeple bir çok hallerde çentikli ve delikli numunelerin çekme mukavemetinde bir artış meydana gelir.

Gerilme yığılması elemanda, delik ve çentiklerin bulunması dışında, kesitin ani bir şekilde değişmesi sonunda da meydana gelebilir. Burada da $(\alpha) \sigma_{\max}/\sigma_u$ olarak tanımlanır. Kesit değişikliğinin ani olmaması sağlanırsa, (α) 'nın değerini azaltmak mümkün olur.

Yapılarda genellikle çentikli ve delikli numunelerle karşılaşmakta ve kesit değişikliği de hiç de seyrek olmayan bir şekilde olmaktadır.

Herhangi bir elemanda delik veya çentiğin bulunması bu cismin yorulma mukavemetini önemli derecede azaltmaktadır. Y düz (çentiksiz ve delik bulunmayan) çubukların yorulma mukavemeti, Y ise çentikli veya delikli çubukların yorulma mukavemeti ise, bunlar arasında

$$\beta = \frac{Y}{Y^i} \quad (1.13)$$

gibi bir oran bulunmakta ve bu oran 1'den büyük değerler almaktadır. Buradan çubukta herhangi bir şekilde gerilme yığılmasının oluşması yorulma mukavemetinin azalmasına sebep olduğu anlaşılmaktadır. Bu azalma hakkında bir fikir edinmek için Ludwik tarafından çelikler üzerinde yapılan deneylerde alternatif gerilme hali için bulunan değerleri aşağıda veriyoruz. Deneylerdeki çubuklarda çentik derinliği 0,2 mm. olup bunlar çapı 0,05 mm. olan daire yayları ile son bulmaktadır.

Buradan görülmektedir ki gayet küçük bir çentiğin bulunması halinde β katsayısı 1,26 ile 1,56 arasında değişmektedir. Bu konuda yapılan diğer deneylerde yumuşak çeliklerde β katsayısının (1.75) mertebesinde değer aldığı saptanmıştır. Bazı hallerde β 'nın 2'nin üstünde de değerler aldığı gözlenmiştir. β 'nın 1.25 – 2.00 arasında değiştiği kabul edilirse çentiğin bulunması yorulma mukavemetinde %20 – %50 arasında bir azalmaya neden olmaktadır. Yorulma mukavemetinde önemli mertebede meydana gelen bu azalma, gerilme yığılmasının olduğu bütün hallerde göz önünde tutularak, kesit boyutları buna göre tayin edilmelidir. Bu şekilde hareket edilmediği takdirde gerilme yığılmasının bulunduğu kesitlerde yorulma etkisiyle kırılmanın oluşması ve bunun sonunda yapının kısmen veya tamamen yıkılması büyük bir olasılıkla gerçekleşebilir.

Yorulma çentik etkisi ki bu etkiyle gerilme yığılmasının oluşmasına neden olan bütün halleri delik ve kesit değişikliğini anlıyoruz, daha çok duyarlılık faktörü denilen bir karakteristik yardımıyla göz önünde tutulmaktadır, q ile gösterilen bu faktör şu denklem ile tanımlanmıştır :

$$q = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1} \quad (1.14)$$

β veya yorulma mukavemetindeki azalma katsayısının en önemli genel özelliklerinden birisi bunun α dan küçük olmasıdır. Bu durum zaten β nın aldığı değerlerden kolaylıkla görülmektedir. β nın α dan küçük olması için muhtelif nedenler vardır. Bunlardan bir tanesi yorulma olayı esnasında bir miktar plastik deformasyonun oluşması ve bunun sonunda çentik dibinde meydana gelen maksimum gerilmenin azalmasıdır. Diğer daha önemli bir neden numunenin boyutu ve gerilme değişiminin etkisidir. Deneyler şunu göstermektedir ki cisimde maksimum gerilmenin etkisi altında bulunan hacmin azalmasıyla yorulma mukavemeti artmaktadır. Bunların dışında gerilme yığılmasının meydana getirdiği üç eksenli hali çentikli numunelerde yorulma mukavemetinin (Y/α) 'dan daha büyük bir değer almasına neden olmaktadır.

Tablo 2.1. Çekme mukavemetine göre yorulma mukavemeti.

Çeliğin cinsi	Çekme mukavemeti kgf/mm ²	Yorulma mukavemeti kgf/mm ²		β
		Düz çubuk	Çentikli çubuk	
Yumuşak çelik	34	19	15	1.26
Yarı yumuşak çelik	54	27	18	1.50
Sert çelik	85	34	23	1.48
Çok sert çelik	100	42	27	1.56
Nikel ve kromlu çelik	85	47	35	1.35

Yukarıda yapılan açıklamaya göre teorik olarak β 'nın alabileceği en küçük değer 1 ve en büyük değer de α dır. β katsayısının bu aralık içinde değişmesinden dolayı q çentiğe duyarlılık faktörünün 0 – 1 arasında değerler aldığı kolaylıkla anlaşılır. (1.14) ifadesinden ayrıca q 'nın β ile veya β 'nın q ile birlikte arttığı hemen görülmektedir (Postacıoğlu 1981).

2.6.9. Metal Veya Alaşımın Soğukta İşlenmesi

Sünek metallerin soğukta işlenmeleri halinde yorulma sınırlarında bazı değişiklikler olur. Çelik çubuklarda yapılan deneyler, orta derecede işlenmiş bir elemanda yorulma dayanımının biraz arttığını göstermiştir. Daha büyük bir soğuk işlemede ise, yorulma sınırlarının azaldığı görülür. Soğuk işlemeden sonra eleman belirli bir süre kaynar suda

bırakılırsa veya sabit sıcaklıkta tutulursa, azalmış olan yorulma sınırının yine biraz arttığı görülür.

Soğuk işleme dikkatli olmayı gerektiren bir işlemdir. Dikkat edilmezse elemanda çatlaklar ve önemli artık gerilmeler meydana gelebilir (Aydın ve diğerleri 1997).

2.6.10. Frekansın Etkisi

Wöhler tarafından yapılan deneylerde kuvvetin tekrar sayısı dakikada 60 devir kadardı. Daha sonra Reynolds tarafından dakikada 2500 devir için deneyler yapılmış, arkasından Hopkinson 7000 devir/dakika lık deneyler yaparak, yorulma dayanımlarında %10 bir artış olduğunu göstermiştir. Bugün çok daha yüksek tekrar sayılarında deneyler yapılarak, yorulma sınırlarındaki artmalar öğrenilmektedir.

Düşük frekanslarda zamanın uzamasıyla korozyon etkisi kuvvetlenmediği sürece yüksek frekanslarda da sönümleme nedeniyle deney parçası çok fazla ısınmadığı sürece, frekans yorulma dayanımına önemli bir etki yapmaz. Çok düşük frekanslarda sürünme ve gerilme gevşemesi olayları ortaya çıkabilir. Çok yüksek frekanslarda ise yorulma dayanımının arttığı görülür.

Döküm şekli de yorulma mukavemetine etki etmektedir; vakumda yapılan ergitme, havada yapılan ergitmeye nazaran alaşımın yorulma mukavemetini arttırmaktadır (Başman ve diğerleri 2000).

2.6.11. İmalat Yöntemlerinin Etkisi

Yüzey pürüzlülükleri ve yüzeyde oluşan boşluklar genellikle parçanın üretimden sonraki haddeme, ekstrüzyon, dövme, talaş kaldırma ve takım izleri gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. Parçaların adhezyon ve kohezyon kuvvetlerine maruz kalmasıyla da yüzey süreksizlikleri oluşur.

Çevrimsel deformasyon tek yönlü soğuk plastik deformasyondan daha çok sayıda boşluk oluşturur. Bu boşluklar bazı metallerde başlangıçtaki yumuşamayı izah etmektedir. Söz konusu boşluklar, dışta kalan kayma düzlemi dışına tırmanmalarını ve dolayısıyla, malzemenin kısmen kendini toparlamasını sağlamaktadır. Yorulma dayanımı 20 °C' den -12 °C' ye indikçe artmaktadır. Çünkü boşluk hareketi önemsiz hale gelmektedir (Karagöz, Akagündüz 1996).

İmalat yöntemleri, gerilme arttırıcılar gibi davranan yüzeydeki düzensizlikleri oluşturarak veya kaldırarak yüzey tabakalarındaki artık gerilmeleri oluşturarak veya kaldırarak, yüzeyin yakınındaki malzemenin esas yorulma mukavemetini etkileyerek yorulma mukavemetini değiştirirler.

Talaş kaldırma işlemlerinin etkisi : Yorulma şartlarına maruz kalan çoğu elemanlar talaş kaldırma yöntemlerinden kaynaklanır. Kaba işlemeden kaynaklanan takım izleri elemandaki yorulma hasarını hızlandırabilir. Yüzey düzensizlikleri, gerilme arttırıcı gibi davranan kaba talaş kaldırma işleminden dolayı meydana gelir. Ancak paralel izler müşterek gerilme rahatlaması sağlamasından dolayı ayrılan izlere nazaran daha az bir etkiye sahiptirler. Bu nedenle yorulma şartlarına dayanması amaçlanan elemanlar ince paso ile bitirilmeli, tercihen taşlanmalı ve esas çekme yüküne paralel olmalıdır

Mekanik olarak bitirilen parçaların çoğu, artık basmalı sığ bir yüzey tabakasına sahiptir. Basma gerilmeli tabakanın yoğunluğu ve derinliği arttıkça yorulma ömrü için son bitirme süresi faydalı olacaktır. Elektrolitik paslatma, kimyasal ve elektrokimyasal işlemler gibi süreçlerde plastik deformasyon olmadan talaş kaldırıldığı için yorulma özellikleri azalabilir.

Gerilme arttırıcılar daha çok farklı çaplara sahip milin iki kısmı arasındaki omuz gibi kesit değişimlerinde meydana gelir.

Matkapla delme: Elemanların yorulma mukavemeti sadece matkapla delinen bir deliğin olmasıyla azalabilir. Delik etkilerini azaltmak için delikler pürüzsüz ve birbirinden uzak delinmelidir.

Taşılama: Uygun taşılama işlemi, yorulma çatlaklarının esas olarak artık gerilmeler veya bağımsız pürüzsüz bir yüzey meydana getirir. Bununla beraber yanlış taşılama işlemi, özellikle yüksek sertlikler için ısıtma işlemi görmüş çeliklerde, şiddetli olarak çekme gerilmeleri ve yerel ısıtma veya her ikisinden kaynaklanan hasarın ve yorulma mukavemetinin azalmasının temel bir sebebidir. Esas olarak yerel ısıtma aşırı temperleme, temperlenmemiş martenzit oluşumu yanmaya sebep olur. Sığ yüzey çatlakları genellikle taşılama çatlakları olarak kabul edilir.

Kaynak işlemleri: Kaynak işlemleri, yüzeyde ve yüzey altında bir metalin yorulma mukavemetinde bir etkiye sahip olabilir. Zayıf kaynak pratiklerinden kaynaklanan yüzey hataları gerilme arttırıcılarını meydana getirir (ASM Hndbook 1992).

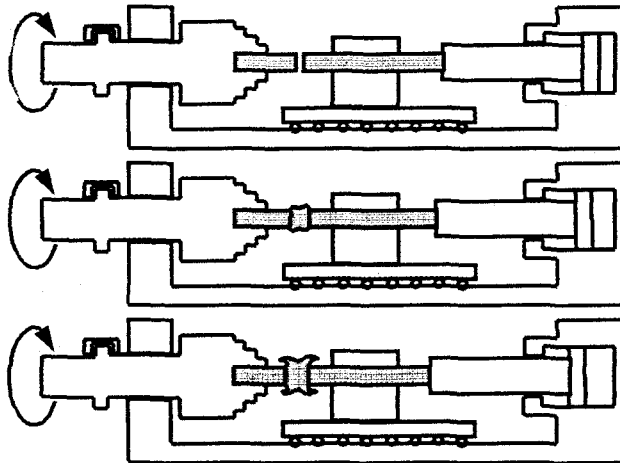
3. SÜRTÜNME KAYNAĞI

3.1. Sürtünme Kaynağının Gelişimi ve Tanımlanması

Metallerin kaynağında ve şekillendirilmesinde sürtünme ile elde edilen ısınn kullanılması düşüncesi yeni değildir. Sürtünme ısı ile gerçekleştirilen sürtünme kaynağı, gelişen teknoloji ile birlikte dünyada birçok ülkede ve endüstride geniş olarak uygulama alanı bulmuş, ticari bir prosestir. Başlangıçta torna tezgahı tipindeki basit cihazlar ile metal çubukların alın kaynağı denemeleri yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar, pratik önemi olmayan teknik meraklar olarak değerlendirilmiştir. Sürtünme kaynağının ilk denemeleri 15. yy'la kadar gitmekle birlikte, konuyla ilgili ilk çalışma, 1891 yılında, bir makinist olan J.H. Bevington tarafından yapılmıştır. Bevington ilk olarak metal boruların kaynağında sürtünme kaynağını uygulamıştır. Önceleri metal işleme endüstrisinde, başta kesme takımlarının kaynağı olmak üzere, birçok uygulamalarda kullanılmaya başlayan sürtünme kaynağı, zamanla yaygınlaşmıştır. Daha sonraları sürtünme kaynağı ile ilgili çalışmalar, 1924 yılında İngiltere'de, 1929 yılında Almanya'da W. Richter tarafından, 1924 yılında da Sovyetler Birliği'nde H. Klopstock tarafından yapılmıştır. H. Klopstock ve A.R. Neelands silindirik parçaların sürtünme kaynağı için 1941 yılında patent almışlardır. 1940'lı yıllarda Almanya ve Amerika'da plastik malzemelerin kaynağı üzerine çalışmalar yapılmıştır (Bahrani and Crossland, 1976), (Duffin and Crossland, 1971). Sürtünme kaynağı ile ilgili bilimsel çalışmalar ve bu kaynak yönteminin endüstride ticari bir proses olarak kullanımının gelişimi, A.J. Chdikov isimli bir Rus makinisti tarafından gerçekleştirilmiştir. İki metal çubuk arasında başarılı bir kaynak gerçekleştiren A.J. Chdikov, 1956 yılında Sovyetler Birliği'nde bu çalışmasına patent almıştır. Sovyetler Birliği'ndeki daha sonraki çalışmalar Vill ve arkadaşları tarafından yoğunlaştırılarak sürdürülmüştür. Bu proses ABD'ye 1960 yılında transfer edilmiştir. American Machine and Foundry Co.'da, Holland ve Cheng adlı araştırmacılar, sürtünme kaynağının termal ve parametre analizleri üzerine çalışmışlardır (Vill, 1962). İngiltere'de ise sürtünme kaynağı ile ilgili ilk çalışmalar 1961 yılında kaynak enstitüsü tarafından gerçekleştirilmiştir. 1962 yılında ABD'de Caterpillar Tractor Co. sürtünme kaynağını modifiye ederek, atalet kaynağı olarak adlandırılan yöntemi geliştirmiştir. Bu çalışmanın ardından konvansiyonel sürtünme kaynağı Rus tipi proses, atalet kaynağı ise Caterpillar tipi proses olarak adlandırmışlardır. Bu gelişmelerden sonra sürtünme kaynağı uygulamaları bütün dünyaya yayılarak endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında elektron ışın kaynağından sonra pratikte en çok kullanılan bir yöntemdir (Wang et al, 1974).

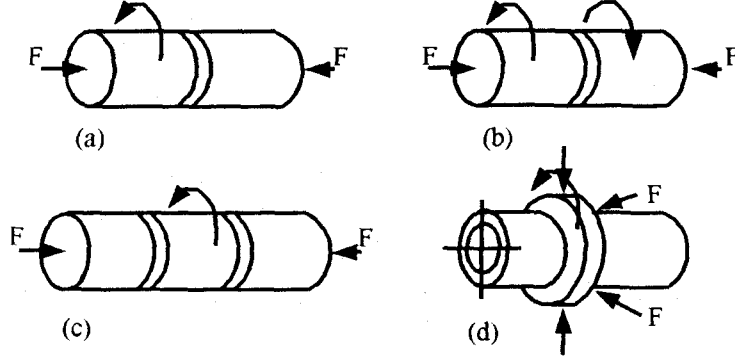
Bilindiği üzere, bütün mevcut kaynak yöntemleri; Ergitme ve basınç kaynağı olarak, iki temel tipte incelenebilir. Sürtünme kaynağı da basınç kaynağı tipinde bir yöntemdir. Sürtünme

kaynağı, elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından faydalanmaksızın, kaynatılacak parçaların ara yüzeylerinde mekanik olarak oluşturulan, sürtünme ile üretilen mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen, ısının kullanılması ile uygulanan bir katı hal kaynak tekniğidir. Diğer bir deyişle sürtünme kaynağı, gerekli olan ısıyı, belli bir basınç altında sürtünen parçaların, sürtünen yüzeylerinden temin eden bir sıcak basınç kaynağı yöntemidir. Kaynak bölgesinde üretilecek ısının verimli ve ekonomik kullanımı, kaynak edilecek yüzeyler üzerinde ısının çok iyi dağılması ile mümkündür. Diğer bir deyişle, sürtünme kaynağında, sadece parçaların kaynak edilecek kısımlarında ısı üretmek mümkündür. Kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler basınç altındadır ve ısıtma fazı olarak adlandırılan bu süreç yüzeylerde plastik şekil verme sıcaklığı oluşana kadar devam eder. Genel olarak, çelikler için kaynak bölgesinde oluşan sıcaklık 900 - 1300 °C arasındadır. Çoğu durumda ısıtma fazı sonrasında basınç artırılarak ara yüzeydeki ısıtılmış metal yığılır. Böylelikle kaynak bölgesi, bir çeşit termomekanik işleme tabi tutulmuş olur ve dolayısıyla bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir. Bu sebeple, diğer kaynak yöntemleri ile kaynatılamayan metaller ve alaşımlar sürtünme kaynağı ile rahatlıkla kaynatılabilir. Parçalar arasında kaynak bağının oluşabilmesi için ham yüzeylerin temas haline gelmesi gerekir. Sürtünme kaynağında bütün temassızlıklar sürtünme yoluyla giderildiği için bu temas çok iyi gerçekleşir. Normal şartlar altında sürtünen yüzeylerde bir ergime olayı oluşmaz. Eğer çok küçük miktarlarda bir erime olmuşsa da, kaynak sonu uygulanan yığma işleminden dolayı ergimiş metale ait bir bulguya rastlanılmamaktadır. Sürtünme kaynağının uygulama kademeleri şematik olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. Başlangıçta parçalardan biri dönerken diğeri sabittir (Şekil 3.1.a). Dönme hızı belirli bir hıza ulaştığında, iki parça bir araya getirilip eksenel bir basınç uygulanır ve ara yüzeydeki parçalar bölgesel olarak ısınır (Şekil 3.1.b). Son olarak, dönme hareketi durdurulur, eksenel basınç artırılarak parçalar arasındaki ısınmış malzeme yığılır (Şekil 3.1.c). (Welding Handbook., 1980), (Nicholas, 1983).



Şekil 3.1 Sürtünme kaynağı kademelerinin şematik gösterimi

Sürtünme kaynağı uygulamaları, çoğunlukla dairesel kesitli çubukların ve boruların kaynağında gerçekleştirilmektedir. Bu tür uygulamalarda sürtünmeyi oluşturan temel hareket dönme hareketidir (Anık, 1983). Belirli boyutlardaki çubukların ve boruların birleştirilmesinde kullanılan alışlagelmiş sürtünme kaynağı metotları Şekil 3.2’de verilmiştir.

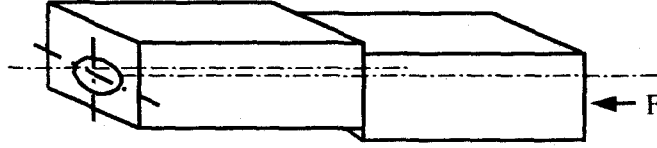


Şekil 3.2 Sürtünme kaynağının uygulama şekilleri

Şekil 3.2.a, en çok kullanılan ve en basit olan uygulama şeklidir. Bu metot da kaynak edilecek parçaların eksenleri aynıdır ve bu parçalardan birisi sabit, diğeri müşterek eksenleri etrafında dönmektedir. Uygulanan eksenel basınç altında, temas yüzeylerinde sürtünme kuvvetleri oluşur. Şekil 3.2.b ise, yüksek dönme hızlarının gerekli olduğu küçük çaplı numuneler için uygundur. Parçalar arası yüksek bağıl dönme hızları gerektiği durumlarda kullanılır. Şekil 3.2.c, fazla detaylı olmayan, dönmesi güç veya imkansız ve çok uzun olan parçaların birleştirilmesi için kullanılır. Şekil 3.2.d ise, pek uygulama alanı bulamamış olmakla birlikte boruların kaynağı için geliştirilmiştir ve radyal kuvvet etkisi altında dönel bir bilezikten yararlanılarak uygulanmaktadır (Tylecote, 1968), (Yılmaz, 1993).

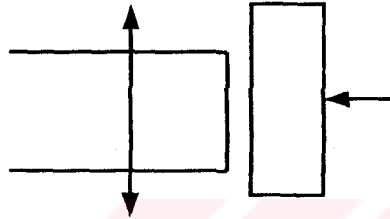
Sürtünme kaynağı metotlarının tümü için bilinmelidir ki parçalar arasında kuvvetli bağların oluşumu ve kaliteli bir kaynak bağlantısı ancak kaynatılacak parçaların temiz ve düzgün yüzeylerinin bir araya getirilmesi ile mümkündür. Muhtelif inklüzyonlar, yüzeyde oluşan oksitler ve yüzeye absorbe olmuş filmler daima mevcut olup, kuvvetli bağların oluşumuna ve kaynağın kalitesine olumsuz etkiye bulunurlar. Bu olumsuz oluşumlar, sürtünme esnasında yüzeylerin aşındırılması ile kaynak bağlantısından tahrip edilip uzaklaştırılırlar (Anık, 1983).

Sürtünme kaynağında, sürtünme için kullanılan dönme hareketine ilaveten yörüngesel hareket, lineer titreşim hareketi ve açısal titreşim hareketi de uygulanabilir. Yörüngesel hareket silindirik olmayan parçaların kaynağı içindir. Şekil 3.3’te görülen uygulamada, sabit duran parça üzerinde diğeri parça, bir köşesi dairesel bir yörünge çizerek hareket eder (Welding Handbook, 1980).



Şekil 3.3 Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı

Şekil 3.4'te şematik olarak verilen lineer titreşim hareketinde, parçalardan biri uygulanan basınç altında ileri geri titreşim hareketi yapar. Bu yöntem ilk defa Vill tarafından önerilmiştir. Açısal titreşim hareketinde ise parçalardan biri uygulanan basınç altında belli bir açıyı gören yay parçası yörüngesinde hareket eder (Vill, 1962).



Şekil 3.4 Lincer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı.

3.2. Sürtünme Kaynağının Çeşitleri

Sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre iki ayrı yöntemle uygulanabilir. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde, bu iki yöntemin bir arada uygulanması ile gerçekleştirilen kombine kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar, sürekli tahrikle sürtünme kaynağı, volan tahrikli sürtünme kaynağı ve kombine edilmiş (hibrid) sürtünme kaynağı şeklinde adlandırılabilirler (Bahrani and Crossland, 1976), (Welding Handbook, 1980).

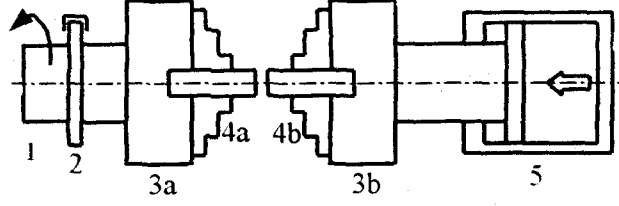
3.2.1. Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı

Bu yöntemde dönme enerjisi sürekli bir tahrik grubu ile sağlanır. Mekanik enerji, dönen iş parçasından dönmeyen iş parçasına basınç uygulamak sureti ile ısı enerjisine dönüştürülür. Genelde literatürde sürtünme kaynağı olarak bu kaynak yöntemi bahsedilir. Parçalardan birisi bir motor tahrik ünitesine bağlıdır ve sabit bir hız altında döner, aynı zamanda sabit eksenel kuvvet birleştirilecek parçalara uygulanır. Birleştirilecek parçalar, daha önceden belirlenen kaynak süresince veya belirlenen eksenel kısılma oluşuncaya kadar birbirlerine sürtünür ve daha sonra dışarıdan frenleme işlemi ile durdurulur. Kaynak esnasında uygulanan basınç, yığılma amacıyla artırılır ve kaynak soğuyuncaya kadar tutulur (Bahrani and Crossland, 1976), (Welding Handbook, 1980).

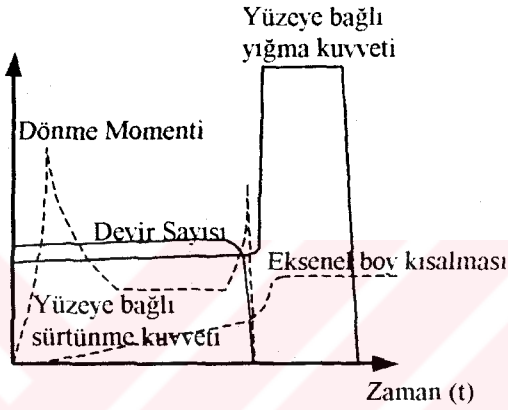
Temel kaynak parametreleri: Devir sayısı, yüzeye bağlı sürtünme kuvveti, sürtünme

süresi, yüzeye bağlı dövme kuvveti ve dövme süresidir.

Sürekli tahrikli bir sürtünme kaynağı makinesinin şematik yapısı Şekil 3.5’de zamana bağlı olarak işlem büyüklükleri ise Şekil 3.6’de verilmiştir.



Şekil 3.5 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı makinesinin şematik gösterimi.



Şekil 3.6 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı işlem büyüklükleri.

Şekil 3.5’de verilen numaralandırmaya göre; 1- Tahrik motoru, 2- Fren, 3a- Dönen iş parçasının bağlandığı ayna, 3b- Sabit iş parçasının bağlandığı ayna, 4a- Dönen iş parçası, 4b- Sabit iş parçası, 5- Yığılma silindiri olarak şematik gösterimi verilmiş parçaları ifade etmektedir.

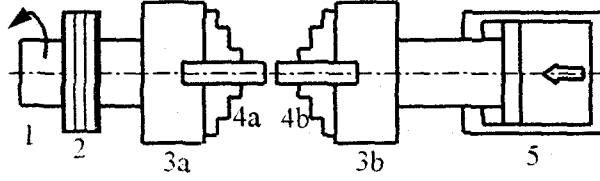
3.2.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

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

tahrikle sürtünme kaynağına olan üstünlükleri; kaliteli bir kaynak dikişi, daha dar bir ITAB bölgesi, daha seri üretim, daha düşük güç ihtiyacı, daha basit düzenek şeklinde sıralanabilir.

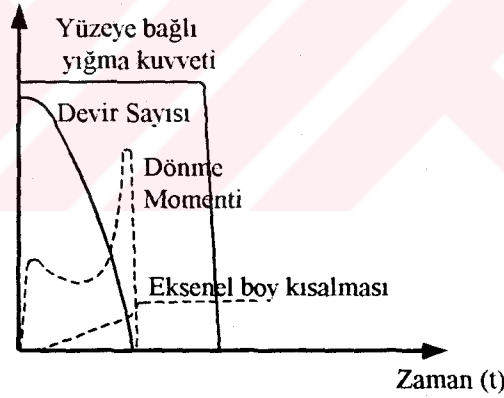
Temel kaynak parametreleri : Devir sayısı, yüzeye bağlı dövme kuvveti, dövme süresi ve volanın kütlesidir (Bahrani and Crossland, 1976), (Welding Handbook., 1980).

Volan tahrikli bir sürtünme kaynağı makinesinin şematik yapısı Şekil 3.7'de, zamana bağlı işlem büyüklükleri ise Şekil 3.8'da verilmiştir.



Şekil 3.7 Volan tahrikli sürtünme kaynağı makinesinin şematik gösterimi.

Şekil 3.7'de verilen numaralandırmaya göre; 1- Tahrik motoru, 2- Değiştirilebilir volan, 3a- Dönen iş parçasının bağlandığı ayna, 3b- Sabit iş parçasının bağlandığı ayna, 4a- Dönen iş parçası, 4b- Sabit iş parçası, 5- Yığma silindiri olarak şematik gösterimi verilmiş parçaları ifade etmektedir.



Şekil 3.8 Volan tahrikli sürtünme kaynağında zamana bağlı işlem büyüklükleri.

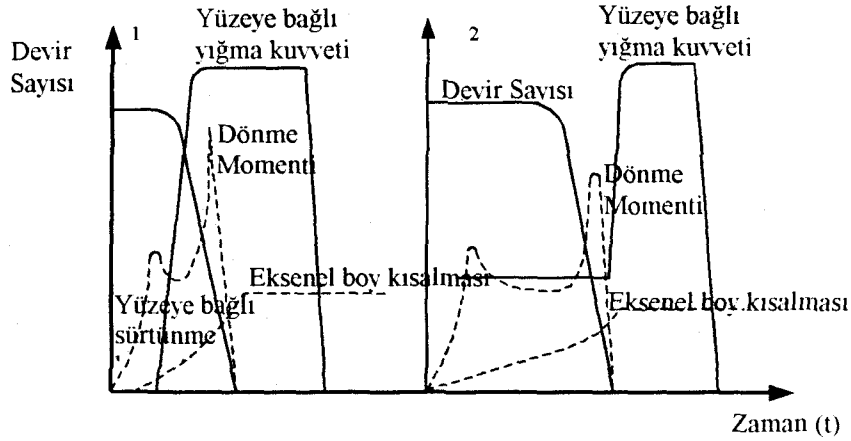
3.2.3. Kombine Edilmiş (Hibrid) Sürtünme Kaynağı

Bu yöntem sürekli tahrikle sürtünme kaynağı ile volan tahrikli sürtünme kaynağının bir kombinasyonudur. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesinde avantajlı olduğu söylenebilir. Bu yöntem bazı literatürde volan kaynağı olarak da ifade edilmektedir.

Temel kaynak parametreleri : Devir sayısı, yüzeye bağlı sürtünme kuvveti, sürtünme süresi, yüzeye bağlı dövme kuvveti, dövme süresi, frenlemeye başlama zamanıdır.

Kombine edilmiş sürtünme kaynağı makinesinin şematik şekli, Şekil 3.5'de verilen ile aynı olmakla birlikte, zamana bağlı işlem büyüklükleri Şekil 3.9'da verilmiştir.

Şekil 3.6, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilen işlem büyüklükleri irdelendiğinde; kaynak işlemi, ana başlıklar ile sürtünme ve yığma safhalarını içermektedir. Hem sürekli tahrikli hem de volan tahrikli sürtünme kaynağı için moment eğrilerinin değişimi, işlemin anlaşılması açısından önemli anlamlar taşımaktadır. İşlemin başlangıcında, parçalar arasında kuru sürtünme vardır ve bu sürtünmenin etkisiyle moment eğrisi bir üst değer yaptıktan sonra denge konumuna ulaşır.



Şekil 3.9 Kombine edilmiş sürtünme kaynağında zamana bağlı işlem büyüklükleri.

Bölüm 3.1'de de ifade edildiği üzere, parçaların sürtünen yüzeyleri üzerindeki oksit tabakalarının parçalanması sonucu, çıplak yüzey temasları artar ve bu temaslar esnasında kuvvetli atomsal bağlar oluşmaya başlar. Sürtünme ile bu bağlar kopmaya zorlanır. Nihayetinde bu temas noktalarında şiddetli adhezyon kuvvetleri oluşur, moment artar ve sıcaklık istenilen düzeye ulaşır. Frenleme sonrası hız süratle azalırken moment de sıfıra düşer (Welding Handbook, 1980), (Bahrani and Crossland, 1976).

3.3. Sürtünme Kaynağı Makinesinden Beklenen Özellikler

Sürtünme kaynağı makineleri, genel olarak metal işleme makinelerinden olan torna, matkap gibi tezgahlara benzerlik göstermektedirler. İlk sürtünme kaynağı makineleri, bu tezgahların modifiye edilmiş şekilleridir. Şekil 3.5 ve 3.7'de, sürtünme kaynağı makinesi Şematik olarak verilmiştir. Şekiller incelendiğinde de görüleceği üzere bir sürtünme kaynağı makinesinde, ana gövde ve buna bağlı bağlantı elemanları, dönme ve yığma mekanizmaları, fren sistemi, güç ünitesi, kontrol üniteleri ve kumanda tablosu bulunmaktadır. Sürtünme kaynağı makineleri tam mekanize makinelerdir. Parçaların bağlanması, bırakılması, kaynak sonrası yığmadan dolayı oluşan çapakların tornalanması otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Sürtünme kaynağındaki temel fonksiyonlar, parçaların bağlanması, sıkıştırılması ve bırakılması, basınç altında dönme ve sürtünme, frenleme, yığma ve işlem için gerekli sürelerin hassasiyetle ayarlanmasıdır.

Numune bağlama aparatları gerekli rijitliğe sahip olmalı, üzerine gelecek momentleri karşılamalı, radyal kaçıklıklar ve titreşimler elimine edilebilmelidir. Özellikle kaynak işlemi boyunca oluşabilecek titreşimler, gerekli incelemeler ve araştırmalar yapılarak, sönümlenebilecek şekilde sürtünme kaynağı makinesinin dizayn edilmesi gerekmektedir. Titreşimler yanında oluşacak radyal ve eksenel kuvvetlerden dolayı parçaların sabitlenmesi ve eksenel kaçıklıkların önlenmesi güçtür. Bu sebeple, bağlama aparatları gereken miktarda sıkıştırarak dizayna sahip olmalıdır. Bu işlem için genellikle V şekilli iki çene veya özel çeneler kullanılır (Nicholas.1983),

Kaynak ekipmanlarını tutmak için kullanılan bütün durdurma aparatları güvenilir olmalıdır. Bağlantısı yapılacak parçalarda oluşabilecek küçük bir kayma, hem kalitesiz bir kaynak bağlantısına, hem de frenleme sisteminin zarar görmesine sebep olur. Uygulamaların çoğunda otomatik olarak merkezleyen frenleme düzenekleri kullanılır.

Sürtünme kaynağı makineleri, normal olarak belirti parça büyüklükleri ve malzemeler arasında çalışmaktadır. Örneğin, 120 KN basma kuvvetinde, 15 KW elektrik motoruyla tahrik edilen bir makine, kesit alanı 130-800 mm² olan çelikleri kaynak edebilir.

Bütün makineler, kaynak edilecek parçaya uygulanacak ana işlemin değişkenlerinin gerekli değerlerine ayarlanabilir ve her işlem kaynak işleminin başlamasından sonra otomatik olarak denetlenir. Bazen bu işlem, elle şalterin kapatılması ya da koruyucuların kapatılması ile yapılır.

3.4. Sürtünme Kaynağında Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti

Malzeme karakteristikleri hakkındaki bilgiler, metalik malzemenin ve malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygun olup olmadığı için çok net değildir. Metalik malzemelerin veya kombinasyonlarının, sürtünme kaynağına uygunluğu hakkındaki değerler, deneysel çalışmalar ve pratik uygulamalar sonucu elde edilmiştir. Her yeni malzeme ve malzeme kombinasyonlarında sürtünme kaynağına uygunluk, birleştirilecek parçalar için optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ön deneyler ile belirlenebilmektedir. Bu uygunluk durumları deneysel sonuçlar olduğundan dolayı değişmez sonuçlar değildir. Yeni bilgiler söz konusu olduğunda, yeniden tanımlanabilir ve düzeltilerler (Ganowski, 1973), (Metals Handbook, 1983).

Başka kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi mümkün olmayan malzemeler ve kombinasyonlarının, sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi söz konusu olduğundan dolayı, diğer kaynak yöntemleri için geçerli olan “kaynağına uygunluğun belirlenmesindeki kriterler” sürtünme kaynağı için geçerli değildir (Yılmaz, 1993).

Birleştirilecek malzemelerin sürtünme kaynağına uygunluğu için, malzemenin

mukavemeti ve sıcak şekil değiştirme kabiliyeti önemli iki faktördür. Malzemenin mukavemeti, sürtünme kaynağı esnasında eksenel basınç ve dönme momenti ile aşırı bir deformasyonun oluşumunu önleyecek miktarda yüksek olmalıdır. Bununla birlikte, birleşmenin kalitesi açısından, birleştirilecek malzemelerin sıcak şekil değiştirme kabiliyetleri yeterli düzeyde olmalıdır (Ganowski, 1973).

Birleştirilecek malzemelerin kaynak karakteristikleri üzerine etkisi incelendiğinde; malzeme ve kombinasyonları iki grup altında irdelenebilir. Bunlardan ilki, hemen hemen aynı ısı davranış gösteren malzemeler, diğeri ise çok farklı sıcak mukavemet değerlerine ve ergime sıcaklığı noktalarına sahip malzemelerdir. Birinci tip malzemeler, aynı cins malzemeler olarak kabul edilip doğrudan kaynak işlemine tabi tutulurlar. İkinci tip malzemelerde ise uygunluk araştırması için ön deneyler uygulanır, bundan sonra kaynak işlemi uygulanır (Yılmaz, 1993). Bir çok demir esaslı ve demir dışı metaller sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilir. Ayrıca sürtünme kaynağı, farklı ısı ve mekanik özelliklere sahip metallerin kaynağında da kullanılır. Çoğunlukla bu malzemelerin diğerkaynak yöntemleri ile birleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Metallerin ergime sıcaklıkları altındaki kaynak sıcaklıkları ve kısa kaynak süreleri, sürtünme kaynağının üstünlüğünü sağlayan unsurlardır. Farklı ısı ve mekanik özelliklere sahip metallerin sürtünme kaynağı simetrik olmayan deformasyon miktarlarına sebep olur. Yüksek bir kaynak mukavemeti ise göreceli olarak simetrik plastik deformasyon veren farklı malzemelerin kaynağında elde edilebilir. Bu durumun gerçekleşmesi için Vill (1962), kaynağı oluşturan parçalardan ergime sıcaklığı daha küçük olanının çapının %15 - %25 oranında daha büyük yapılmasını önermiştir.

Sürtünme kaynağı ile, dövülebilen, iyi kuru sürtünme özellikleri olmayan bütün malzemeler kolaylıkla kaynak edilebilir. Kuru yağlama sağlayan alaşım elementleri, bağlantı bölgesinin kaynak sıcaklığına erişmesine engel olur.

Demir esaslı malzemeler, yumuşak çelikten, yüksek alaşımlı çeliklere kadar sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirler. Düşük mukavemetli çelikler göreceli olarak daha kolay kaynak edilebilmekte ve hassas olmayan parametre aralığında birleşebilmektedirler. Yüksek alaşımlı çelikler ise daha hassas parametre aralığında ve daha yüksek eksenel kuvvetlerde kaynak edilebilmektedir. Isıl işlem görmüş paslanmaz çelikler, yüksek alaşımlı çeliklerde olduğu gibi hassas parametre aralığında kaynak edilebilirler. Yüksek alaşımlı çelikler için, 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, yeter genişlikte ITAB temin edilmelidir. Yüksek mukavemetli malzemelerde çatlak ilerlemesi hızlı geliştiğinden dolayı, birleşen yüzeyler çatlak etkisi yapabilecek unsurlardan arındırılmalıdır.

Sinterlenmiş malzemeler, Al, Cu, Ti, Zr, Mg alaşımları, ısıl dirençli Ni ve Co alaşımları, refrakter metaller olan Ta, Mo alaşımları da sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirler (Metals Handbook. 1983).

Östenitik çelikler, yüksek süneklilik ve üstün sıcak deformasyon kabiliyetine sahip olduklarından düşük sürtünme süresi ve sürtünme basıncı değerlerinde sürtünme kaynağına tabi tutulurlar.

Yüksek sıcaklıkta mukavemetli alaşımlar, uygun olmayan ısıl iletkenlik ve yüksek sıcaklık mukavemetlerinden dolayı yüksek sürtünme süresi ve düşük sürtünme basıncı değerlerinde sürtünme kaynağına tabi tutulurlar.

Cu, Al, Ti ve alaşımları yüksek devir sayılarında, düşük sürtünme basınçlarında, sürtünme kaynağına tabi tutulurlar.

Bazı metal ve alaşımlarında kendilerine has metalurjik içeriklerinden dolayı başarılı sürtünme kaynağı uygulamaları gerçekleştirilememektedir. Bunlar;

Serbest grafitin sürtünme sıcaklığını sınırlamasından dolayı, bütün dökme demirler,

Sürtünme sıcaklığının sınırlanmasından dolayı, %0.3 'ün üzerinde kurşun içeren bronz ve pirinçler ile %0.13 'ün üzerinde S, Pb içeren otomat çelikleri,

Geçiş bölgesi kırılganlığından dolayı, yüksek derecede anizotropik malzemeler,

Yapısında hazır olarak grafit, Mn, S, serbest Pb gibi zayıflatıcı faz içeren malzemelerdir (Metals Handbook. 1983), (Yılmaz, 1993).

3.5. Malzemelerin Sürtünme Kaynağına Hazırlanması ve Dizaynı

Sürtünme kaynağında, kaynak edilecek parçaların dizaynı diğer kaynak yöntemlerine göre farklılık arz etmektedir. Umumiyetle boya, yağ ve diğer olumsuzluk oluşturan unsurlar herhangi bir sorun oluşturmazlar. Tavsiye edilmemekle birlikte, oksijen ile kesilmiş yüzeylerin kaynağı dahi mümkündür. Ayrıca, yüzeylerin korozyon tabakası ile yada farklı bir tabaka ile kaplı olması kaynak işlemini etkilemez. Bunun yanında, kalın oksit tabakalarından, yüzeylerdeki karıncalanmadan, derin çizik ve deliklerden sakınılmalıdır. Yüzeylerdeki çok fazla girinti ve çıkıntılar, yüksek ısı merkezlerinin meydana gelmesine, dolayısıyla kötü ısı dağılımına neden olur. Yüzey pürüzlülüğünün çok fazla olduğu durumlarda, çıkıntılar konsol giriş şeklinde çalışırlar. Konsol giriş şeklinde çalışan çıkıntılar, deformasyon, esnasında iç katmanların oluşumuna ve deforme olsalar dahi, kök kısımlarının soğuk olmasından dolayı yine katman oluşumuna neden olurlar. Kaynak bölgesindeki deformasyon bahsedilen unsurları dışarıya atabilecek şekilde olmalıdır. Bunların dışında farklı özelliklere sahip metal ve alaşımlarının yüzey hazırlığına daha çok önem verilmelidir. Kaynak yapılacak parçaların yüzeylerinin, diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi özel bir şekle sokulması gerekmez.

Ancak büyük çaplı parçalarda, sürtünmeye yardımcı olmak için küresel veya kesik koni şeklinde ağız oluşturulabilir. Kaynak yapılacak parçalar, en az eksen kaçıklığı verecek şekilde dizayn edilmelilerdir. Kaynak toleransı, çalışma parçalarındaki hatalar kadar, kaynak makinesine de bağlıdır (Kuruzar, 1979).

F. Ganovski (1973), uzunluk toleransı ve kabul edilebilir eksen kaçıklığı için 0.203 mm değerini önermiştir. G.H.C. Begg ve B.A. Humphreys çalışmalarında, 0.2 mm'lik eksenel kaçıklık toleransı ve 0.001 Rad'lık açısal tolerans önermişlerdir (Begg and Humphreys, 1981).

Sürtünme kaynağı ile ilgili temel dizayn şekilleri, çubuk-çubuk, boru-boru, çubuk-boru, çubuk-levha, boru-levha ve boru-disk kombinasyonları şeklindedir. Sürtünme kaynağının teorisi gereği, özel sürtünme hareketi durumları hariç, parçaların en az bir tanesinin dönel olması istenir. Karışık şekilli parçalar ve dövülmesi zor parçalar için, dövülerek şekillendirilmiş iki veya üç parça sürtünme kaynağı ile bir araya getirilerek üretilebilir. Sürtünme kaynağı ile yapılacak açılı bağlantılarda eksenle olacak açının, genel olarak 30-45° ve 45-60° arasında olması önerilmiştir. D.L. Kuruzar ise bu açının 30°'den büyük olmasını tavsiye etmiştir. Bazı dizayn şekillerinde kaynak esnasında oluşan metal yığılmasının alınması çok zor yada imkansız olduğundan, dizaynda kaynak bağlantısına bitişik yığma aralıkları bırakılır (Kuruzar, 1979).

3.6. Sürtünme Kaynağı Parametreleri

Sürtünme kaynağının diğer kaynak yöntemlerinden en önemli farkı, oldukça fazla sayıda kaynak parametresi ile kontrol edilebilir olmasıdır. Deney çubuğu çapı, kaynak işlemi esnasında dönen parçanın devir sayısı, tornalama işlemi esnasında dönen parçanın devir sayısı, sürtünme temas süresi, fren geciktirme süresi, dövme geciktirme süresi, dövme süresi, sürtünme basıncı yükselme süresi, dövme basıncı yükselme süresi, dövme sonu bekleme zamanı, sürtünme süresi, sürtünme basıncı, dövme basıncı sürtünme kaynağının belli başlı parametreleri olarak sayılabilir. Bunun dışında kaynatılacak parçaların, geometrisi ve malzemesinden kaynaklanan diğer parametrelerde söz konusudur. Sürtünme kaynağı parametreleri ile ilgili temel literatürler incelendiğinde, yöntem üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gereken parametrelerin dönen parçanın devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme basıncı, dövme basıncı ve dövme süresi olduğu görülmektedir. Her parametrenin etkin olduğu alanın çok geniş olduğu bilinmektedir. Parametre sınırları bir kere belirlendiğinde son derece güvenilir kaynak yapmak mümkündür (Anık,1983).

Dönen parçanın devir sayısının düşük tutulması, çalışmayı durduracak kadar büyük momentlerin oluşumuna ve düzensiz ısıtmadan dolayı üniform olmayan yığmaya neden olur. Bununla birlikte farklı metal bağlantıları için düşük devir sayıları, gevrek bir intermetalik bileşiğin formlaşmasını en aza indirebilir. Dönen parçanın devir sayısının yüksek tutulması

durumunda ise ITAB genişler ve kaynak zamanı uzar, bunun yanında güç girdisinde büyük bir değişiklik olmaz. Bu durumda kaynak bölgesindeki aşırı ısınmayı önlemek için sürtünme basıncı ve sürtünme süresi çok dikkatli kontrol edilmelidir. Yüzeyde meydana gelen ısınma, düşük devir sayılarında daha yüksek olmaktadır. Kesitteki çevreden merkeze teğetsel hızların azalması herhangi bir sakınca meydana getirmemektedir. Isınma merkezden çevreye doğru yayılmaktadır.

Kaynakta uygulanan basınç değerleri, malzemedeki sıcaklık gradyenini denetlediği ve döndürme momentini, dolayısıyla gücü etkilediği için oldukça önem arz etmektedir. Sürtünme basıncı ve dövme basıncı, kaynatılacak parçaların geometrisi ve malzemesi ile doğrudan ilgilidir, değişimi dar bir aralıkta değildir. Gereğinden fazla uygulanan basınç değerleri orantılı olarak güç gereksinimini artırır. Daha hızlı enerji girişinden dolayı daha yüksek basınçlar, ITAB'ın genişliğini azaltır, metal yer değiştirme oranını hızlandırır ve böylece kaynak zamanı kısalarak paralel olmayan kenar ısı bandı oluşur. Basınç değişkeni, kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel boy kısalması miktarı ile kontrol altında tutulabilir. Yüzeylerdeki girinti ve çıkıntıların düzgün deformasyonu ve üniform ısı dağılımını mümkün kılacak optimum basınç, malzemelere uygulanmalıdır (Welding Handbook, 1980).

Sürtünme basıncı, temas eden yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin hava ile ilişkisini kesebilecek ve ara yüzeylerde üniform bir ısıtma sağlayabilecek değerde olmalıdır. Sürtünme işlemi esnasında, özellikle çelikler için, dövme basıncının uygulanması kaynak kalitesini artırır.

Dövme basıncı, malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır. Aşırı kaynak yığılmasına neden olacak kadar yüksek, elverişsiz sıcak şekillendirmeye, dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya neden olacak kadar da düşük olmamalıdır. Farklı malzemelerin kaynağında ise düşük mukavemetli malzeme esas alınarak dövme basıncı belirlenir. Yüzeyden yüzeye, makro boyutta parçacıkların difüzyonu dövme esnasında meydana gelir. Yüzeyler arasında, sürtünme esnasında sürekli olarak bağlar meydana gelir ve bozulur. Dövme başlangıcında yüzeyde maksimum miktarda bağ meydana gelmelidir. Dolayısıyla kaynak kesitinde kalıcı bağ, bu en son teşekkül etmiş bağlardır. Difüzyon için parçalar birbirine küçük bir itme ile bastırılmalı ve baskı kuvveti hemen geri alınmamalıdır, hatta yükseltiyle bir süre kaynak ısısı nispeten soğuyana kadar kalmalıdır.

Sürtünme ve dövme süreleri malzeme ile doğrudan ilgili parametrelerdir. Sürtünme süresi, sürtünen yüzeyler arasındaki muhtemel kalıntı ve parçacıkların uzaklaştırılmasına yada plastik deformasyonu mümkün kılacak düzeyde olmalıdır. Kaliteli bir kaynak bağlantısı için minimum sürtünme süresi değerinin aşılması gerekmektedir. Düşük sürtünme süreleri, düzensiz ısıtma ile birlikte ara yüzeyde birleşmemiş bölgelerin oluşumuna ve yetersiz plastik

deformasyona neden olur, buda kalitesiz kaynak anlamına gelmektedir. Yüksek sürtünme süreleri ise, kabalaşmış yapıyla birlikte geniş bir ITAB oluşumuna neden olur. Bu farklı metallerin kaynağında önemlidir, çünkü yüzeyler arası geçiş tabakasında, düşük biçim alma özelliğine sahip metaller arası bileşiklerin fazlaca oluşması nedeniyle, kötü mekanik özellikler doğurabilir. Aynı zamanda aşırı derinlikte bir ısıtmaya ve malzeme sarfiyatına neden olur (Welding Handbook, 1980).

3.7. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları

Sürtünme kaynağı özellikle seri üretim için uygun bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, göreceli olarak yüksek olan donanım maliyeti, işlenen malzemenin fazla ve kullanılan iş gücünün az olmasıyla dengelenmektedir. İşlem çok yönlüdür ve donanım kolayca ayarlanabilir. Böylelikle, işletme masraflarında önemli miktarlarda azalma olduğu ve malzeme tasarrufu sağlandığından dolayı, küçük grupların kaynak edilmesinde avantajlı bir kaynak yöntemi olarak kabul edilebilir. Bu avantajlarından dolayı, günümüzde sürtünme kaynağı endüstrinin bir çok sahasında uygulama alanı bulmuş bir kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağının endüstride en çok kullanılan uygulama alanları şu başlıklarla sıralanabilir.

Makine imalatı ve yedek parça endüstrisi: Dişli çarklar, piston kolları, hidrolik silindirler, radyal pompa pistonları, piston kolları, sonsuz vidalı miller, krank milleri, matkap uçları, valflar.

Otomotiv endüstrisi: Supaplar, supap yuvaları, kardan milleri, vites kolları, aks bağlantıları, fren milleri, şanzıman parçaları, ön ısıtma odaları, boru miller, taşıyıcı aks milleri...

Havacılık ve uzay endüstrisi: İtme jetleri, yanma odaları, miller, türbinler, rotorlar, borular, fittingsler, flanşlar...

İş takımları endüstrisi: Spiral matkaplar, freze bıçakları, delik zımbalan, raybalar, çelik kalemler...

Elektrik, elektroteknik ve kimya endüstrisi: Gaz analizleri için alıcı kameraları, kromatograflar için ayırma sütunları, röntgen cihazı tüpleri için döner anot milleri, sürekli lehim uçları, devre kontakları, geçiş parçaları, boru tesisatı bağlantıları (Ellis, 1976).

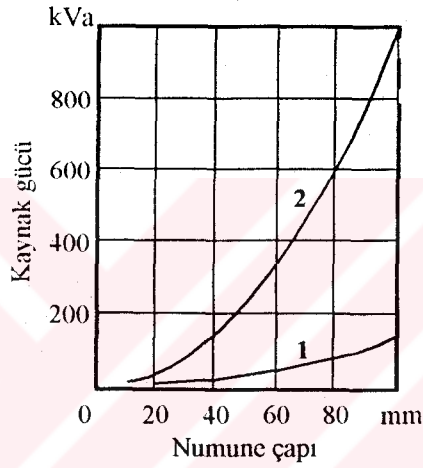
3.8. Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Sürtünme kaynağı, teknik ve ekonomik açıdan diğer kaynak yöntemlerinden belirgin bir üstünlüğe sahiptir. Genelde sürtünme kaynağı, elektrik direnç kaynağı yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Fakat bazı kullanma alanlarında sürtünme kaynağı elektron ışını kullanılan ve elektrik arkı manyetik hareketli olan kaynak yöntemleri ile de karşılaştırılabilir.

Sürtünme kaynağının temel avantajlarından en önemlisi, enerjinin rantabil

kullanılabilmesidir. İşlem, alışılmışın dışında yüksek verime, buna karşılık daha düşük bir enerji ve güç ihtiyacına sahiptir. Bununla birlikte, aynı kaynak neticeleri için sürtünme kaynağında kullanılan güç miktarı, elektrik direnç kaynağına göre % 80 - 90 oranında daha azdır (Şekil 3.10). Sürtünme kaynağı motorda üç fazlı bir yükleme ile gerçekleştirilir ve güç faktörü $\cos\phi=0.80-0.85$ değerindedir. Elektrik direnç kaynağı ise tek fazla yapılır ve güç faktörü $\cos\phi=0.40-0.60$ dır.

Sürtünme kaynağı işlemi süresince ısıtılan metal miktarı çok küçük olduğundan, soğuma süresi de çok küçük bir zaman aralığını kapsar. Bu süre, birkaç saniye ile bir dakika aralığında değişebilmektedir. Sürtünme kaynağı bu özelliği sebebiyle, yalnızca elektrik direnç kaynağı ile karşılaştırılabilen çok yüksek hızlarda yapılabilir.



Şekil 3.10 Kaynak esnasında gerekli güç ihtiyacının yöntemlere göre karşılaştırılması
(1.Sürtünme kaynağı, 2.Elektrik direnç kaynağı)

Sürtünme kaynağında ısı, kaynak bölgesinde ve doğrudan kaynak edilecek parçaların yüzeyinde dağılır. Halbuki diğer kaynak yöntemlerinde, ısıнын önemli bir kısmı, kaynak yapımı için gerekli olandan daha geniş bir hacmin ısıtılmasının sonucu olarak kaybolur.

Sürtünme kaynağında, sürtünme ve dövme safhalarında malzeme kaybı minimum seviyededir ve sürtünme kaynağı malzeme tasarrufu açısından en ekonomik yöntem olarak kabul edilebilir.

Sürtünme kaynağında yüzey hazırlığı çok özel bir hazırlık gerektirmez ve işlem temiz olarak gerçekleşir, kaliteli bir kaynak dikişi elde edilir.

İşlem çok hızlı gerçekleştiğinden sürtünme kaynağı seri bir yöntem olarak kabul edilebilir.

Sürtünme kaynağında, kaynağın kalitesi üzerinde etkili olan kaynak parametrelerinin

kontrolü kolaydır, malzemenin cinsine ve boyutlarına göre belirlenip sapma olmadan uygulanabilir.

Sürtünme kaynağı, parçaların otomatik yüklenmesi, boşaltılması, diğer operasyonlara transferi gibi otomatik işlem kademelerine kolaylıkla uyum sağlayabilmektedir.

Sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan, kaynak bölgesinde herhangi bir cüruf ve kalıntı benzeri unsurlara rastlanmamaktadır.

İşlemin veriminin yüksek olmasının en önemli nedeni, eksenel yük, dönme hızı ve yığma miktarının kolaylıkla kontrol edilebilmesidir.

Bütün bu avantajların yanında sürtünme kaynağı, kaynak edilecek parçaların geometrisinin sınırlılığı, kaynak esnasında oluşan malzeme yığılmasının giderilmesi için fazladan işlem kademelerının gerekliliği ve yatırım maliyetinin yüksek oluşu gibi dezavantajlara sahip olmakla birlikte, üstün bir kaynak yöntemi olarak uygulama alanı bulmakta olan bir yöntemdir. Sürtünme kaynağının diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması Tablo 3.1.'de verilmiştir (Metals Handbook, 1983).

Tablo 3.1. Sürtünme kaynağının diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılması

KARŞILAŞTIRMA KONUSU	Sürtünme Kaynağı	Elektron Işın Kaynağı	Elektrik Direnç Kaynağı	Elektrik Arkı Manyetik Hareketli Kaynak
Kaynak yapılabilir malzeme	*	-	-	-
Kaynak yapılabilir kesit	*	-	-	-
Kaynak geometrisi	-	*	*	-
Parçanın hazırlanması	*	-	-	-
Kaynak metali yığılması	-	*	-	-
Malzemenin katkısı	-	*	-	*
Kaynak dikişine kesitin uyg.	*	-	-	-
İşlemin kontrolü	*	-	-	-
Yatırım maliyeti	-	-	*	-

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışmanın Amacı

Birçok makine elemanı çalışma esnasında tekrarlı yük ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Tekrarlı yükler altında çalışan makine elemanlarında belirli bir tekrar sayısından sonra yerel ve sürekli yapısal değişimler meydana gelmekte ve oluşan yorulma çatlakları kırılma ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca bu tip kırılmalar normal çalışma şartlarında aniden meydana geldiğinden ciddi problemlere neden olmaktadır.

Kaynaklı bağlantıların doğası kaynaklı yapıların yorulma davranışı oldukça karmaşık hale gelmektedir. Ergitme kaynağı yöntemlerinde genellikle, cüruf kalıntısı, gaz gözeneği ve nüfuziyet azlığı, kaynak eşiğinde ise, yanma oluğu gibi çentik etkisi yapan hatalar veya soğumadan kaynaklanan iç gerilmeler ortaya çıkabilmektedir. Bu çatlak benzeri hatalarda veya geometrik etkilerin oluşturduğu süreksizliklerde meydana gelen yüksek gerilmeler kaynaklı bağlantıların hasar süresince etkili olmaktadır.

Bu sebeple sürtünme kaynağı özellikle ısı ve mekanik özellikleri farklı metallerin birleştirilmesinde uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Çünkü, ergime olayının olmaması ya da sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve kaynak sonrası çok az iç gerilmeler içermesi nedeniyle önemli üstünlük sağlamaktadır. Konu ile ilgili yapılan literatür çalışmasında, farklı metallerin özellikle de paslanmaz çeliklerin sürtünme kaynağı ve hasar analizlerinin yeterli düzeyde incelendiği tespit edilmiştir.

Belirtilen bu gerekçelerden hareketle, bu çalışmada ferritik (AISI 430), martenzitik (AISI 440) ve östenitik (AISI 304) paslanmaz çeliklerin AISI 4340 çeliğiyle, sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilebilirlikleri ve kaynaklı numunelerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır..

4.2. Kullanılan Malzemeler

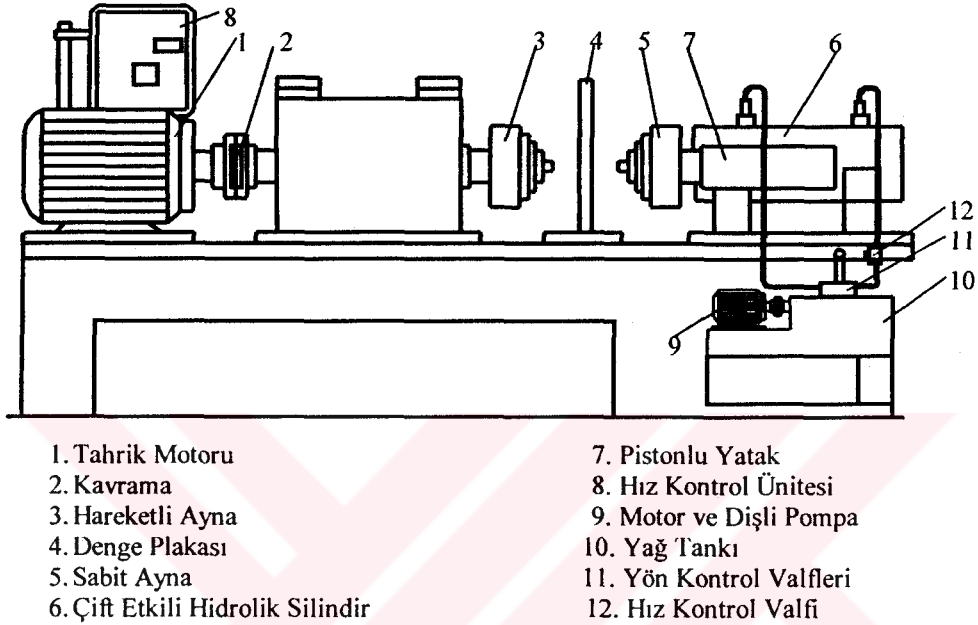
Deney çalışmalarında, Tablo 4.1'de kimyasal bileşimleri verilen AISI 4340 çeliği ile östenitik, martenzitik ve ferritik paslanmaz çelikler kullanılmıştır. Malzemeler sanayiden temin edilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri (%Ağırlık)

Malzeme	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
AISI 4340	0,425	0,343	0,692	0,014	0,007	<5,00	1,461	0,220
Östenitik (AISI 304)	0,033	0,480	1,324	0,037	0,005	19,500	7,370	0,313
Martenzitik (AISI 440)	0,102	0,582	1,426	0,030	-	17,110	<5,00	0,222
Ferritik (AISI 430)	0,135	0,568	1,278	0,018	-	16,860	<5,00	0,202

4.3. Sürtünme Kaynağı Deneyleri

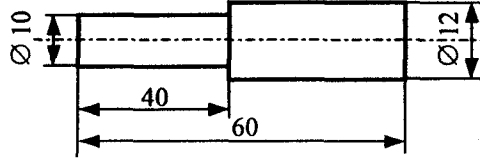
Sürtünme kaynağı deneyleri, doktora çalışması için Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü atölyesinde imal edilmiş sürekli tahrikli sürtünme kaynağı deney düzeneğinde yapılmıştır. Deney düzeneği sistemi, bir torna tezgahı gövdesi üzerine çeşitli mekanik, hidrolik ve elektronik aksamalar ilave edilerek, sürekli tahrikli kaynak makinesine dönüştürülerek imal edilmiştir. (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi şematik resmi (Özdemir, 2002)

Deney düzeneğinde 11.1 Kw'lık SIMENS marka MİDİ VEKTÖR invertör, dönerli torna aynasını kumanda eden, tahrik motoru, 0–5 V arası DC gerilime sahip hız kontrol cihazı potansiyometresi tarafından kontrol edilmektedir. Sistem çalışır durumda iken, hız kontrol cihazı lineer potansiyometresi minimum (0V) değerinden (5V) değere kadar belirli aralıklar ile artırılarak, bu değerlere karşılık gelen motor devri bir dijital takometre yardımıyla okunmaktadır. Sürtünme ve yığma basıncı, eksenel basınç kuvvetinin uygulanmasında kullanılan hidrolik devre üzerindeki basınç kontrol göstergesi ve hız kontrol valfi yardımıyla analog olarak kontrol edilmektedir. Sürtünme kaynağında önemli bir parametre olan frenleme ve frenleme süresi, invertör üzerinden tahrik motoruna DC gerilim uygulanarak kontrol edilmektedir

Sürtünme kaynağı deneylerinde, Tablo 4.1.'de bileşimleri verilen AISI 4340 çeliği ile östenitik, martenzitik ve ferritik paslanmaz çelikler birleştirilmiştir. Şekil 4.2'de ölçüleri verilen numuneler CNC torna tezgahında işlenerek sürtünme kaynağı için hazır hale getirildi.

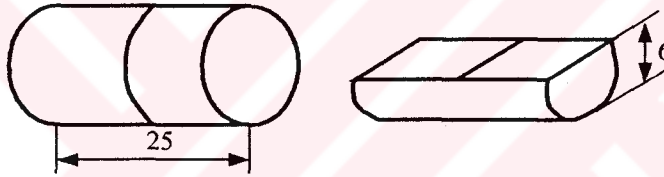


Şekil 4.2 Sürtünme kaynak numunesi

Kaynak işlemlerinde, verilen sürtünme süresi ($t_1=6$ sn), sürtünme basıncı ($P_1=30$ Mpa), yığma süresi ($t_2=3$ sn) ve yığma basıncı ($P_2=50$ Mpa) sabit tutulmuş, dönme hızı (n) parametresi 1500, 1700 ve 2000 d/d olarak değiştirilmiştir.

4.4. Metalografik İncelemeler

Kaynak sonrası birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikleri belirlemek için, birleşme arayüzeyine dik doğrultuda, toplam 25 mm boyunda ve dairesel kesitin orta ekseninden frezede işlenerek merkezdeki yapıya ulaşılabilmek için numune yüzeyleri düzlem hale getirilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Metalografik muayene numunesi şekli

Bu işlem, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde bulunan dikey işleme merkezli CNC Freze tezgahında yapılmıştır. Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşabilecek ısınma sonucu kaynak bölgesindeki iç yapının etkilenmemesi için numuneler, düşük devirde ve soğutularak frezeleme işlemine tabi tutuldu. Numunelerin frezelenmiş kesitleri sırasıyla 60, 120, 240, 600, 800, 1200 meşlik zımpara ile zımparalandıktan sonra, 3 μm 'lik elmas pasta ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirildi. Dağlama işleminde AISI 4340 çeliği için %2 nitrat, östenitik çelik için %10 HCl, martenzitik ve ferritik paslanmaz çelikler için 1gr pikrik asit, 5ml HCl, 100ml etanol karışımı kullanılmıştır. Paslanmaz çelikler elektrolitik olarak dağlama işlemine tabi tutuldu.

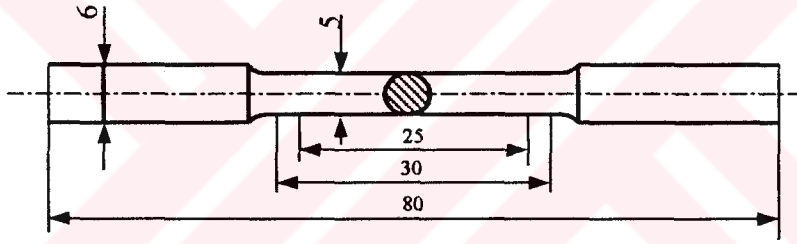
Metalografik incelemeler, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarında bulunan JEOL JMS 6400 SEM marka SEM mikroskobu ile yapılmıştır ve EDX analizleri alınmıştır. Optik mikroskop çalışmaları ise Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde yapılmıştır.

4.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan, Anton Paar & Paar Physrea MHT-10 Microhardness Tester marka mikrosertlik cihazında, 136° lik tabanı kare olan piramit uç kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler, numunelere 10 gr yük uygulanarak, numunelerin tam orta ekseninden ve kaynak kesitine dik olacak şekilde bir hat üzerinden belirlenen aralıklarda yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümü yapılacak numunelerin yüzeylerinin metalografik olarak hazırlanması gerektiğinden, bu ölçümlerde de daha önce SEM ve optik mikroskopunda incelenmek için hazırlanan parlatılıp dağlanan numuneler kullanılmıştır.

4.6. Çekme Deneyi

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelere soğuk çekme testi uygulandı. Çekme numuneleri TSE standartlarına uygun olarak, Şekil 4.4'de verilen ölçülerde CNC torna tezgahında hazırlandı. Çekme deneyleri, 50 kN'luk yük kapasitesine sahip Hti HOUNSFİELD marka çekme cihazında yapılmıştır. Her deney için iki numune kullanılarak ortalaması alınmış ve çekme diyagramları hazırlanmıştır.



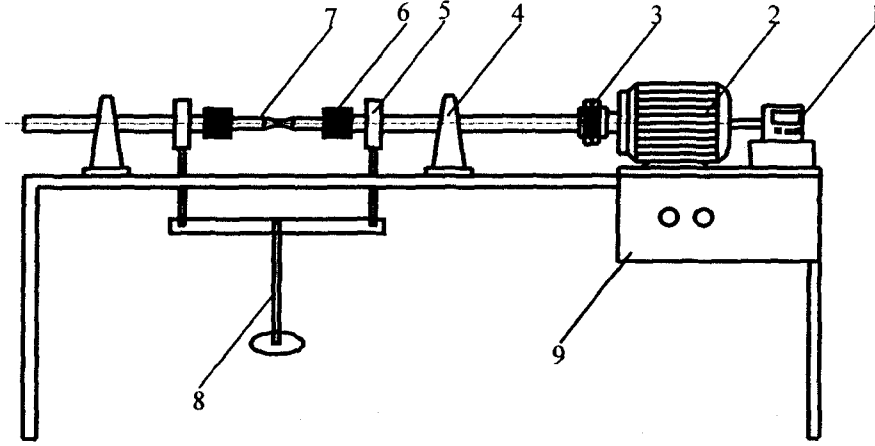
Şekil 4.4 Soğuk Çekme Numunesi.

4.7. Dönerek Eğmeli Yorulma Deneyleri

Dönerek Eğmeli Yorulma Cihazı, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde tarafımızdan imal edilmiştir (Şekil 4.5). Cihaz; hareket iletimi, yük askı sistemi ve devir ölçüm sisteminden oluşmaktadır. Cihaz üç fazlı, 380 volt gerilimli, 0.75 KW gücünde ve 2780 d/d ile dönebilen bir elektrik motoru ile tahrik edilmekte, ayrıca tahrik mili, kavrama, oynak bilyalı yatak, numune tutucu, yük askısı ve turmetreden oluşmaktadır.

Elektrik motorundan alınan döndürme momenti, kavrama vasıtası ile numune üzerine aktarılmaktadır. İki taraftan uygulanan kuvvet ile numune eğme gerilmesine maruz kalmaktadır. Numune kırıldığı zaman otomatik olarak sistem kapanmaktadır. Numune üzerine gelen eğme

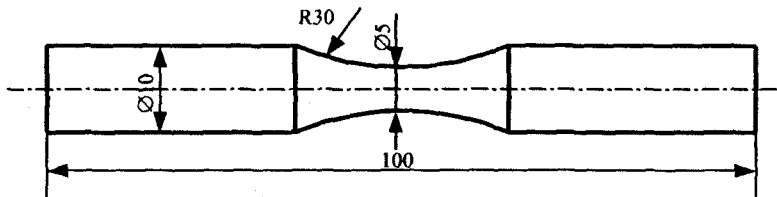
gerilmesinin büyüklüğü yük askısına asılan standart ağırlıklarla belirlenmektedir. Yorulma sonucu meydana gelen kırılmanın ne kadarlık bir çevrim miktarında meydana geldiği motor kuyruk miline bağlı turmetreden okunmaktadır.



- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. Turmetre | 6. Numune Tutucu |
| 2. Tahrik Motoru | 7. Numune |
| 3. Kavrama | 8. Yük Askısı |
| 4. Sabit Yatak | 9. Kontrol Paneli |
| 5. Hareketli Yatak | |

Şekil 4.5 Dönerek eğmeli yorulma cihazının şematik resmi.

Yorulma deneylerinde kullanılan numuneler sürtünme kaynağı ile birleştirildikten sonra TS ISO 1143 standart ölçülerinde CNC torna tezgahında işlenmiştir. Kullanılan numuneler toroit şeklinde olup boyutları Şekil 4.6’da verilmiştir. Yorulma deneylerinde her deney için sekiz adet numune kullanılmış ve 2×10^6 çevrim sayısına kadar deneylere devam edilmiştir.



Şekil 4.6 Dönerek eğmeli yorulma deney numunesi.

5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

5.1. Çekme Deneyi Sonuçları

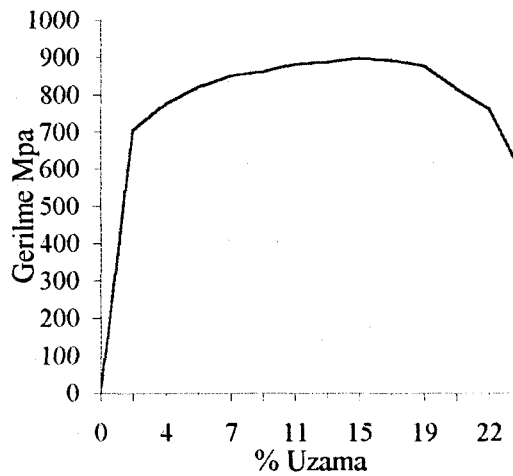
Deneylerde kullanılan numunelerin kaynak sonrası mekanik özelliklerini tespit etme amacıyla soğuk çekme testleri yapılmıştır. Bu testlerden elde edilen $\sigma - \epsilon$ eğrileri Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5’de, çekme, akma gerilmesi ve % uzama değerleri Tablo 5.1.’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – Paslanmaz Çeliklerin çekme deneyi değerleri.

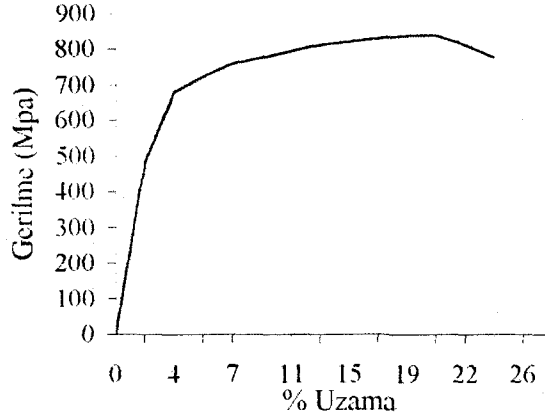
Malzeme	Akma gerilmesi σ_a (N/mm ²)	Çekme gerilmesi σ_{ϵ} (N/mm ²)	% Uzama ϵ
AISI 4340-304 1500 d/d	728	896	24
AISI 4340-304 1800 d/d	595	838	24
AISI 4340-304 2100 d/d	719	822	22
AISI 4340-440 2100 d/d	315	521	6
AISI 4340-430 2100 d/d	403	579	5

AISI 4340 ile birleştirilen AISI 304 paslanmaz çeliklerin çekme testi sonucunda, her üç numunede de belirgin bir akma noktası göstermeksizin sünek koptukları görülmüştür (Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3).

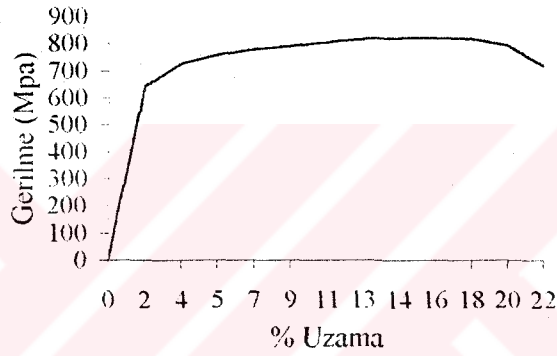
1500 d/d ile birleştirilen AISI 304 paslanmaz çeliğinin çekme gerilmesi 896 N/mm², 1800 d/d birleştirilen numunede 838 N/mm² ve 2100 d/d ise 822 N/mm² olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.1 1500 d/d’de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin çekme eğrisi.



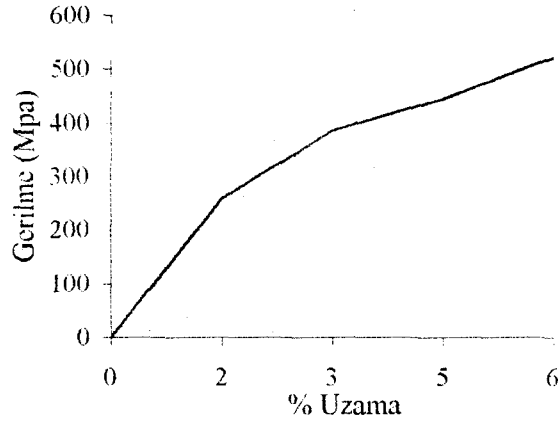
Şekil 5.2 1800 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin çekme eğrisi.



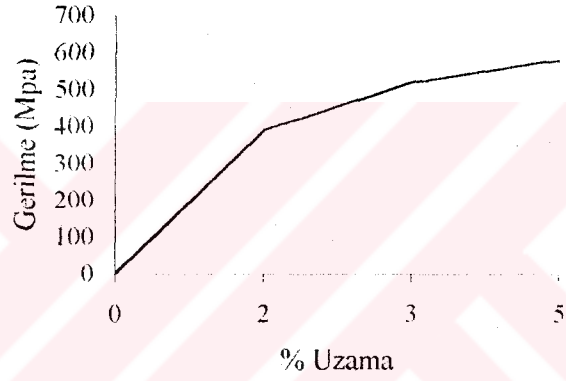
Şekil 5.3 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin çekme eğrisi.

AISI 304 – AISI 4340 çiftinin farklı devir sayılarında birleştirilen her üç numunesinde de kopmanın birleşme bölgesine yakın AISI 304 paslanmaz çeliğin ısıdan etkilenen ince taneli bölgesinde meydana geldiği gözlenmiştir.

AISI 4340 ile birleştirilen AISI 440 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerin çekme testi sonucunda, her iki numunede de belirgin bir akma noktası göstermeksizin gevrek koptukları görülmüştür (Şekil 5.4 ve 5.5). Birleştirilen AISI 440 paslanmaz çeliğin çekme gerilmesi 521 N/mm² ve AISI 430 paslanmaz çeliğin çekme gerilmesi 579 N/mm² olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.4 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 440 çiftinin çekme eğrisi.

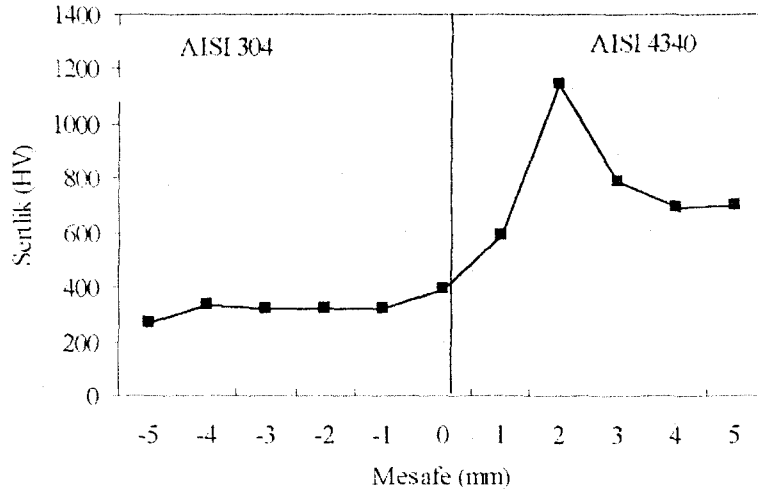


Şekil 5.5 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 430 çiftinin çekme eğrisi.

Elde edilen çekme testi sonuçları incelendiğinde; 2100 ile 1800 d/d yapılan birleştirmeye göre 1500 d/d birleştirilen AISI 304 paslanmaz çeliğin çekme gerilmesinin daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. AISI 440 ve AISI 430 paslanmaz çelikler de kopma kaynak bölgesine yakın, paslanmaz çelik tarafında gerçekleşmiştir.

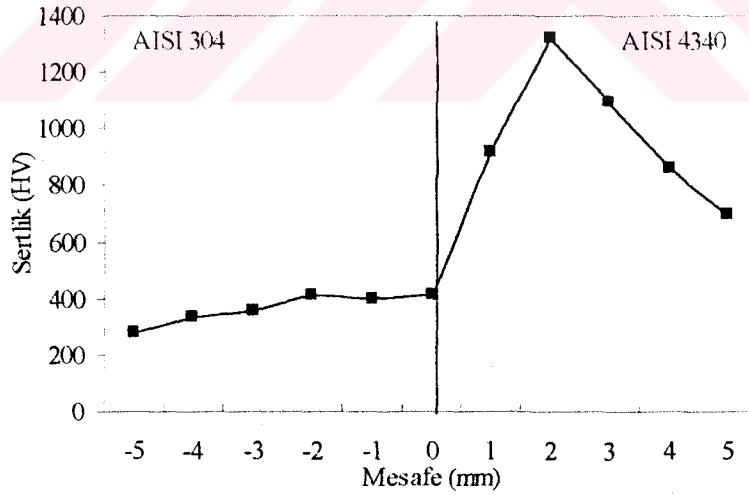
5.2. Mikrosertlik Ölçümleri

Sürtünme kaynağıyla birleştirilen numunelerin birleşme bölgesindeki mikrosertlik değerleri Tablo 5.2.'de sertlik dağılımları Şekil 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11'de verilmiştir. Şekillerin sağ tarafları AISI 4340 çeliğini, sol tarafları ise paslanmaz çeliklerin sertlik değerlerini göstermektedir.

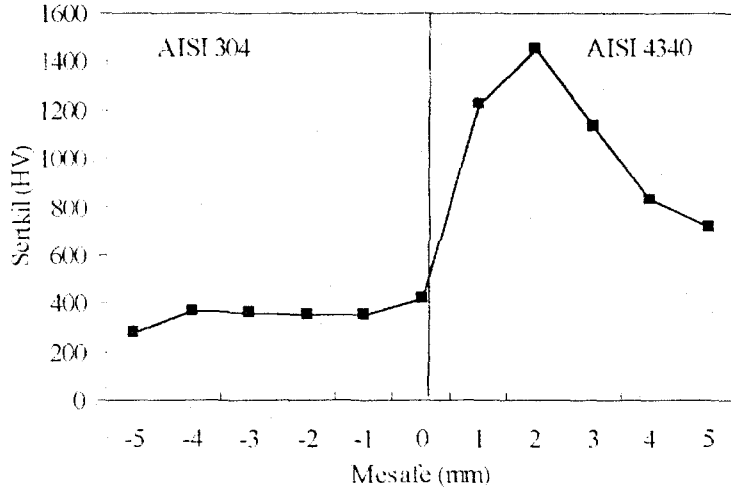


Şekil 5.6 1500 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin mikrosertlik dağılımı.

Sürtünme kaynağı sonrası AISI 4340 – AISI 304 1500 d/d birleştirilen numunenin birleşme bölgesi üzerinde yapılan mikrosertlik taraması sonucu elde edilen grafiğe göre AISI 304 paslanmaz çelik tarafında sertliğin 275 HV den 425 HV doğru arttığı Şekil 5.6'da görülmektedir. Kaynak çizgisinden hemen sonra AISI 4340 çeliğinin ısıdan etkilenen bölgesinin 2,5mm olduğu ve bu bölgede sertlik değerlerinin 587 HV den 1150HV yükselmesi; soğuma ve deformasyondan dolayı yapının martenzit ağıdan oluştuğunu göstermektedir. Ana malzemede ise sertlik değeri 700 HV olduğu tespit edildi.



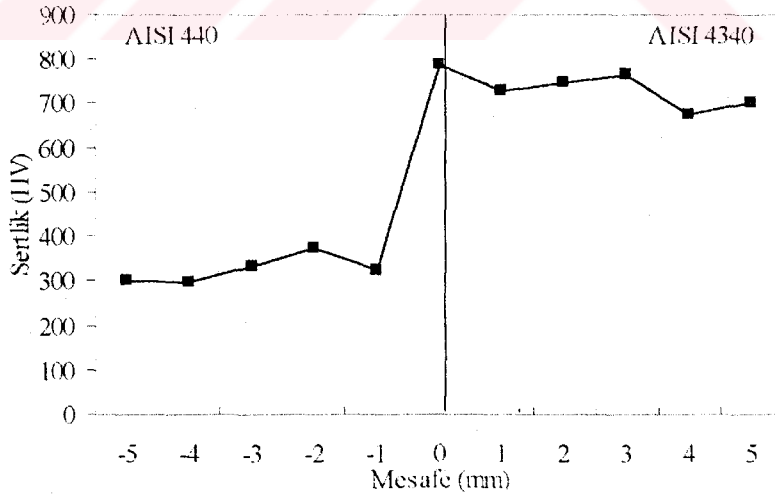
Şekil 5.7 1800 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin mikrosertlik dağılımı.



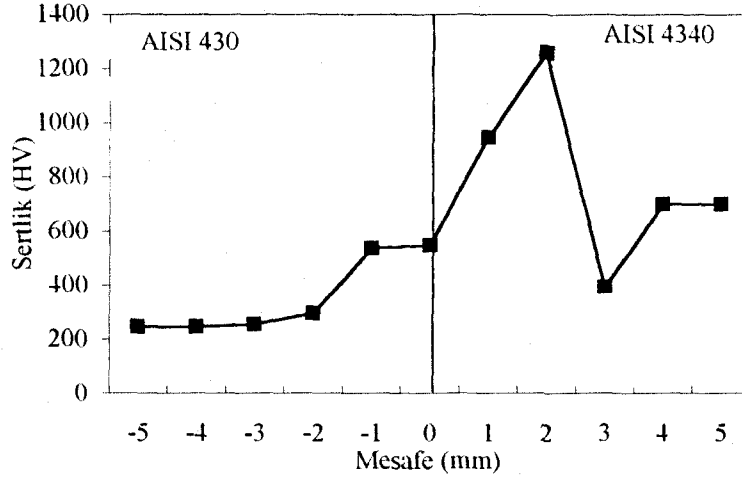
Şekil 5.8 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin mikrosertlik dağılımı.

1800 d/d birleştirilen AISI 304 – AISI 4340 çiftinde belirlenen sertlik değerleri 1500 d/d ile birleştirilen numuneye göre daha yüksektir. Devire bağlı olarak 2100 d/d ile birleştirilen AISI 304 paslanmaz çeliğin en yüksek sertlik değerlerinde olması artan devir sayısı ile taşan malzeme miktarının arttığı ve buna bağlı olarak da yığılma bölgesinin daraldığını göstermektedir. Bu numunede kaynak sonrası 2,5 mm'lik bir boy kısalması bu fikri doğrulamaktadır.

AISI 4340 – AISI 440 paslanmaz çelik kaynağında ise paslanmaz çeliğin sertlik değerlerinin ana malzemeden kaynak ara yüzeyine gidildikçe 303 HV – 375 HV'ye yükseldiği AISI 4340 çeliğinde ise, birleşme ara yüzeyine yakın bir bölgede 787 HV'ye kadar arttığı görülmüştür.



Şekil 5.9 2100 d/d'da sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 440 çiftinin mikrosertlik dağılımı.

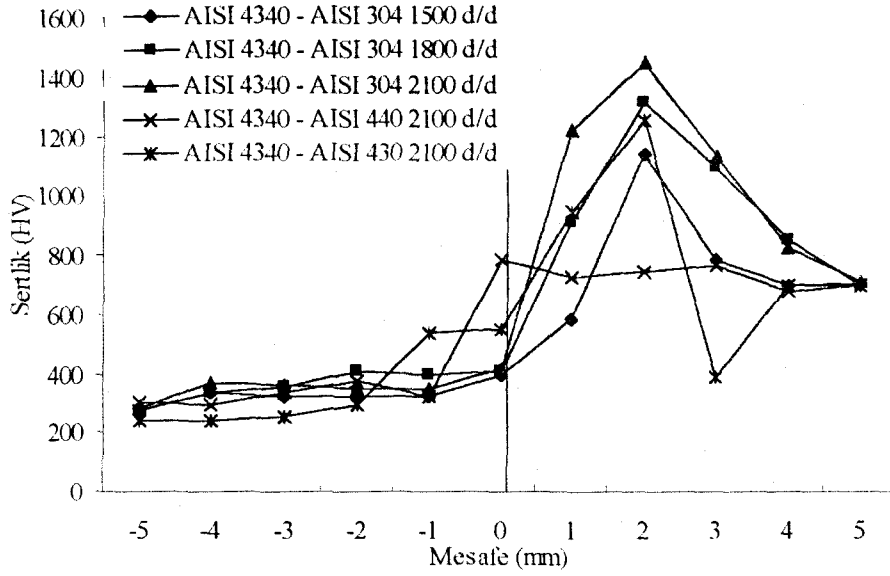


Şekil 5.10 2100 d/d'de sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – AISI 430 çiftinin mikrosertlik dağılımı.

Bütün numunelerden alınan sertlik değerlerinin aynı karakteristiği gösterdiği Şekil 5.11'de görülmektedir. Her numunede maksimum sertliğin AISI 4340 çeliğinin ısıdan etkilenmiş bölgesinin ana metale doğru takriben 2 mm'lik kısmında oluşmasında kromkarbürlerin etkili olduğu Tablo 5.1.'de görülmektedir. Ayrıca AISI 4340 çeliğinde kaynak esnasında oluşan en yüksek sıcaklığın ara bölgeden 2 – 3 mm ilerisinde ani ısınma ve soğuma ile martenzit oluşumu ve deformasyonunda sertleşmede etkili olduğu söylenebilir. Birleşme bölgesindeki sertlik artışı, AISI 440 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerde AISI 304 paslanmaz çeliğine nazaran daha yüksek görülmektedir. Bu durum AISI 440 ve AISI 430 çeliklerinin daha yüksek deformasyon sertleşmesi göstermesine ve ani soğumanın etkisine bağlanabilir.

Tablo 5.2. Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – Paslanmaz Çeliklerin mikrosertlik değerleri.

Mesafe (mm)	AISI 304 1500 d/d	AISI 304 1800 d/d	AISI 304 2100 d/d	AISI 440 2100 d/d	AISI 430 2100 d/d
-5	273	278	283	303	245
-4	338	337	369	295	245
-3	321	355	362	334	253
-2	321	412	349	375	295
-1	321	397	349	326	537
0	397	412	420	787	549
1	587	917	1221	728	946
2	1145	1319	1449	747	1258
3	784	1097	1134	766	393
4	696	857	828	676	700
5	703	700	710	700	700

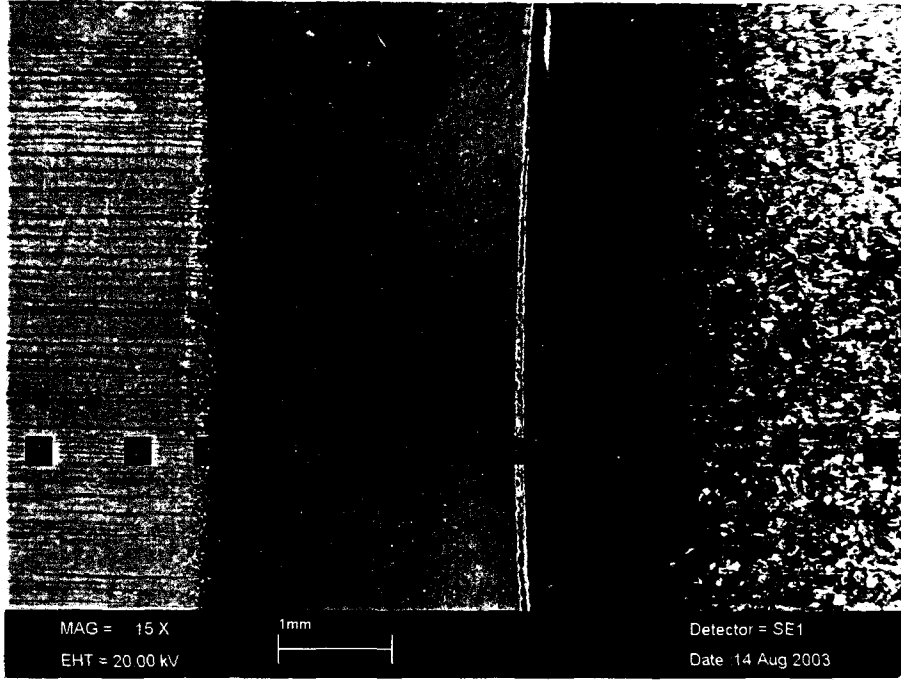


Şekil 5.11 Sürtünme kaynağıyla birleştirilen AISI 4340 – Paslanmaz Çeliklerin mikrosertlik dağılımı.

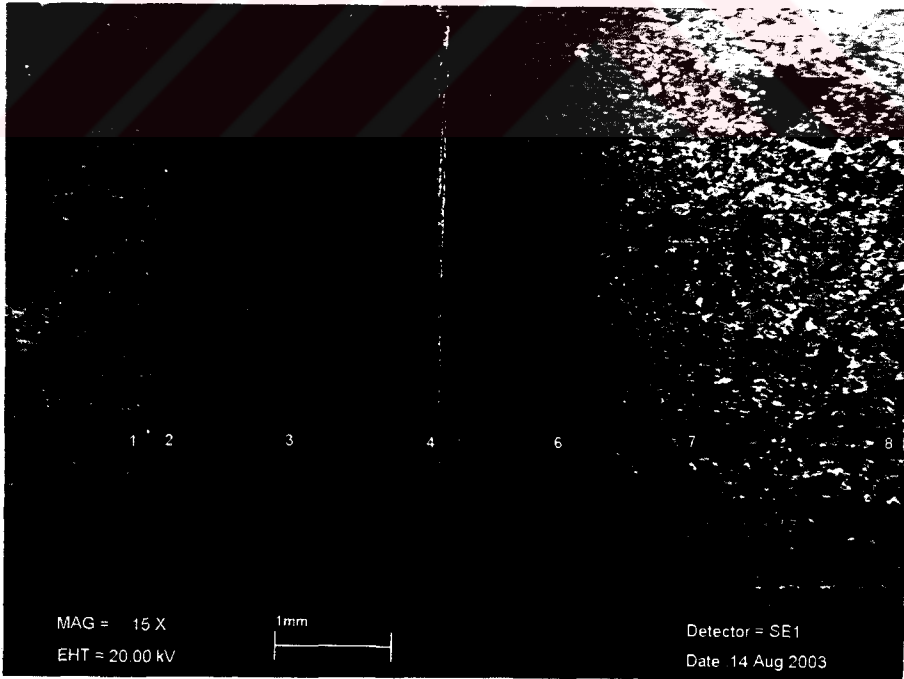
5.3. Metalografik İncelemeler

AISI 4340 çeliği ile birleştirilen AISI 304 (1500, 1800 ve 2100 d/d), AISI 430 (2100 d/d) ve AISI 440 (2100 d/d) paslanmaz çeliklerin kaynak sonrası birleşme arayüzlerini gösteren mikroyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 ve 5.16'da verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi bütün numune çiftlerinde tam bir birleşme gerçekleşmiştir. Şekillerde ortak özellik olarak ana malzeme, birleşme arayüzeyi ve ısıdan etkilenen bölgeler görülmektedir. AISI 304 paslanmaz çelikli birleştirmelerde devir sayısının artmasıyla dışarıya taşan malzeme miktarı artmakta ve buna bağlı olarak AISI 4340 çeliği tarafında sıcaklığın artmasıyla ısıdan etkilenen bölgenin daraldığı görülmektedir. Daralan bu bölgede sürtünme ve yığmanın etkisiyle oluşan yumuşama neticesinde meydana gelen viskoz davranışının etkisi görülmektedir. Bu bölgede taneler haddeleme izlerine dik doğrultuda yönlendiği görülmektedir.

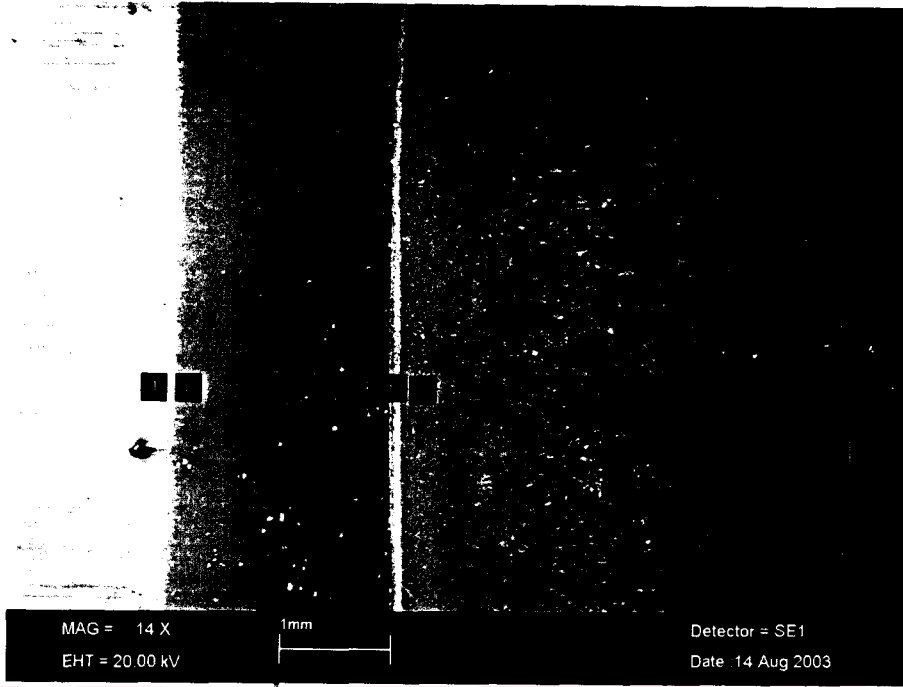
Bütün numune çiftlerinde, AISI 4340 çeliğinde ana yapıya hakim olan perlitik yapı iken, kaynak ara bölgesine doğru ısı ve deformasyonun etkili olduğu bölgede martenzit fazının oluştuğu görülmektedir. (Şekil 5.17., 5.18., 5.19., 5.20. ve 5.21.)



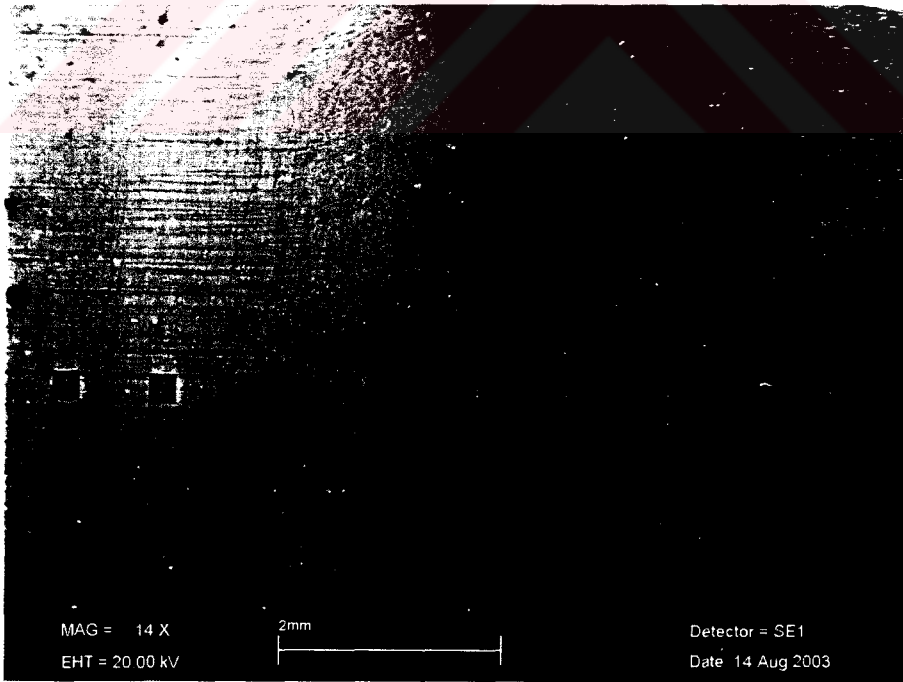
Şekil 5.12 1500 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.



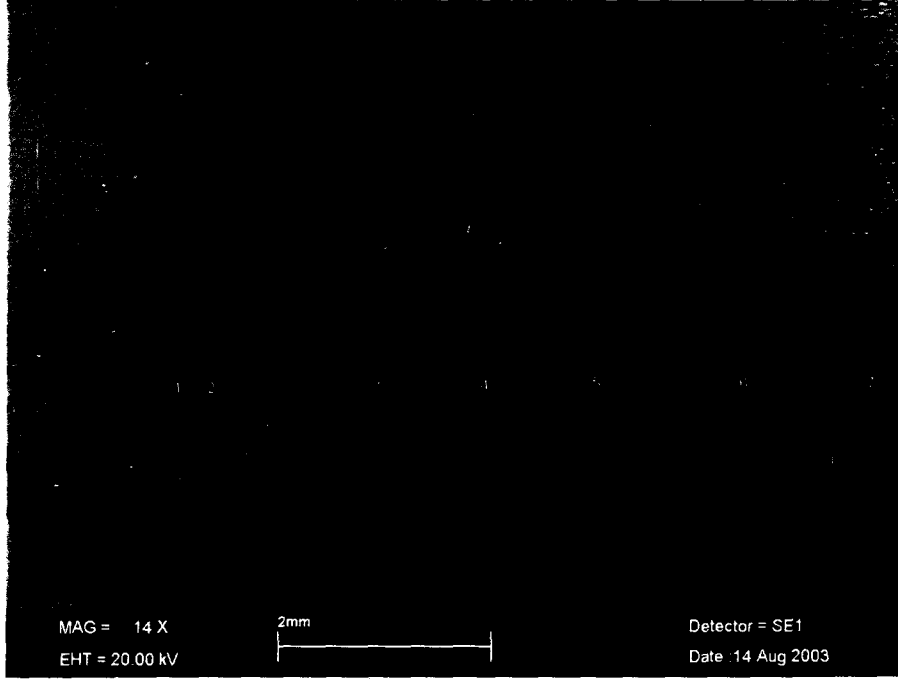
Şekil 5.13 1800 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.



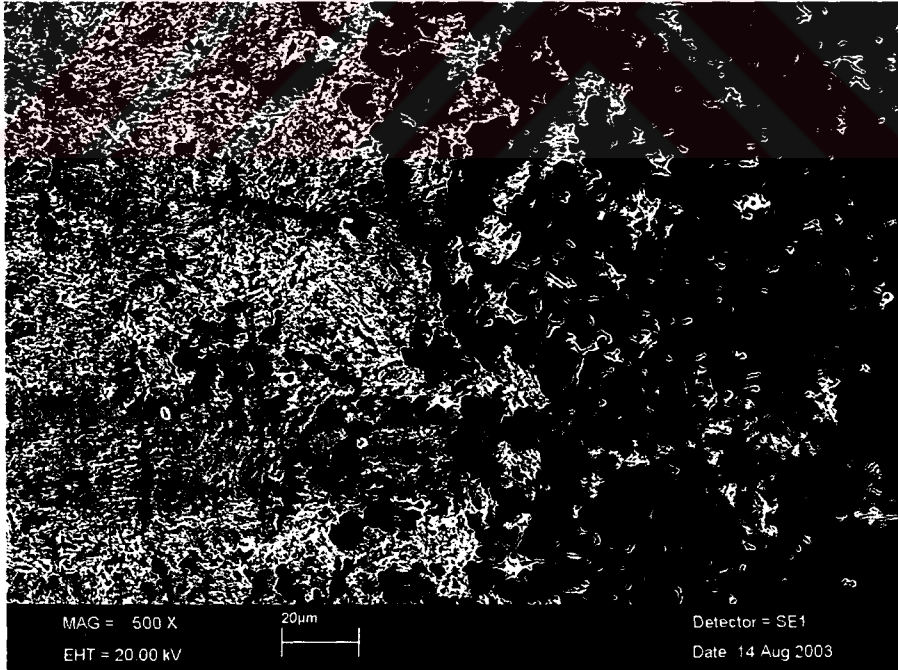
Şekil 5.14 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.



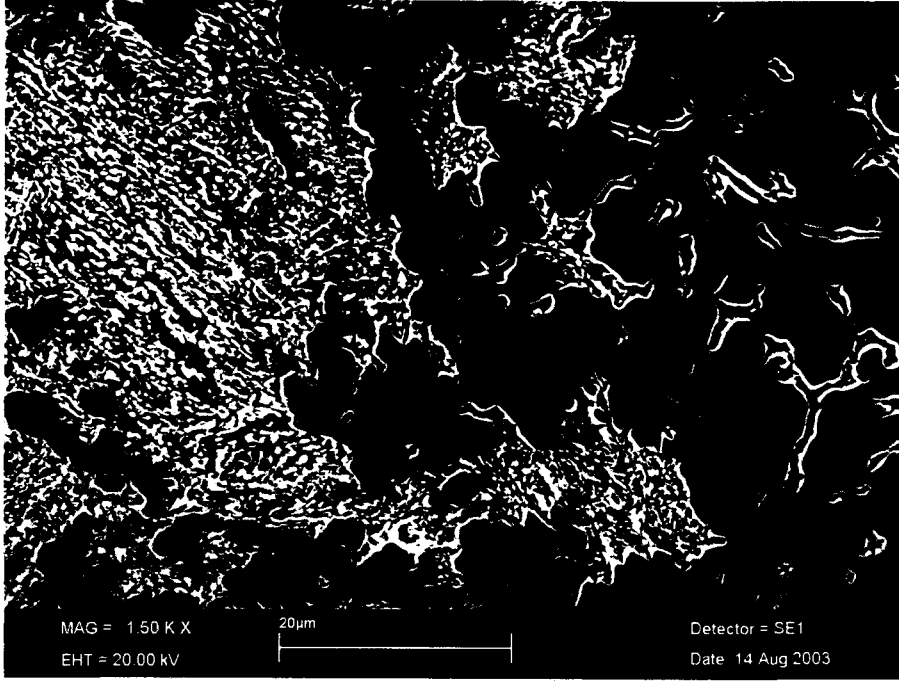
Şekil 5.15 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 440 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.



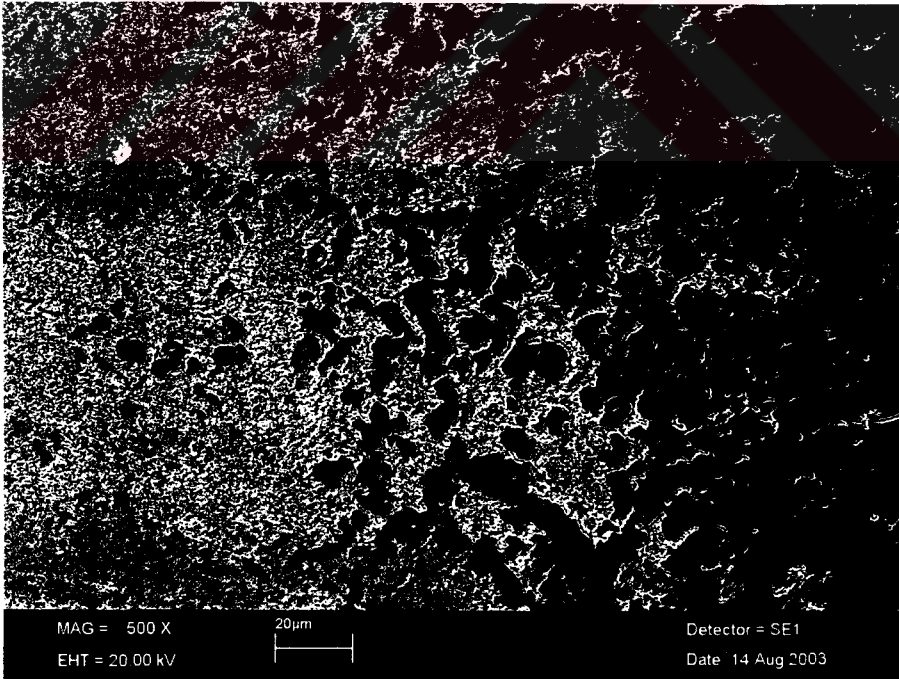
Şekil 5. 16 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 430 kaynaklı numunenin birleşme bölgesi SEM fotoğrafı.



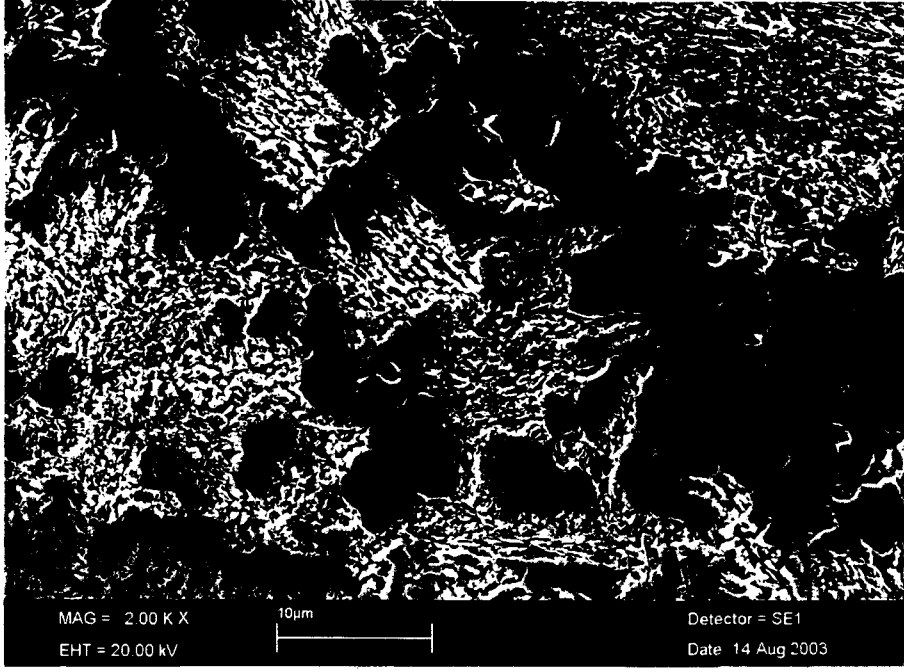
Şekil. 5.17 1500 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme – ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.
(Şekil 5.12'den 3. bölge.



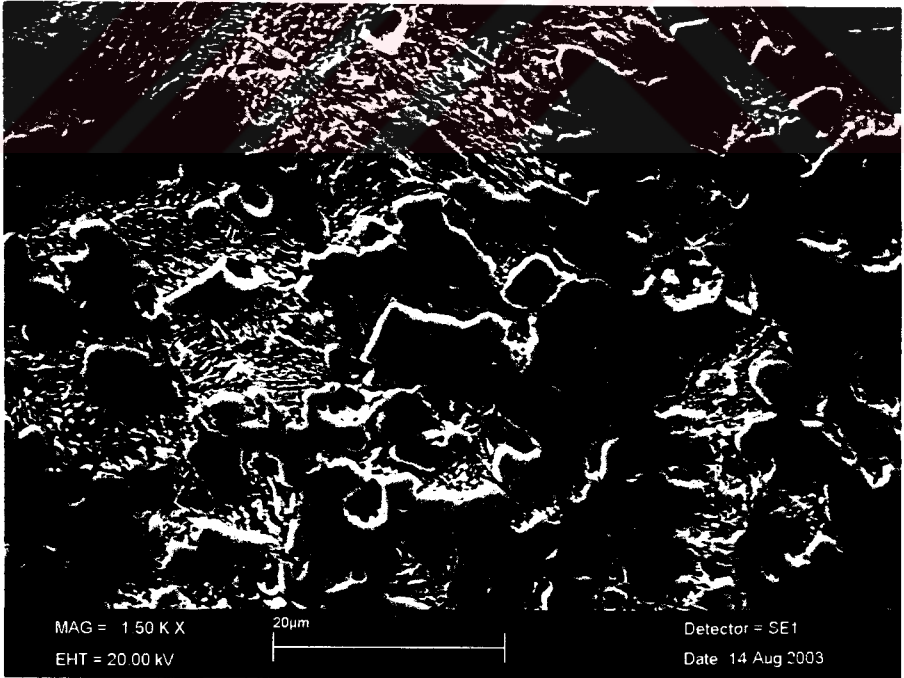
Şekil 5.18 1500 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme-ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.12'den 3. bölge).



Şekil 5.19 1800 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme – ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.13'den 1- 2 bölge arası).



Şekil 5.20 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme – ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.14'den 1-2. bölgeler arası).

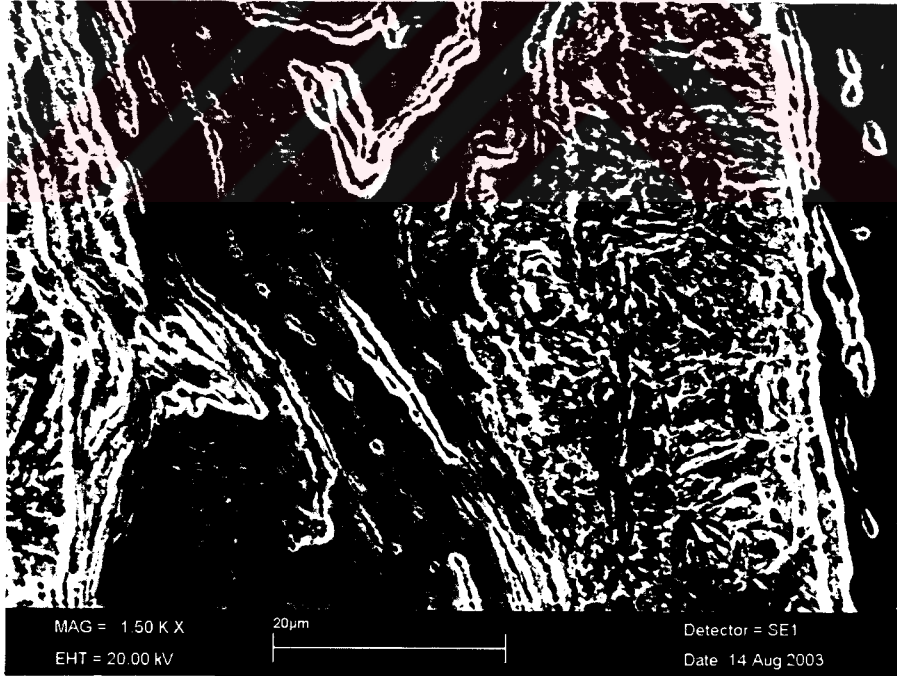


Şekil 5.21 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 430 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme – ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.16'den 1-2. bölgeler arası).

Şekil 5.22 ve 5.23’de farklı devir sayılarında birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinin, Şekil 5.24’de AISI 4340 – AISI 440 çiftinin, Şekil 5.25’de AISI 4340 – AISI 430 çiftinin ana bölgelerinin mikroyapı fotoğrafları verilmiştir.

Şekillerde de görüldüğü gibi, kaynak ara bölgesinden AISI 4340 çeliği tarafına takriben 20 µm içerde oluşan sıcaklığın ve yığılma basıncının etkisiyle malzemenin aktığı ve sarmal bir yapı elde edildiği görülmektedir. Ayrıca AISI 304 paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde, bu malzemenin plastik deformasyon yeteneğine bağlı olarak, yığılma basıncının etkisiyle aşırı deformasyondan dolayı kayma bantları belirgin bir şekilde görülmektedir. Deformasyonun etkili olduğu bölgeden uzaklaştıkça bu kayma bantlarının yoğunluğu azalmaktadır (Şekil 5.26., 5.27. ve 5.28.). östenitik çeliklerle ilgili diğer bir özellik de Şekil 5.29.’da görüldüğü gibi, kaynak ara bölgesinde karbürlerin teşekkül etmesidir. EDAX analizlerinde de görüleceği üzere artan devir sayılarında bu bölgede Cr oranının azaldığı ve muhtemelen karbürlerin oluştuğu düşünülmektedir.

Şekil 5.30. ve 5.31.’de sırasıyla AISI 4340-AISI430 ve AISI 4340-AISI440 çiftlerinin ısıdan etkilenen bölgeden alınan mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi deformasyonun etkisiyle küçük taneli bir yapı teşekkül etmiştir.



Şekil 5.22 1500 d/d’de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.12.’den 6. bölge).

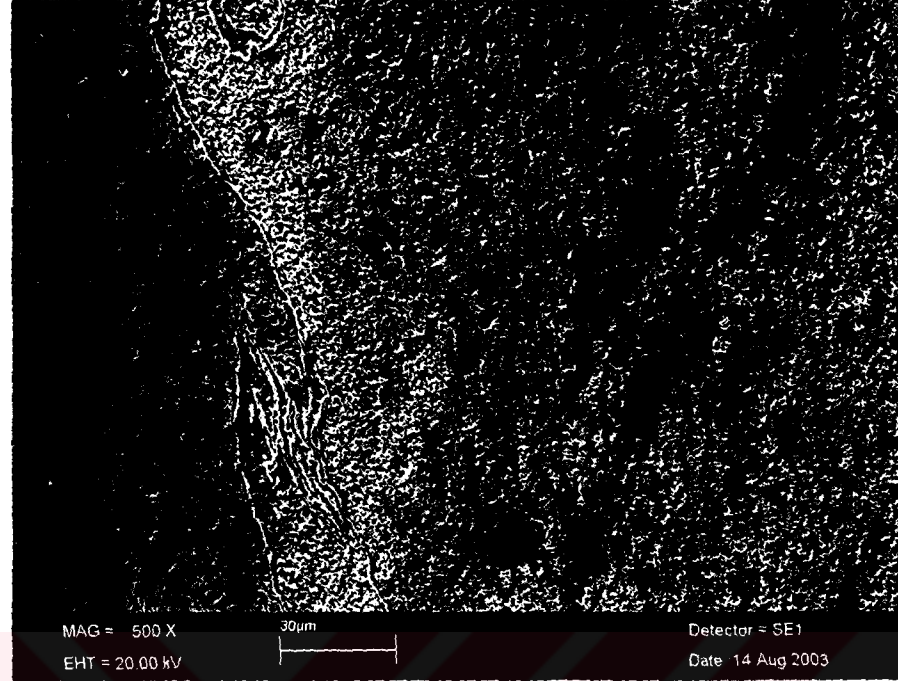


Şekil 5.23 1800 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.13.'den 4-5. bölgeler arası).

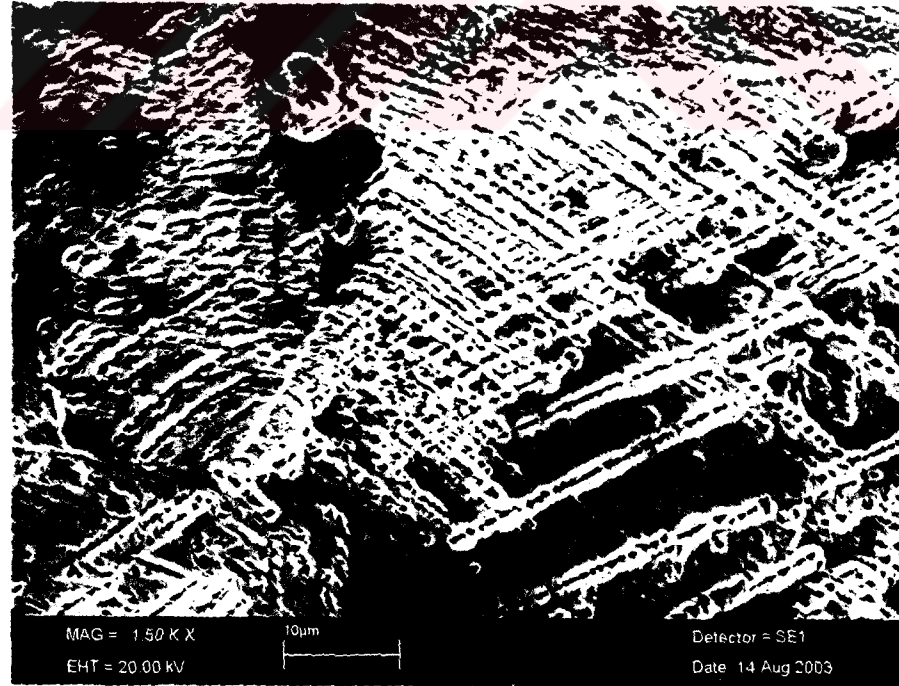


Şekil 5.24 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 440 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.15.'den 4. bölge).

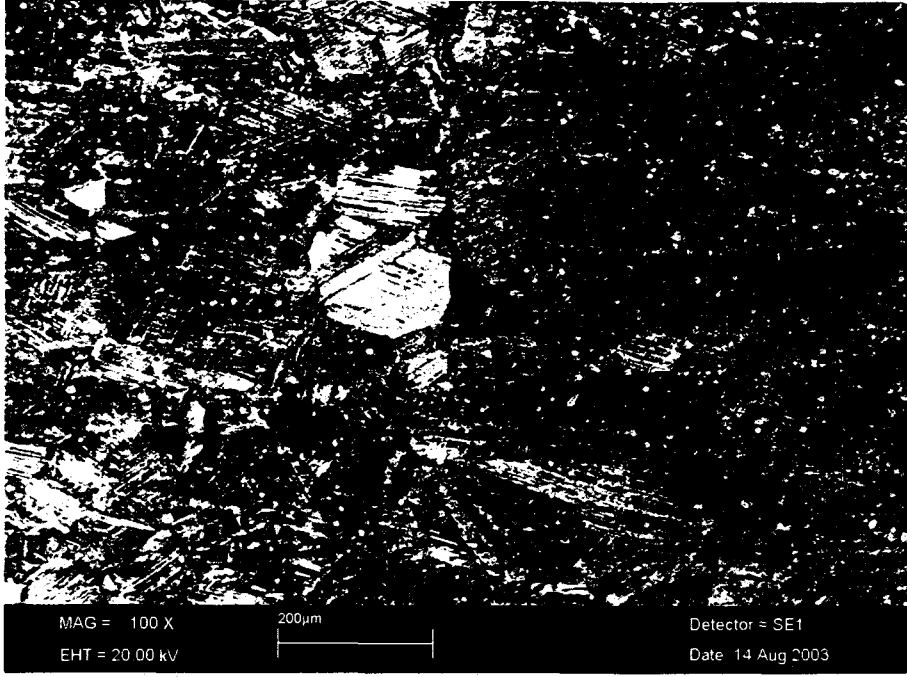
T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ



Şekil 5.25 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 430 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi SEM fotoğrafı (Şekil 5.16.'dan 4. nokta).



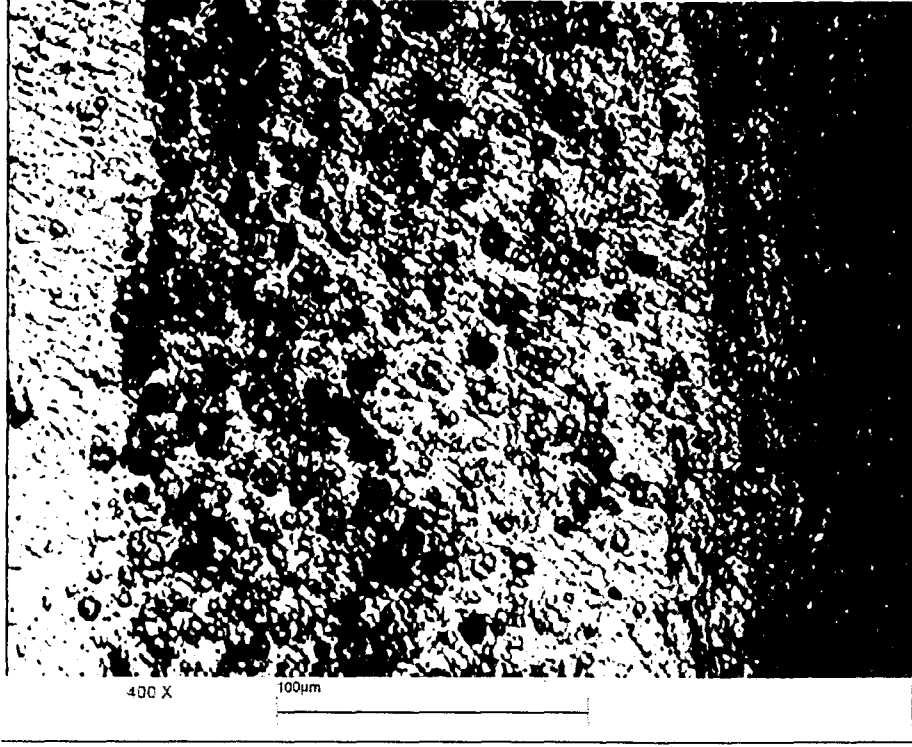
Şekil 5.26 1500 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 304 çeliğinde oluşan kayma bantları SEM fotoğrafı (Şekil 5.12.'den 8-9. bölgeler arası).



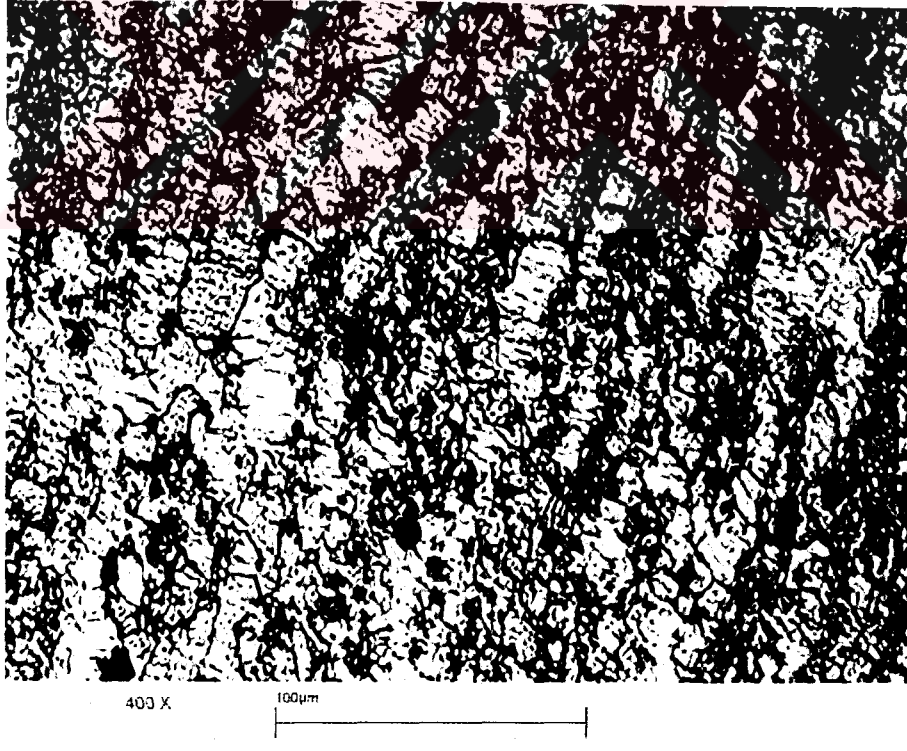
Şekil 5.27 1500 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 304 ana metal – ısıdan etkilenmiş bölge SEM fotoğrafı (Şekil 5.12.'den 8-9. bölgeler arası).



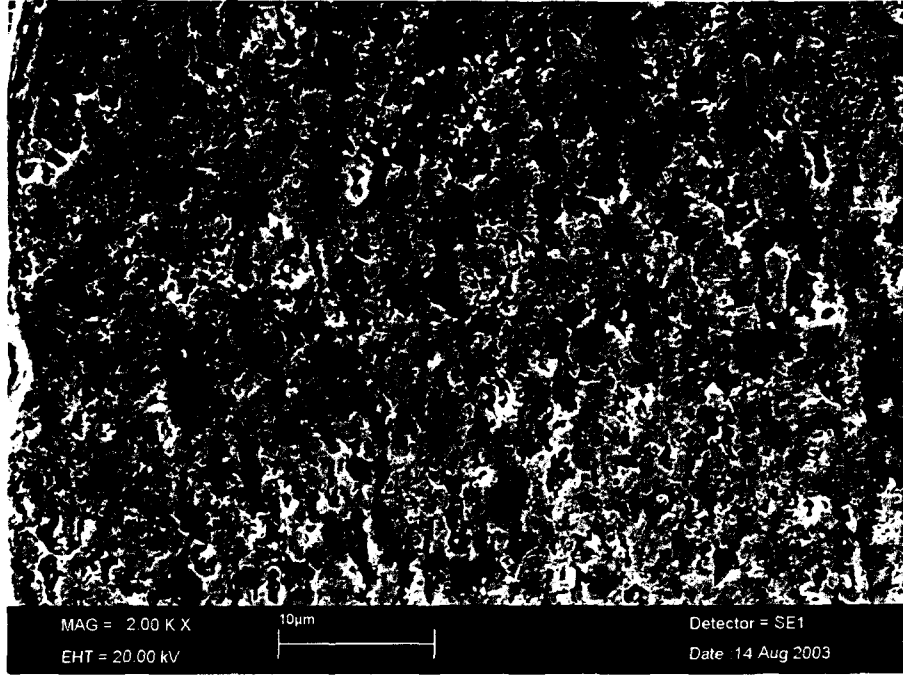
Şekil 5.28 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 304 kaynaklı numunenin AISI 4340 kısmındaki tanelerin yönlenmesini gösteren optik fotoğrafı.



Şekil 5.29 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 304 kaynaklı numunenin kaynak ara bölgesi optik fotoğrafı



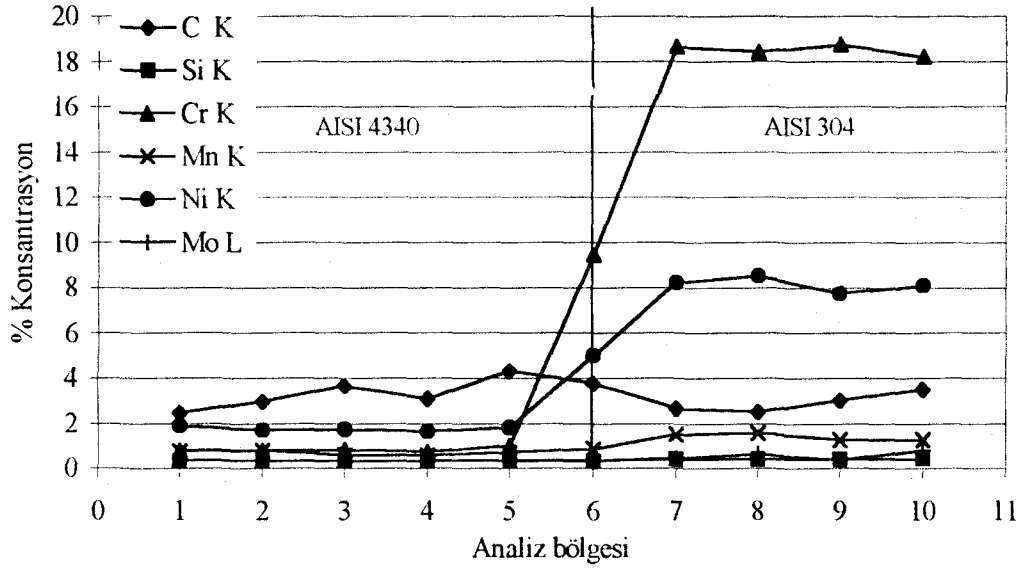
Şekil 5.30 2100 d/d'de AISI 4340 - AISI 430 kaynaklı numunenin AISI 430 ısıdan etkilenmiş bölgesi optik fotoğrafı.



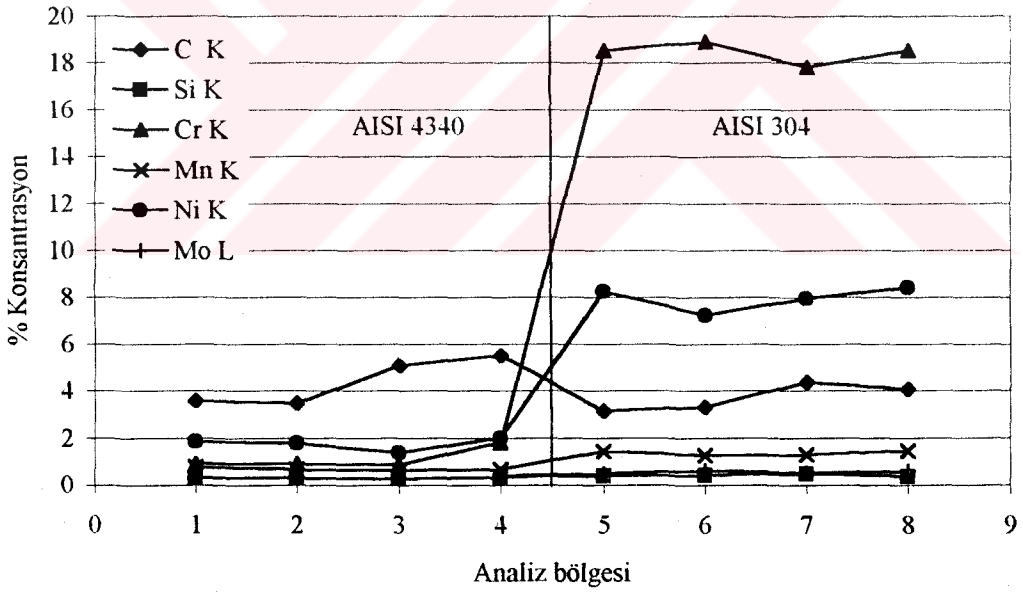
Şekil 5.31 2100 d/d'de AISI 4340 – AISI 440 kaynaklı numunenin AISI 4340 ana malzeme – ısıdan etkilenmiş bölgesi SEM fotoğrafı.

Şekil 5.32., 5.33. ve 5.34'de AISI 4340 – AISI 304 paslanmaz çeliklerinin 1500, 1800 ve 2100 d/d birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinden alınan EDAX element konsantrasyonlarını gösteren diyagramlar verilmiştir. Diyagramlardaki analizler Şekil 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16'da belirtilen bölgelerden alınmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi elementler birleşme ara bölgesinde belirli oranlarda difüzyon gerçekleşmiştir. Özellikle karbon ve krom elementlerinde difüzyon daha belirgin görülmektedir. Devir sayısı arttıkça meydana gelen sıcaklığın tesiriyle kaynak ara bölgesine yakın noktalarda karbür oluşumuna bağlı olarak krom oranının düştüğü gözlenmektedir. Ayrıca AISI 4340 tarafında devir sayısının artmasıyla ara bölgeye yakın bölgelerde karbon elementinin yüzde oranlarının arttığı görülmektedir. Bu sonuçların sertlik artışında ve martenzit oluşumunda etkili olduğu söylenebilir.

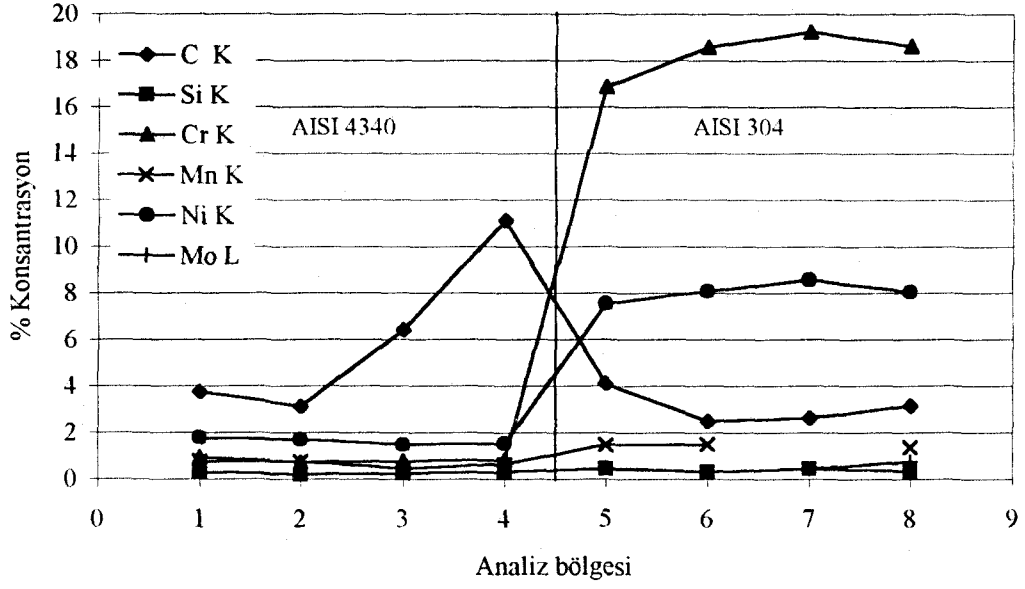
AISI 4340 ile 2100 d/d birleştirilen AISI 440 ve AISI 430 paslanmaz çelikli numunelerin kaynak bölgesinden alınan EDAX sonuçlarından elde edilen element konsantrasyonları Şekil 5.35. ve 5.36.'da verilmiştir. Daha önce ifade edilen sonuçlar bu numuneler içinde benzer sonuçları verdiği belirlenmiştir.



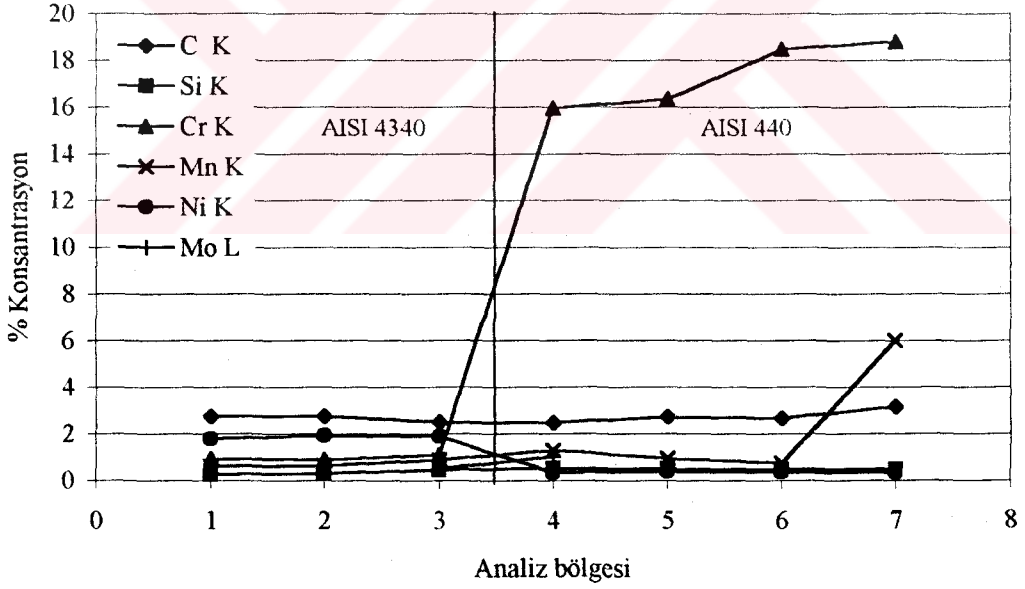
Şekil 5.32 1500 d/d'de AISI 4340 – 304 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.



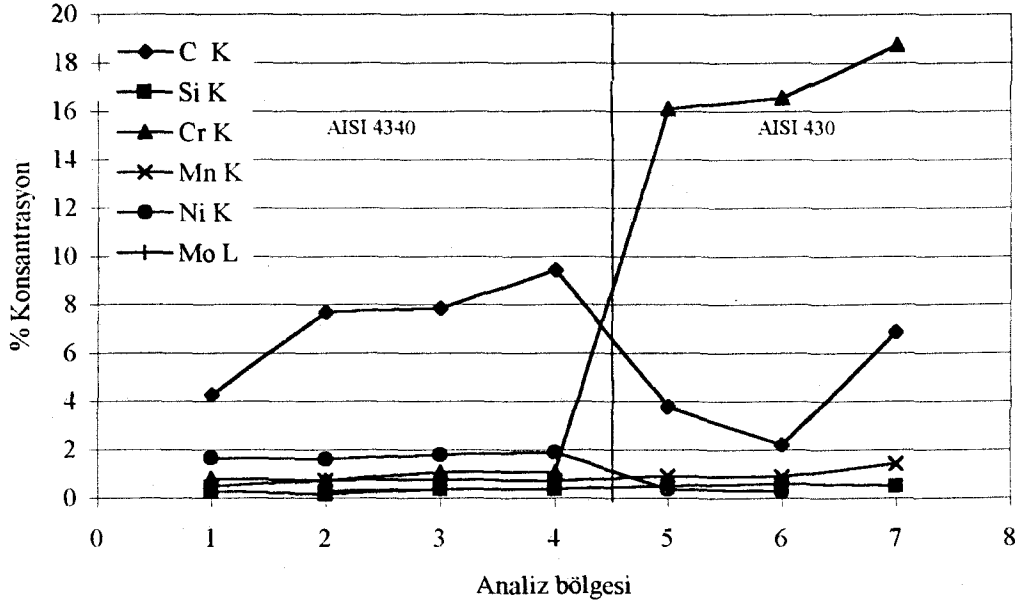
Şekil 5.33 1800 d/d'de AISI 4340 – 304 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.



Şekil 5.34 2100 d/d'de AISI 4340 – 304 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.



Şekil 5.35 2100 d/d'de AISI 4340 – 440 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.



Şekil 5.36 2100 d/d'de AISI 4340 – 430 çiftinin element konsantrasyon dağılımı.

5.4.Yorulma Deneyi Sonuçları

Yorulma deneylerine ait sonuçlar tablo 5.3.'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre hazırlanan S – N grafikleri ise AISI 4340 – 304 çiftleri için Şekil 5.37, 5.38 ve 5.39'de, AISI 440 için Şekil 5.41'de ve AISI 430 çifti için Şekil 5.42'de verilmiştir. Şekil 5.43 ve 5.44.'de sonuçlar toplu halde gösterilmiştir.

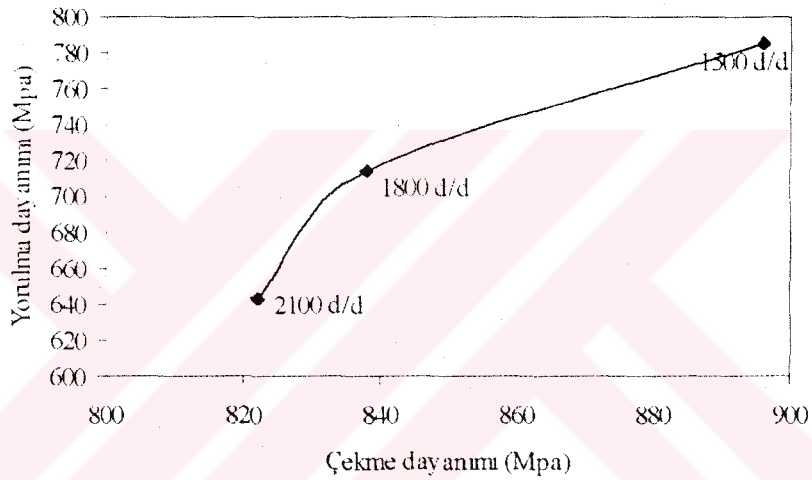
Tablo 5.3. AISI 4340 çeliği ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin yorulma dayanım değerleri.

	AISI 4340 – 304 1500 d/d		AISI 4340 – 304 1800 d/d		AISI 4340 – 304 2100 d/d		AISI 4340 – 440 2100 d/d		AISI 4340 – 430 2100 d/d	
Deney No	Gerilme (Mpa)	Çevrim Sayısı	Gerilme (Mpa)	Çevrim Sayısı	Gerilme (Mpa)	Çevrim Sayısı	Gerilme (Mpa)	Çevrim Sayısı	Gerilme (Mpa)	Çevrim Sayısı
1	1286	3845	1214	2630	1143	2782	857	4571	929	3311
2	1214	8511	1143	5888	1071	5129	786	8128	857	3890
3	1143	7586	1071	10425	1000	6310	714	13183	786	10233
4	1071	17783	1000	11482	929	19498	643	14363	714	11482
5	1000	22909	929	34674	857	22387	571	45475	643	30200
6	929	72444	857	50119	786	181970	500	208930	571	117490
7	857	138038	786	295121	714	316228	429	251189	500	173780
8	786	3336000	714	3002400	643	3336000	357	3311311	429	2238721

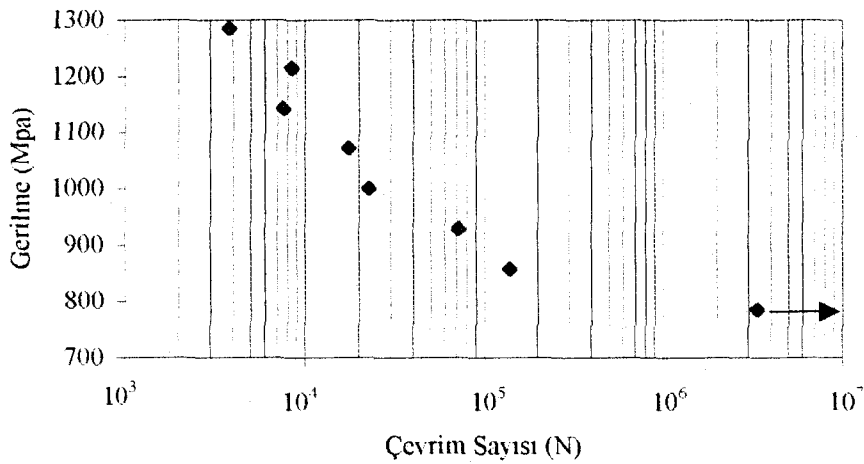
AISI 4340 ile birleştirilen AISI 304 paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımı grafikleri incelendiğinde en yüksek yorulma dayanımının devir sayısı 1500 d/d'da birleştirilen numunelerde gerçekleştiği görülmektedir. Sürtünme kaynağında uygulanan devir sayısının

artışına bağlı olarak yorulma dayanımı düşmektedir. Bilindiği gibi, yorulma hasarlarında önemli bir husus da dövülmüş veya haddelenmiş malzemelerin yönsel yorulma özellikleridir (Tekin, 1981). Sürtünme kaynağı esnasında artan devir sayısına bağlı olarak sürtünme kuvveti ve yığma basıncının etkisiyle gerek tanelerin aldığı yönlülük ve gerekse çökeltilerin kaynak ara bölgesine yakın dizilenmeleri yorulma dayanımının düşmesine yol açmıştır. İkincil (çökelmiş) fazlar gibi metalografik süreksizlikler gerilme yoğunlaşmasına neden olarak yorulma dayanımını düşürmektedir. Mikroyapı fotoğrafları ve Şekil 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 ve 5.36'da verilen element konsantrasyonları bu sonucu doğrulamaktadır.

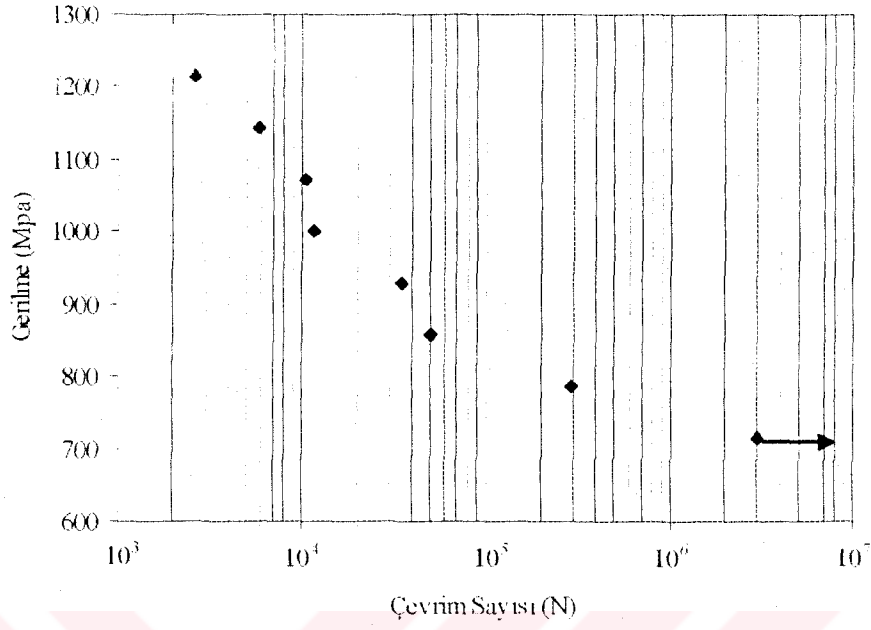
Deneylerde elde edilen yorulma dayanımları, numunelerin çekme dayanımları ile birlikte değerlendirildiğinde yorulma dayanımının artan çekme dayanımıyla arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar literatür bilgileriyle de uygunluk göstermektedir (Şekil 5.37).



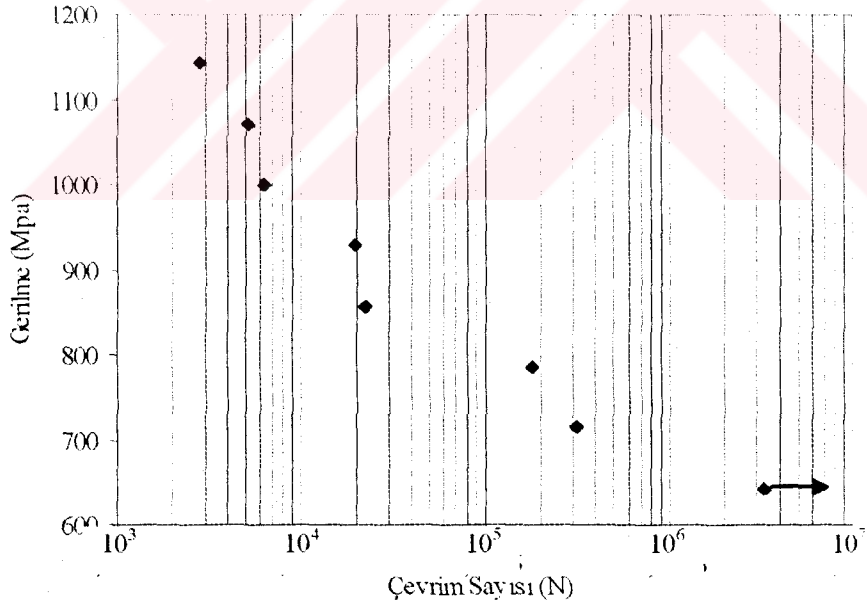
Şekil 5.37 AISI 4340 – 304 çiftinin devir sayısına bağlı çekme – yorulma dayanımı eğrisi.



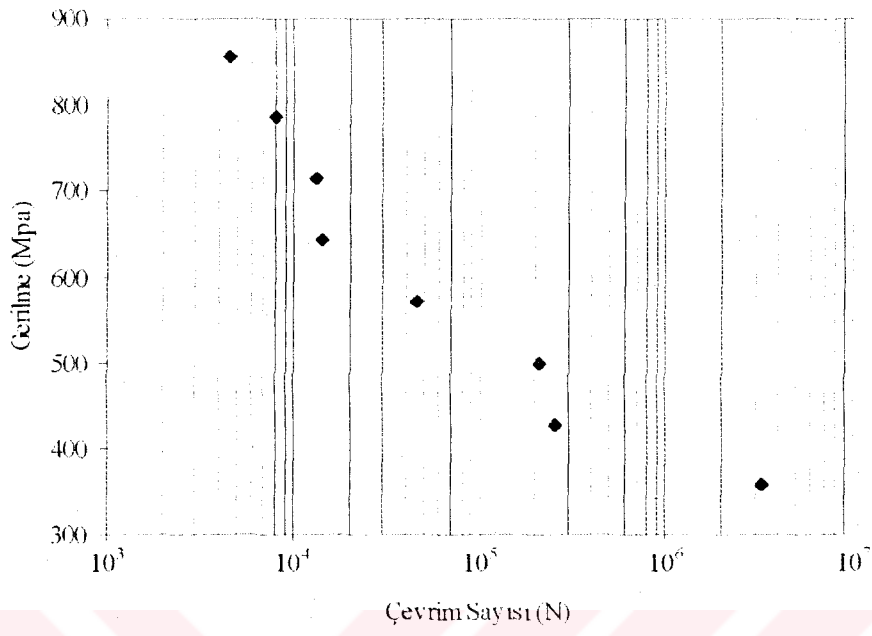
Şekil 5.38 1500 d/d AISI 4340 – 304 çiftinin S – N grafiği.



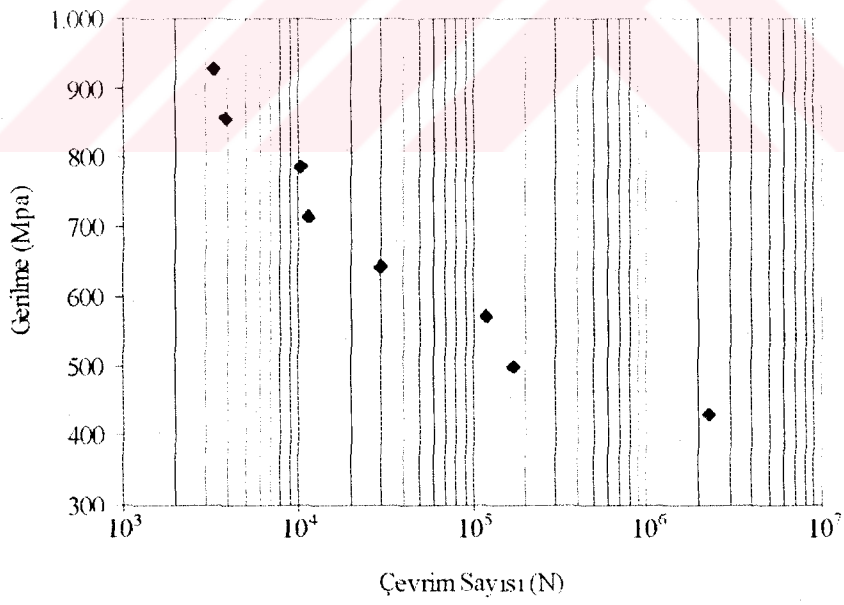
Şekil 5.39 1800 d/d AISI 4340 – 304 çiftinin S – N grafiği.



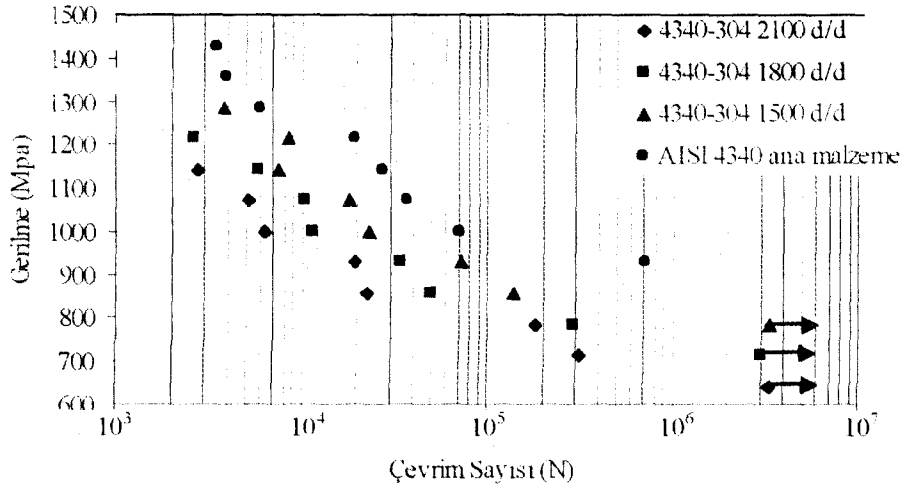
Şekil 5.40 2100 d/d AISI 4340 – 304 çiftinin S – N grafiği.



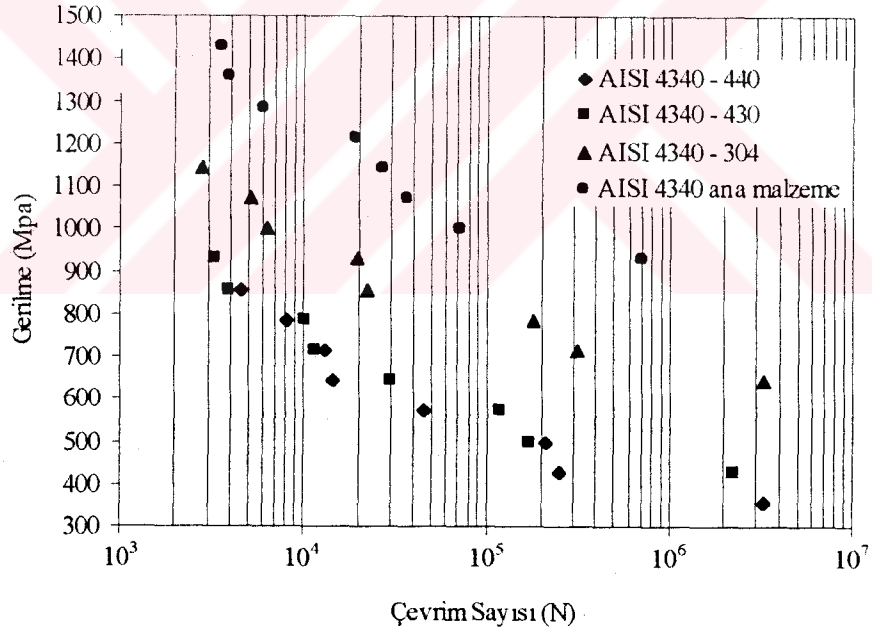
Şekil 5.41 2100 d/d AISI 4340 – 440 çiftinin S – N grafiği.



Şekil 5.42 2100 d/d AISI 4340 – 430 çiftinin S – N grafiği.



Şekil 5.43 AISI 4340 – 430 çiftinin devir sayısına bağlı S – N grafiği.



Şekil 5.44 AISI 4340 çeliği ile 2100 d/d'da birleştirilen paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımı grafiği.

Şekil 5.45., 5.46., 5.47., 5.48., 5.49. ve 5.50.'de farklı devir sayılarında birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 numunelerinin yorulma kırık yüzeyleri verilmiştir.

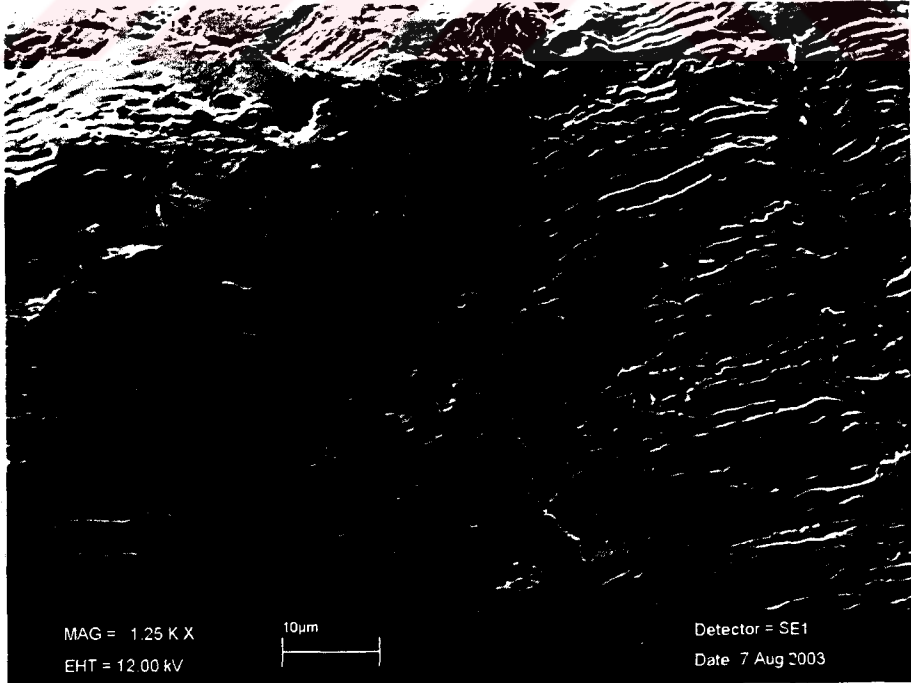
AISI 4340 – 304 çiftinin 1500 d/d da birleştirilen numunelerin yorulma deneyinden sonra alınan kırık yüzey fotoğraflarında; yorulma kırılmalarının tipik özelliği olan ve genellikle

sünek malzemelerde belirgin olarak görülen yorulma çizgileri (fatigue striations) görülmektedir (Şekil 5.45). Bu birleştirmelerde düşük devir sayısı kullanımına bağlı olarak deformasyon miktarı daha düşüktür. Ayrıca Şekil 5.46'da yorulma çizgilerinin farklı yönlenmiş olması, tanelerin deformasyonundan kaynaklanmaktadır.

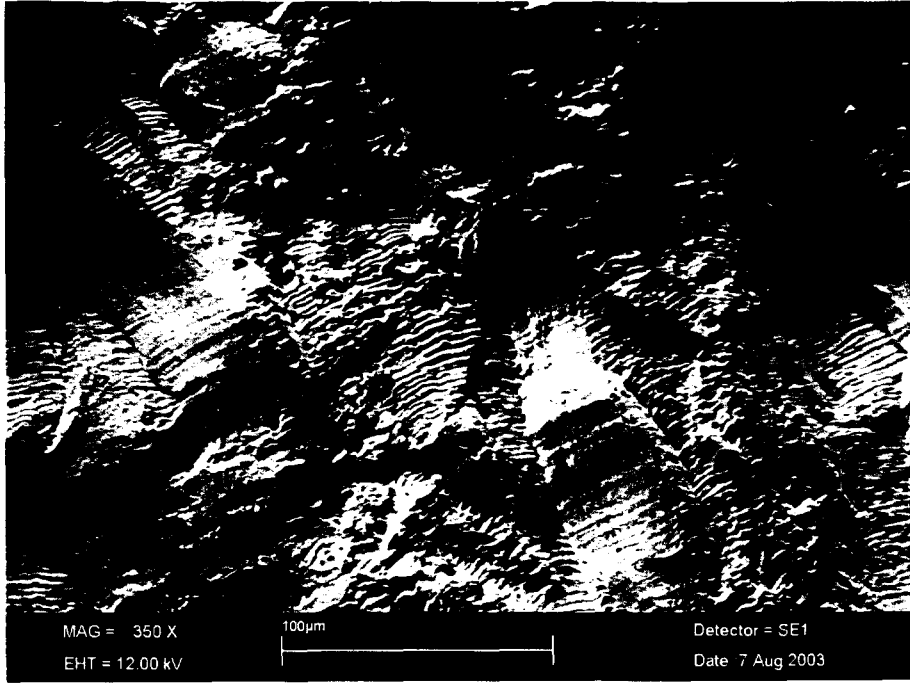
1800 ve 2100 d/d da birleştirilen numunelerde artan deformasyon şiddetine bağlı olarak yorulma çizgileri belirgin değildir. Bu numunelerinde sünek bir tarzda kırıldığı ve dimple (gamze) tipi bir kırılma gösterdiği görülmektedir. Bilindiği gibi, bu tip kırılmalar genellikle ikinci faz partiküllerinde, tane sınırlarında boşlukların çekirdeklenmesiyle başlar. Çatlak ilerlemesi ve kırılma söz konusu boşlukların büyüyerek birleşmesi sonucu meydana gelir. Daha önce ifade edildiği gibi, bu numunelerin kırılma bölgesinde uygulanan devir sayısına bağlı olarak çökeltilerin oluştuğu mikroyapı ve EDAX sonuçlarından tespit edilmiştir.

2100 d/d da birleştirilen AISI 4340 – AISI 430 numunelerinde de sünek bir tarzda ve dimple (gamze) tipi bir kırılma görülmektedir. Ancak çukurcukların AISI 4340 – 304 birleştirmelere nazaran daha yüzeysel olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar AISI 430 paslanmaz çeliğin plastik deformasyon yeteneğinin daha düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir (Şekil 5.53. ve 5.54.).

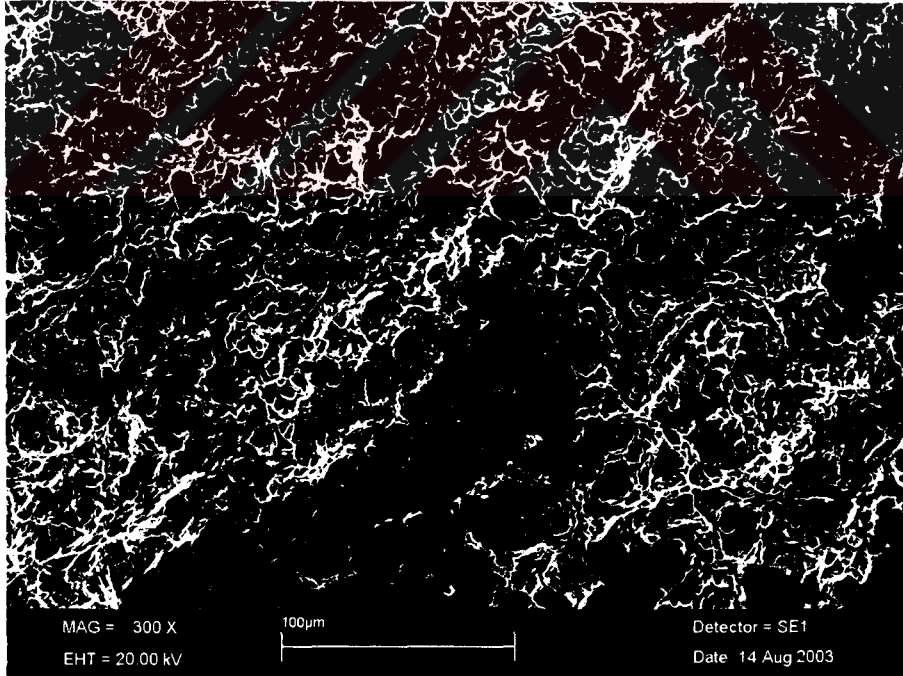
2100 d/d da birleştirilen AISI 4340 – AISI 440 numunelerinde genel olarak kırılma tipinin gevrek tarzda ve tane içi (trasgranüler) olduğu görülmektedir (Şekil 5.51. ve 5.52.). kırılmanın gerçekleştiği mikroyapının martenzit olması kırılma ve çentik hassasiyetini artırmaktadır.



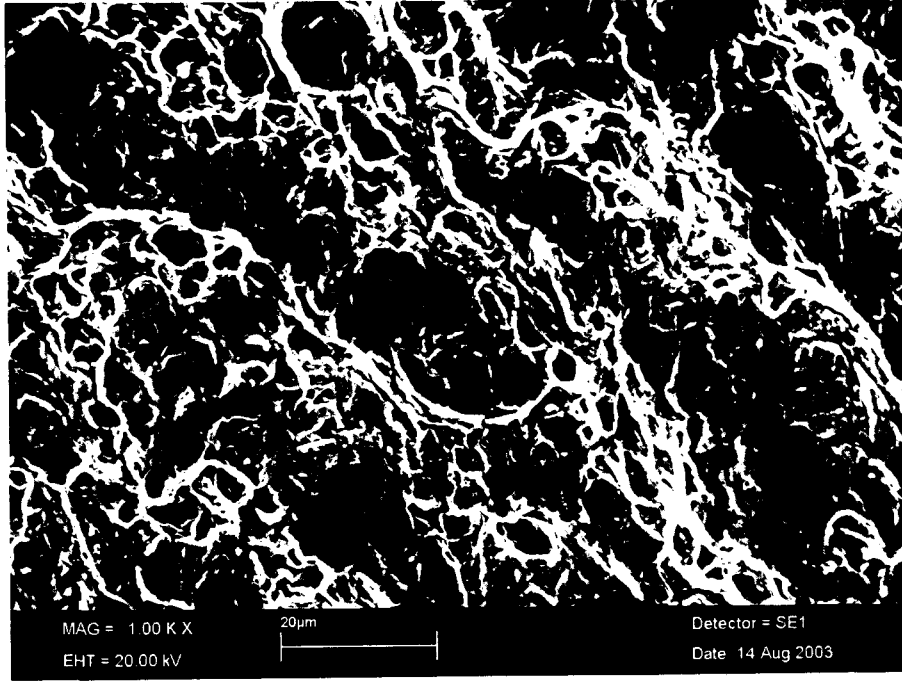
Şekil 5.45 1500 d/d'da AISI 4340 – 304 çiftinin 1286 Mpa gerilmeye 3845 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



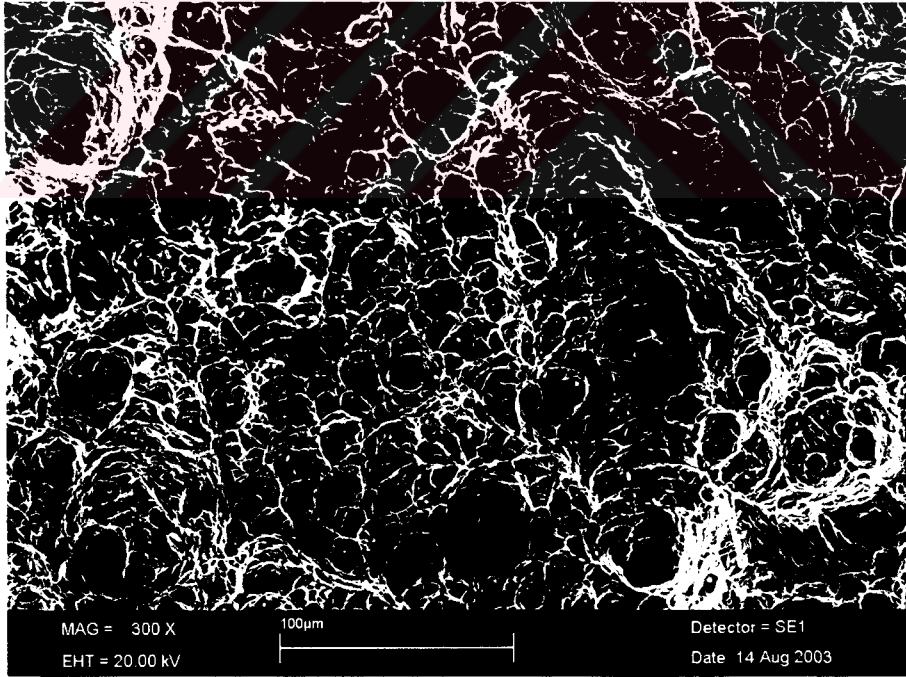
Şekil 5.46 1500 d/d'da AISI 4340 – 304 çiftinin 1286 Mpa gerilmede 3845 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



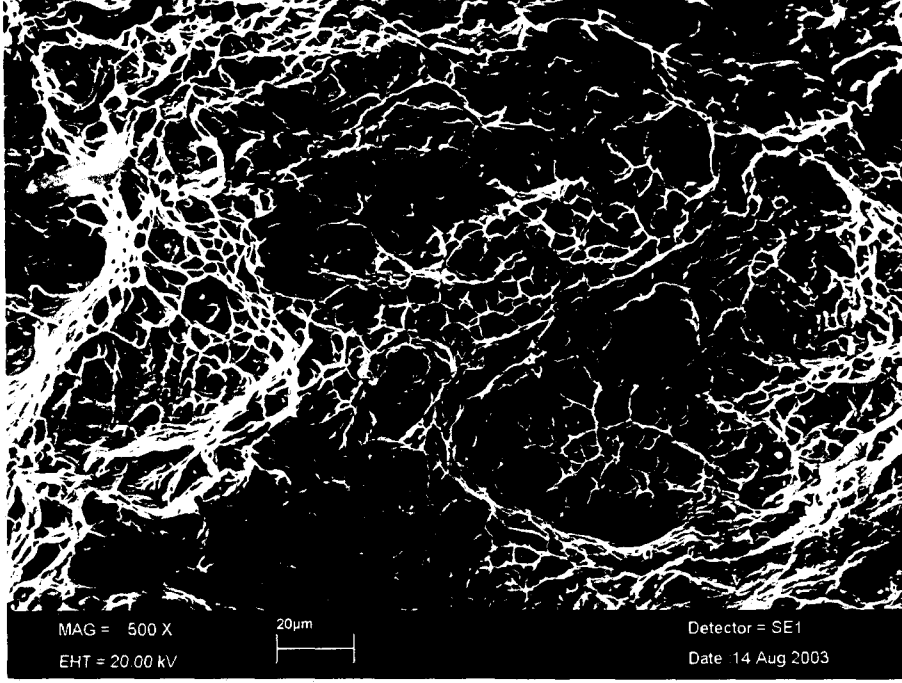
Şekil 5.47 1800 d/d'da AISI 4340 – 304 çiftinin 1000 Mpa gerilmede 11482 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



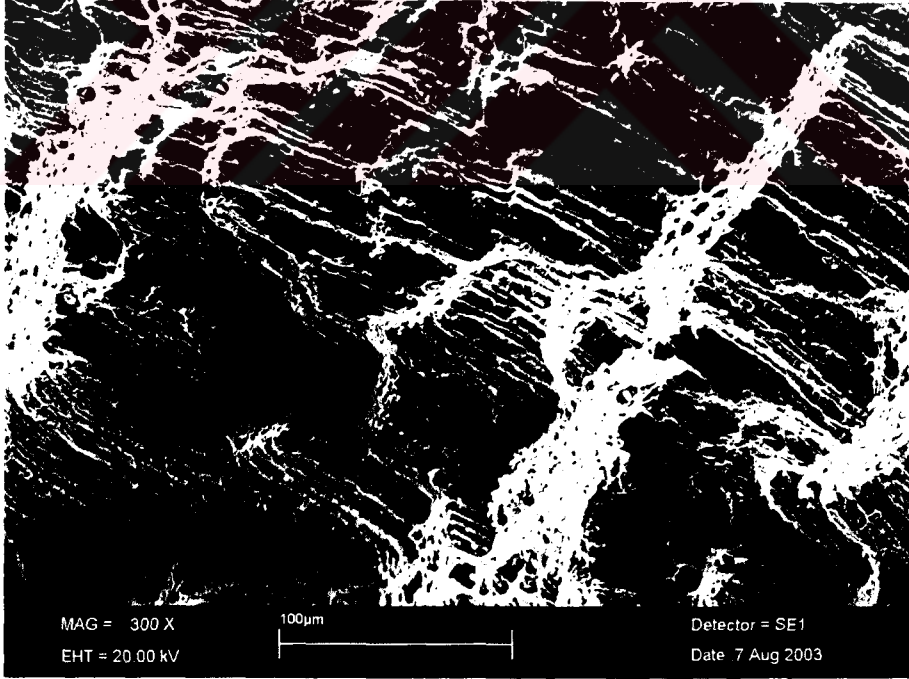
Şekil 5.48 1800 d/d'da AISI 4340 – 304 çiftinin 929 Mpa gerilmede 34674 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



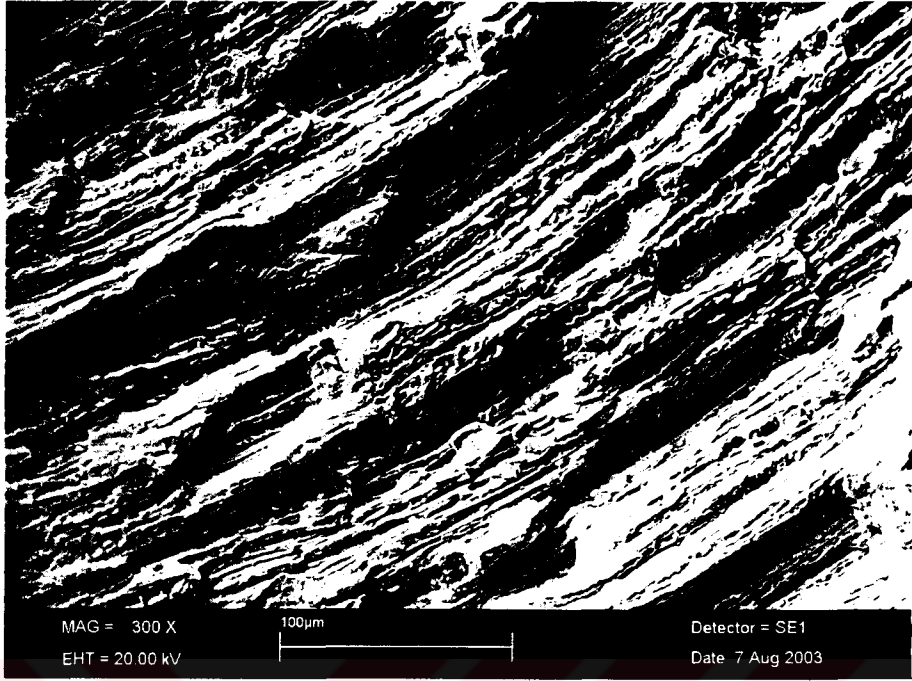
Şekil 5.49 2100 d/d'da AISI 4340 – 304 çiftinin 1000 Mpa gerilmede 6310 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



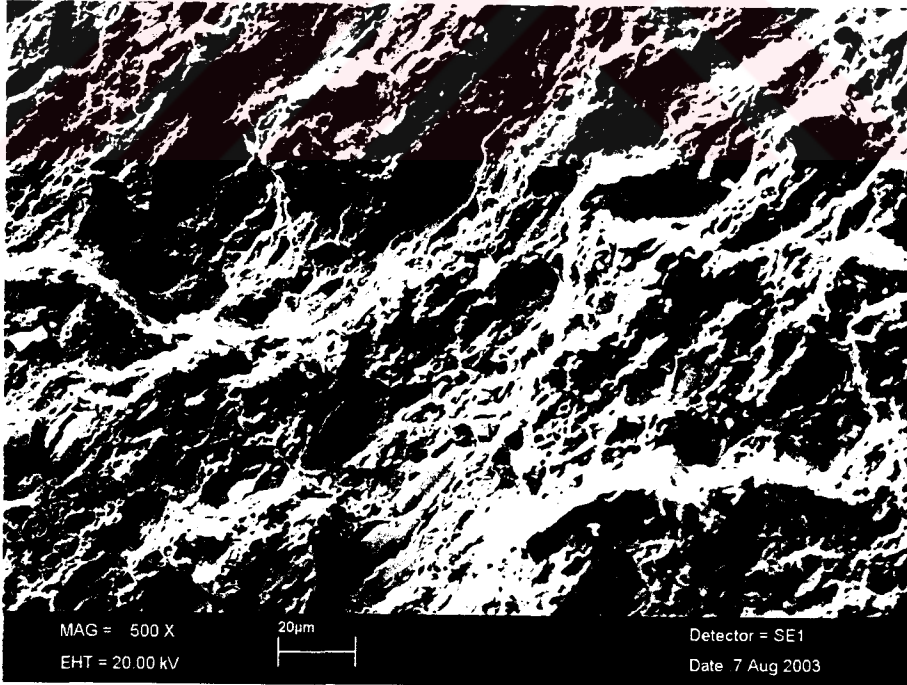
Şekil 5.50 2100 d/d'da AISI 4340 – 304 çiftinin 857 Mpa gerilmede 22387 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



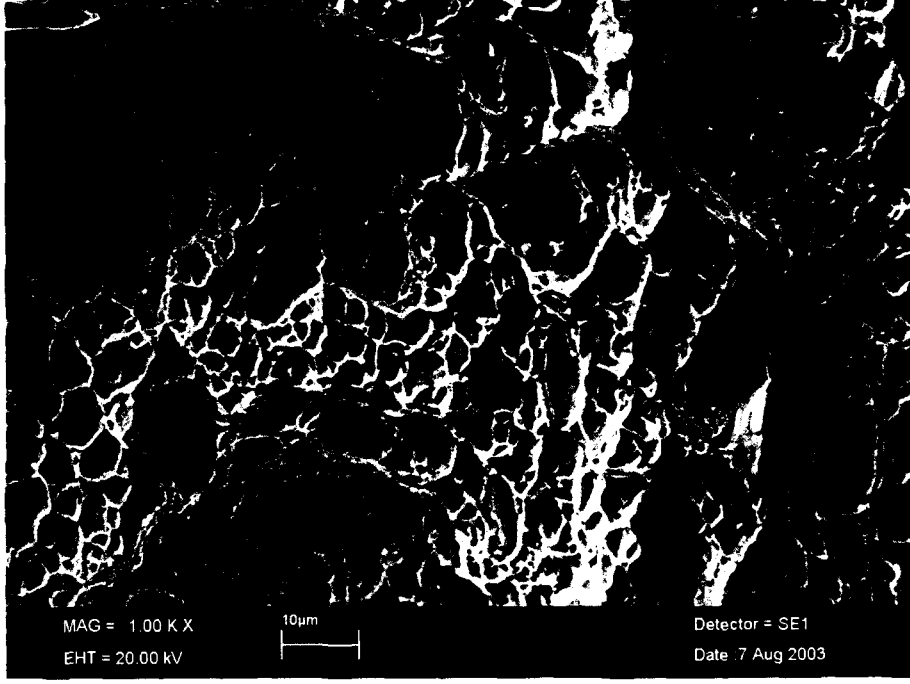
Şekil 5.51 2100 d/d'da AISI 4340 – 440 çiftinin 857 Mpa gerilmede 4571 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



Şekil 5.52 2100 d/d'da AISI 4340 – 440 çiftinin 714 Mpa gerilmede 13183 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



Şekil 5.53 2100 d/d'da AISI 4340 – 430 çiftinin 643 Mpa gerilmede 30200 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.



Şekil 5.54 2100 d/d'da AISI 4340 – 430 çiftinin 643 Mpa gerilmede 30200 çevrim sonucu kırılan numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafı.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 1500, 1800 ve 2100 d/dk'da sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 4340 çeliği ile AISI 304, AISI 430 ve AISI 440 paslanmaz çeliklerin kaynak karakteristikleri ve yorulma dayanımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Çekme deneyi sonuçlarına göre, en yüksek çekme mukavemeti 1500 d/d birleştirilen AISI 4340 – 304 çiftinde, en düşük çekme mukavemeti ise 2100 d/d birleştirilen AISI 4340 – 440 çiftinde elde edilmiştir. Birleştirilen numunelerin tamamı paslanmaz çeliğin kaynak ara bölgesine yakın kısmından kırılmıştır.
2. Kaynaklı numunelerin birleşme bölgesindeki sertlik dağılımları benzer özellikler göstermekte ve en fazla sertlik artışı birleşme bölgesine takriben 2 mm AISI 4340 çeliği tarafında görülmektedir. En yüksek sertlik 2100 d/dk'da birleştirilen AISI 4340 – AISI 304 çiftinde tespit edilmiştir. Sertlik artışı yigma basıncının etkisiyle deformasyon sertleşmesi ve martenzit oluşumundan kaynaklanmaktadır.
3. AISI 304 paslanmaz çelikli birleştirmelerde devir sayısının artmasıyla dışarıya taşan malzeme miktarı artmakta ve buna bağlı olarak AISI 4340 çeliği tarafında sıcaklığın artmasıyla ısıdan etkilenen bölgenin daraldığı görülmektedir. Daralan bu bölgede sürtünme ve yığmanın etkisiyle oluşan yumuşama neticesinde meydana gelen viskoz davranışının etkisi görülmektedir. Bu bölgede taneler haddeleme izlerine dik doğrultuda yönelmektedir. Ani ısınma ve soğuma neticesinde yapıdaki martenzit fazı oluşmaktadır.
4. Yorulma deneyi sonuçlarına göre, en yüksek yorulma ömrü 1500 d/d birleştirilen AISI 4340 – 304 çiftinde, en düşük yorulma ömrü ise 2100 d/d birleştirilen AISI 4340 – 440 çiftinde tespit edilmiştir. Kırılmaların paslanmaz çeliğin kaynak ara yüzeyine yakın bölgede olduğu belirlenmiştir. Yorulma kırık yüzeyleri incelendiğinde AISI 304 ve AISI 430 numunelerinin genel olarak sünek tarzda ve dimple tipi kırıldığı, AISI 440 numunelerinin ise gevrek tarzda kırıldığı tespit edilmiştir.
5. Elde edilen bu sonuçlar, AISI 4340 çeliği ile AISI 304, AISI 430 ve AISI 440 paslanmaz çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Devir sayısının birleşme kalitesi üzerine etkili olduğu ve bu parametrenin uygun seçildiğinde iyi sonuçlar alınabileceği görülmektedir. Ancak mekanik dayanımı düşüren fazların oluşumu engellenememektedir.

Bundan sonra bu konuda yapılacak çalışmalar, ara kesitte oluşan karbürleri ve mikroyapıya bağlı iç gerginlikleri azaltabilecek yöntemler üzerinde yoğunlaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Anık, S., 1983. Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Ergör Matbaası, İSTANBUL, 259-269.
- Armas, A. F., Et al., 1998. "Dynamic strain ageing evidences during low cycle fatigue deformation in ferritic-martenzitic stainless steels", Journal of Nuclear Materials, 1204 – 1208.
- ASM Handbook 1992. Failure Analysis and Prevention, Volume 11, Printed in The U.S.A.
- Aydın, M. ve diğerleri., 1997. "Çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma özelliklerinin incelenmesi", T.M.M.O.B. Makine Mühendisleri Odası, İSTANBUL, 40-45.
- Bahmani M., Et al., 1997. Journal of Materials Science, 32.
- Bahrani, A.S., and Grassland, B., 1976. Friction welding, CME, 61-66.
- Bargel, H.J. ve diğerleri., 1988. Malzeme Bilgisi 1, MBEAE Matbaası, GEBZE, 110-121.
- Başman G. ve diğerleri., 2000. "F.B.B. (Fiziksel Buhar Biriktirme)Yöntemiyle Titanyum Nitrür Seramik İnce Filmle Kaplanmış Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışı", 10. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İSTANBUL, 1101- 1108.
- Begg, G.H.C., and Humphreys, B.A., 1981. "Rotational - friction welding", Engineering Tech. File no 91, 1-4.
- Boyer H. E., 1986. Atlas of Fatigue Curves, American Society for Metals, U.S.A., 1 -42.
- Collins, J. A., 1981. Failure of Materials in Mechanical Design, A Wiley-Interscience Publication, U.S.A., 627.
- Cox and M., and Glenney E., 1986. Thermal Fatigue Investigation, Engineering, LONDON.
- Çalık A., 1997. "Dolgu Kaynağı Yapılmış Millerin Yorulma Ömrünün Deneysel Olarak Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ELAZIĞ.
- Çapa M., 1972. "Metallerin Yorulma Teorileri", Mühendis ve Makina c. 16, Sayı 188, Ekim, İSTANBUL.
- Çelik A.Ş., 1995. "Sementasyon İşleminin Yorulma Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ISPARTA.
- Dieter, G., E., 1988. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company Limited, SINGAPORE, p 750.
- Duffin, F.D., and Grassland, B., 1971. "Friction welding with sudden release of the fixed component, advances in welding processes, solid phase joining processes, proceeding of the conference", The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, 25-33.
- Ellis, C. R. G., 1977. "Friction welding and some recent applications of friction welding", Weld. and Metal Fab. 207 – 213.
- Ellis, C. R. G., 1976. "Friction welding : where industry uses it", Welding Design and Fab., 78-81.
- Fukuchi, Y., Et al., 1997. "Fatigue strength of SUS303/SUS303 friction welded joints", Journal of the Society of Materials Science, Japan, 46, 1051 – 1056.
- Ganowski, F. N., 1973. "Practical considerations for friction welding", Welding Engineering, 40-44.
- Geçkinli, A. E., 1986. Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, İTÜ Matbaası. İSTANBUL, 207.
- Geçkinli, A. E., 1989. Metalografi Cilt I, İTÜ Matbaası, İSTANBUL, 262.
- Gooch, T. G., Et al., 1996. "Welding processes for stainless steels", Sheet Metal Industries n Suppl, 5pp.
- Gurney, T., 1968, Fatigue of Welded Structures, Cambridge at The University Press, LONDON, 254.
- Güleç, Ş. ve Aran, A., 1983. Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, MBEAE Matbaası, GEBZE, 210.
- Hong, H. U., Et al., 2002. " A study on the crack initiation and growth from δ -ferrit / γ phase interface under continuous fatigue and creep – fatigue conditions in type 304L stainless steels", International Journal of Fatigue, 1063 – 1070.
- Iacoviello, F., Et al., 1999. "Fatigue crack propagation in austeno-ferritic duplex stainless steel 22 Cr 5 Ni", International Journal of Fatigue, 957 – 963.

- Ishibashi, A., Et al., 1983. "Studies on friction welding of carbon and alloy steels", Bulletin of the JSME, 1080 – 1087.
- Ishikawa, T., and Haze, T., 1994. "Significance of fracture size in cleavage fracture process of welded joints", Material Science Engineering, 176, 385-391.
- Itoh, Y. Z., Et al., 1989. "Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field", Engineering Fracture Mechanics, 33, 3, 397-407.
- Jenning, P., 1971. "Some properties of dissimilar metal joints made by friction welding", The Welding Institute, Abingdon Hall, CAMBRIDGE, 147 – 153.
- Kayalı, E.S. ve diğerleri., 1984. Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Matbaası, İSTANBUL, 175.
- Komotori, J., Et al., 2001. "Fatigue strength and fracture mechanism of steel modified by super-rapid induction heating and quenching", International Journal of Fatigue, 225 – 230.
- Krupp, U., Et al., 2001. "Influence of carbon concentration on martensitic transformation in metastable austenitic steels under cyclic loading conditions", Materials Science and Engineering, 527 – 530.
- Kurban A. O., 1993. "Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler", 5. Denizli Malzeme Sempozyumu DENİZLİ.
- Kuruzar, D. L., 1979. "Joint design for the friction welding process", Welding Journal, 31-35.
- Lin, Y. C., Et al., 2003. "Role of retained ferrite on the thermal fatigue cracking resistance in martensitic stainless steel weldment", Materials Science and Engineering, 133 – 135.
- Mohandas, T., Et al., 2000. "Microstructure and mechanical properties of friction welds of an $\alpha+\beta$ titanium alloy", Materials Science and Engineering, 70 – 82.
- Nachimento, M. P., Et al., 2001. "Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel", International Journal of Fatigue, 607 – 618.
- Nicholas, E. D., 1983. "Radial friction welding", Welding Journal, 17-29.
- Nishi, H., Et al., 2001. "Fatigue behavior on weldment of austenitic stainless steels for ITER vacuum vessel", Fusion Engineering and Design, 869 – 873.
- Ogi, H., Et al., 2000. "In-situ monitoring of ultrasonic attenuation during rotation bending fatigue of carbon steel with electromagnetic acoustic resonance", Journal of Alloys and Compounds, 436 – 439.
- Oliviera, F., Et al., 2001. "Corrosion-fatigue properties of a 4340 steel coated with Colmonoy 88 alloy, applied by HVOF thermal spray", Surface and Coatings Technology, 128 – 135.
- Orhan, N. ve Özlü M., 2003. "Bir transmisyon çeliği ile martenzitik bir paslanmaz çeliğin sürtünme kaynağında yığılma basıncının etkisi", Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 2, 66 – 71.
- Özdemir, N., 2002. "Tane Küçültülmüş Düşük Alaşımlı Yüksek Karbonlu Çeliklerin Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması" Doktora Tezi, ELAZIĞ.
- Park, J. S., Et al., 2002. "A microstructure model for the prediction of high cycle fatigue life", Scripta Materialia, 225 – 229.
- Postacıoğlu B., 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, İ.T.Ü. Matbaası, İSTANBUL, c. 1 s. 492-544.
- Sahin, A. Z., Et al., 1998. "Analysis of the friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars", Journal of Materials Processing Technology, 127 – 136.
- Schino, A. D., and Kenny, J. M., 2003. "Grain size dependence of the fatigue behavior of a ultrafine-grained AISI 304 stainless steel", Materials Letters, 1 – 4.
- Swanson, S. R., 1974. Handbook of Fatigue Testing, ASTM Committee E-9, p 285.
- Tauscher M., 1983. Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, MBEAE Matbaası, GEBZE.
- Tavara, S. A., Et al., 2001. "Influence of nickel on the susceptibility to corrosion fatigue of duplex stainless steel welds", International Journal of Fatigue, 619 – 626.
- Tjernberg, A., 2000. "Fatigue life of a friction welded joint with a circular crack in the centre", Engineering Failure Analysis, 221 – 227.
- Torres, M. A. S., and Voorwald, H. J. C., 2002. "An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel", International Journal of

Fatigue, 877 – 886.

- Tülbentçi, K. ve Yılmaz, M., 1989. “Farklı takım çeliklerinin katı hal kaynağı”, II. Ulusal kaynak sempozyumu bildiri kitabı, İTÜ, 303 – 314.
- Tylecote, R.Y., 1968. The Solid Phase Welding of Metals, Edward Arnold (Publisher) Ltd., LONDON, 1-150.
- Uğuz, A., 1996. Kırılma Mekanikine Giriş, Uludağ Üniversitesi Basımevi, BURSA, 160.
- Vill, V. I., 1962. Friction Welding of Metals, AWS, NEWYORK.
- Voinov, V. P., Et al., 1972. “Fatigue strength of friction welded joints between steels 20 and 40 Kh”, Weld. Prod., 51 - 54.
- Wang, K.K., and Lin, W., 1974. “Flywheel friction welding research”, Welding Journal, 233-241.
- Welding Handbook, 1980. Resistance and Solid State Welding and Other Joining Processes, AWS, MIAMI. 58-76, 239-262.
- Yan, J. H., Et al., 2000. “Prediction of fatigue life and its probability distribution of notched friction welded joints under variable-amplitude loading”, International Journal of Fatigue, 481 – 494.
- Yılbaş, B. S., Et al., 1995. “Friction welding of St-Al and Al-Cu materials”, Journal of Material Process Technology, 431 – 443.
- Yılmaz, M., 1993. Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İSTANBUL, Y.T.Ü., 1-55.
- Yılmaz, M., Et al., 2003. “Interface properties of aluminum / steel friction welded components”, Materials Characterization,
- Yuri, T., Et al., 2000. “Effect of welding structure and δ -ferrite on fatigue properties for TIG welded austenitic stainless steels at cryogenic temperatures”, Cryogenics, 251 – 259.

ÖZGEÇMİŞ

1978 Adana'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Adana'da tamamladım. 1997 – 1998 öğretim yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü'nde lisans eğitimine başladım. 2000 – 2001 öğretim yılında lisans eğitimini başarıyla tamamlayarak aynı öğretim yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladım. Halen özel bir şirkette Üretim Planlama Uzmanı olarak çalışmaktayım.



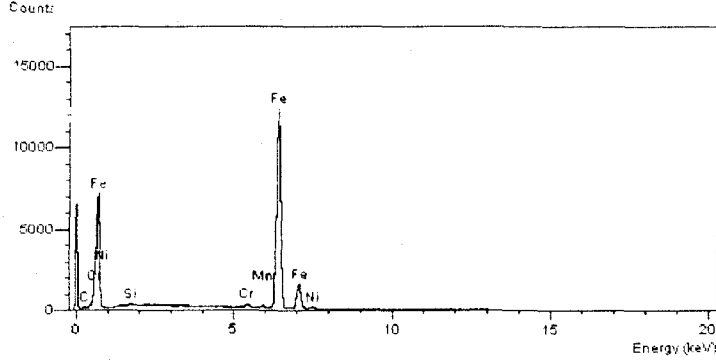
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU D
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

EKLER

EK 1

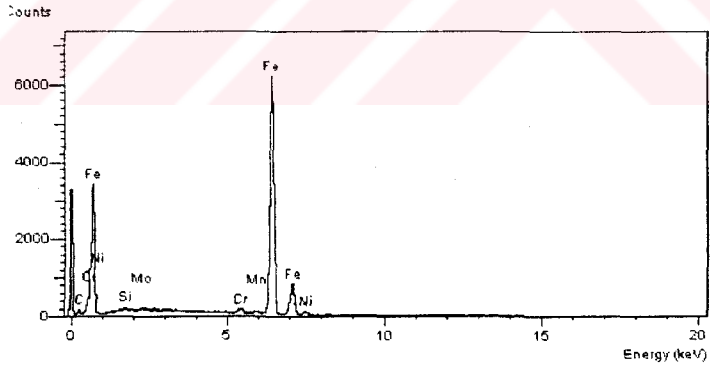
1500 d/d'da AISI 4340 çeliği ile birleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çeliğin Şekil 5.12'de verilen mikroyapı fotoğrafı üzerinde belirlenen bölgelerin EDAX analizleri

1 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



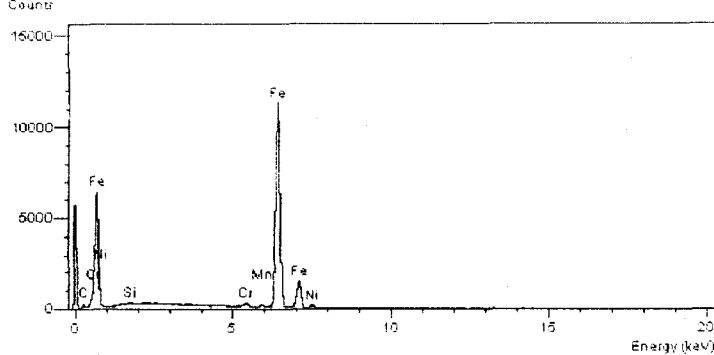
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.545	1.46	2.44	0.18	10.38
Si K	ED	0.740	1.04	0.34	0.05	0.62
Cr K	ED	1.285	1.00	0.79	0.07	0.78
Mn K	ED	0.976	1.00	0.75	0.10	0.69
Fe K	ED	0.996	1.00	93.81	0.27	85.90
Ni K	ED	0.909	1.00	1.87	0.16	1.63
Total				100.00		100.00

2 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



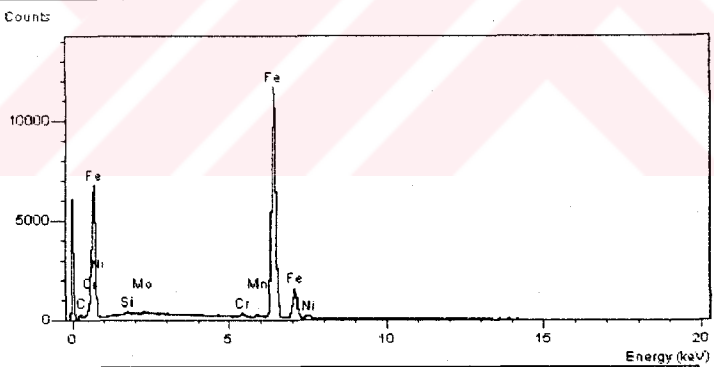
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.544	1.46	2.96	0.19	12.38
Si K	ED	0.742	1.04	0.32	0.05	0.58
Cr K	ED	1.281	1.00	0.79	0.07	0.76
Mn K	ED	0.975	1.00	0.78	0.11	0.72
Fe K	ED	0.995	1.00	93.13	0.30	83.94
Ni K	ED	0.909	1.00	1.69	0.16	1.45
Mo L	ED	0.745	1.04	0.33	0.14	0.17
Total				100.00		100.00

3 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



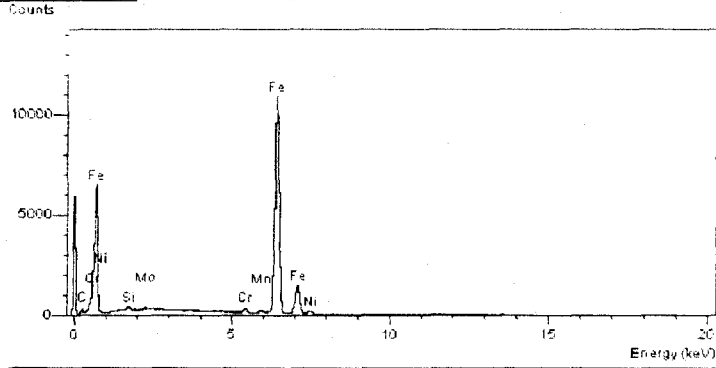
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.546	1.46	3.65	0.19	14.96
Si K	ED	0.741	1.04	0.29	0.05	0.51
Cr K	ED	1.283	1.00	0.82	0.07	0.77
Mn K	ED	0.974	1.00	0.56	0.11	0.50
Fe K	ED	0.994	1.00	92.98	0.28	81.84
Ni K	ED	0.908	1.00	1.70	0.17	1.42
Total				100.00		100.00

4 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



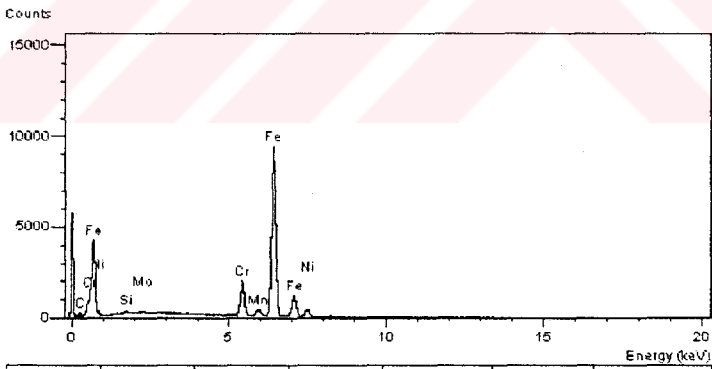
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.544	1.46	3.08	0.19	12.87
Si K	ED	0.742	1.04	0.30	0.05	0.53
Cr K	ED	1.282	1.00	0.73	0.07	0.70
Mn K	ED	0.974	1.00	0.57	0.10	0.52
Fe K	ED	0.995	1.00	93.37	0.30	83.82
Ni K	ED	0.909	1.00	1.61	0.16	1.37
Mo L	ED	0.745	1.04	0.34	0.14	0.18
Total				100.00		100.00

5 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



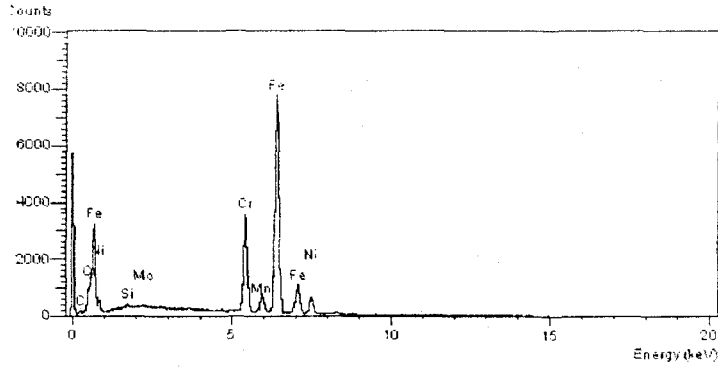
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.544	1.46	4.31	0.20	17.28
Si K	ED	0.743	1.04	0.35	0.05	0.60
Cr K	ED	1.274	1.00	0.99	0.07	0.92
Mn K	ED	0.973	1.00	0.68	0.11	0.59
Fe K	ED	0.993	1.00	91.54	0.31	78.97
Ni K	ED	0.908	1.00	1.79	0.17	1.47
Mo L	ED	0.746	1.04	0.34	0.14	0.17
Total				100.00		100.00

6 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



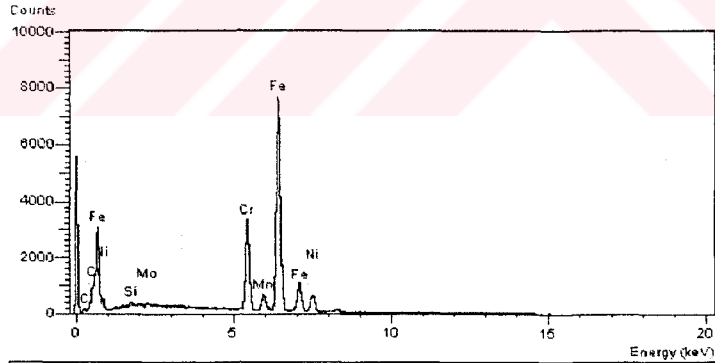
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.550	1.46	3.75	0.19	15.26
Si K	ED	0.746	1.04	0.34	0.05	0.59
Cr K	ED	1.193	1.00	9.45	0.14	8.87
Mn K	ED	0.976	1.00	0.85	0.13	0.75
Fe K	ED	0.984	1.00	80.31	0.32	70.22
Ni K	ED	0.912	1.00	4.99	0.21	4.15
Mo L	ED	0.748	1.04	0.31	0.14	0.16
Total				100.00		100.00

7 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



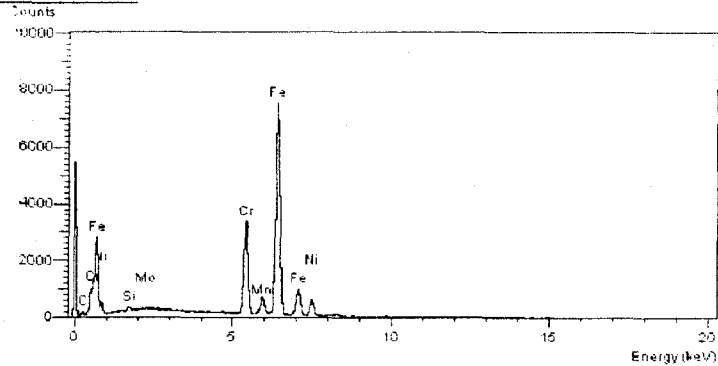
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.556	1.46	2.65	0.19	11.13
Si K	ED	0.751	1.04	0.40	0.05	0.72
Cr K	ED	1.137	1.00	18.65	0.20	18.06
Mn K	ED	0.980	1.00	1.50	0.15	1.38
Fe K	ED	0.975	1.00	68.11	0.33	61.42
Ni K	ED	0.918	1.00	8.22	0.24	7.05
Mo L	ED	0.751	1.04	0.46	0.15	0.24
Total				100.00		100.00

8 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



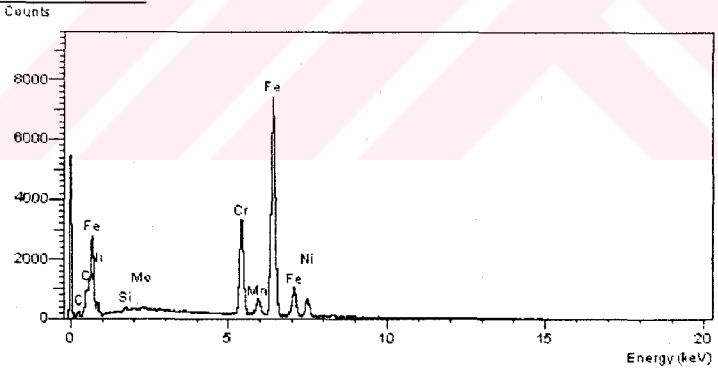
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.554	1.46	2.49	0.19	10.52
Si K	ED	0.750	1.04	0.38	0.05	0.68
Cr K	ED	1.137	1.00	18.40	0.20	17.93
Mn K	ED	0.981	1.00	1.55	0.15	1.43
Fe K	ED	0.976	1.00	68.06	0.34	61.77
Ni K	ED	0.918	1.00	8.50	0.25	7.34
Mo L	ED	0.750	1.04	0.62	0.15	0.33
Total				100.00		100.00

9 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.557	1.46	3.02	0.19	12.52
Si K	ED	0.751	1.04	0.38	0.05	0.68
Cr K	ED	1.137	1.00	18.73	0.20	17.92
Mn K	ED	0.979	1.00	1.25	0.15	1.14
Fe K	ED	0.974	1.00	68.51	0.34	61.01
Ni K	ED	0.917	1.00	7.73	0.25	6.55
Mo L	ED	0.751	1.04	0.36	0.15	0.19
Total				100.00		100.00

10 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:

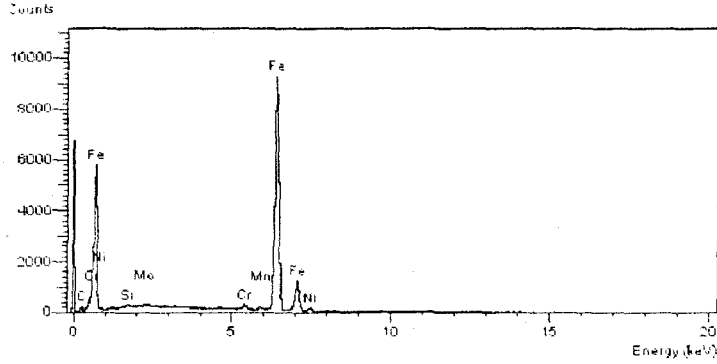


Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.553	1.46	3.50	0.19	14.31
Si K	ED	0.752	1.04	0.42	0.05	0.73
Cr K	ED	1.135	1.00	18.20	0.20	17.17
Mn K	ED	0.979	1.00	1.25	0.15	1.11
Fe K	ED	0.975	1.00	67.76	0.34	59.52
Ni K	ED	0.917	1.00	8.09	0.25	6.76
Mo L	ED	0.751	1.04	0.78	0.15	0.40
Total				100.00		100.00

EK2

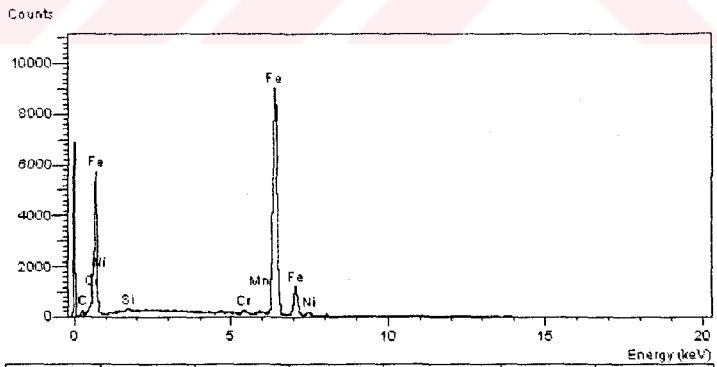
1800 d/d'da AISI 4340 çeliği ile birleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çeliğin Şekil 5.13'de verilen mikroyapı fotoğrafı üzerinde belirlenen bölgelerin EDAX analizleri

1 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.544	1.46	3.56	0.21	14.63
Si K	ED	0.742	1.04	0.30	0.06	0.53
Cr K	ED	1.276	1.00	0.91	0.08	0.86
Mn K	ED	0.974	1.00	0.77	0.12	0.70
Fe K	ED	0.994	1.00	92.18	0.34	81.51
Ni K	ED	0.909	1.00	1.85	0.19	1.56
Mo L	ED	0.746	1.04	0.43	0.16	0.22
Total				100.00		100.00

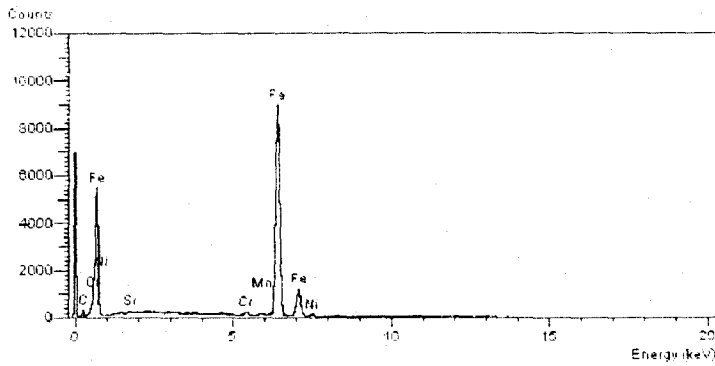
2 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.546	1.46	3.45	0.21	14.20
Si K	ED	0.741	1.04	0.29	0.06	0.52
Cr K	ED	1.282	1.00	0.89	0.08	0.84
Mn K	ED	0.974	1.00	0.65	0.12	0.59
Fe K	ED	0.994	1.00	92.95	0.31	82.35
Ni K	ED	0.908	1.00	1.77	0.19	1.50
Total				100.00		100.00

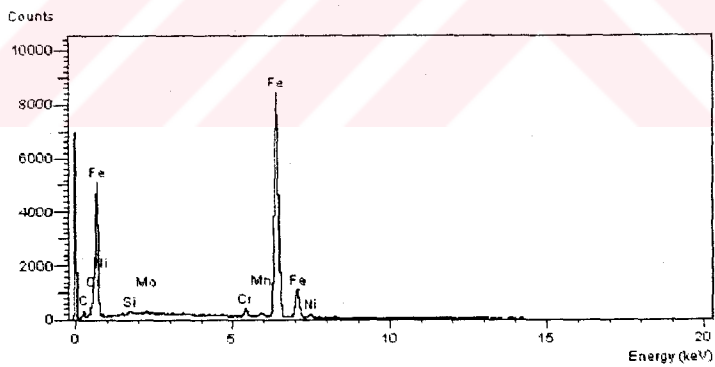
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON BİRİMİ

3 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



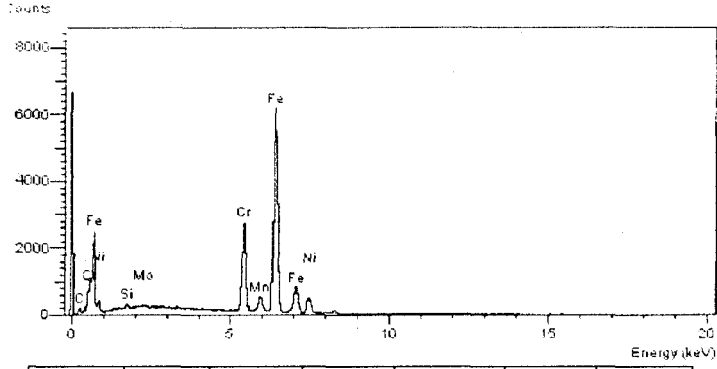
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.548	1.46	5.07	0.22	19.84
Si K	ED	0.743	1.04	0.25	0.06	0.42
Cr K	ED	1.281	1.00	0.84	0.08	0.76
Mn K	ED	0.971	1.00	0.60	0.12	0.52
Fe K	ED	0.991	1.00	91.89	0.31	77.39
Ni K	ED	0.906	1.00	1.35	0.19	1.08
Total				100.00		100.00

4 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



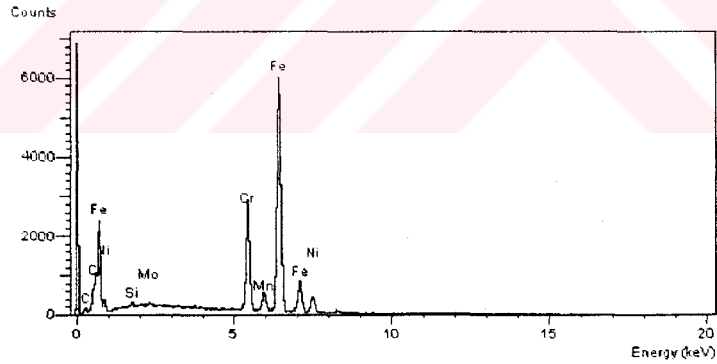
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.545	1.46	5.50	0.24	21.25
Si K	ED	0.745	1.04	0.34	0.06	0.56
Cr K	ED	1.262	1.00	1.80	0.10	1.61
Mn K	ED	0.971	1.00	0.66	0.13	0.55
Fe K	ED	0.990	1.00	89.36	0.36	74.28
Ni K	ED	0.907	1.00	1.98	0.20	1.57
Mo L	ED	0.747	1.04	0.37	0.16	0.18
Total				100.00		100.00

5 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



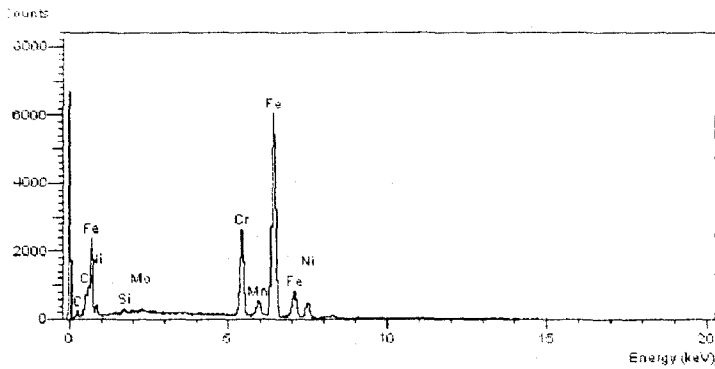
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.556	1.46	3.14	0.20	12.96
Si K	ED	0.751	1.04	0.38	0.06	0.66
Cr K	ED	1.136	1.00	18.53	0.22	17.67
Mn K	ED	0.980	1.00	1.43	0.17	1.29
Fe K	ED	0.975	1.00	67.81	0.37	60.20
Ni K	ED	0.917	1.00	8.25	0.28	6.96
Mo L	ED	0.751	1.04	0.47	0.16	0.24
Total				100.00		100.00

6 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



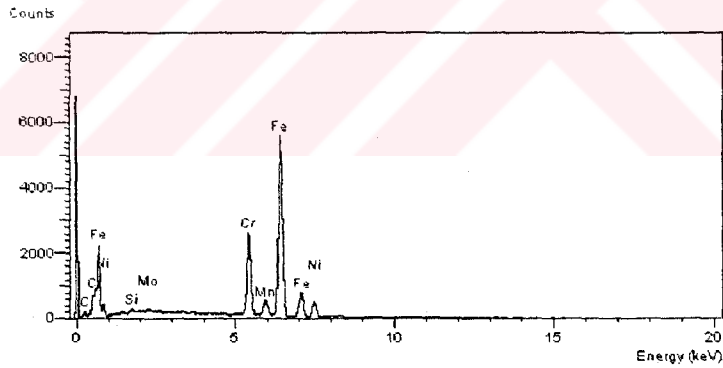
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.557	1.46	3.30	0.21	13.56
Si K	ED	0.753	1.04	0.40	0.06	0.70
Cr K	ED	1.135	1.00	18.92	0.23	17.94
Mn K	ED	0.979	1.00	1.24	0.17	1.11
Fe K	ED	0.973	1.00	68.31	0.38	60.31
Ni K	ED	0.916	1.00	7.23	0.27	6.07
Mo L	ED	0.752	1.04	0.59	0.16	0.31
Total				100.00		100.00

7 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.554	1.46	4.36	0.22	17.30
Si K	ED	0.752	1.04	0.46	0.06	0.78
Cr K	ED	1.135	1.00	17.83	0.22	16.35
Mn K	ED	0.977	1.00	1.27	0.17	1.10
Fe K	ED	0.973	1.00	67.62	0.38	57.74
Ni K	ED	0.916	1.00	7.97	0.27	6.47
Mo L	ED	0.751	1.04	0.50	0.17	0.25
Total				100.00		100.00

8 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:

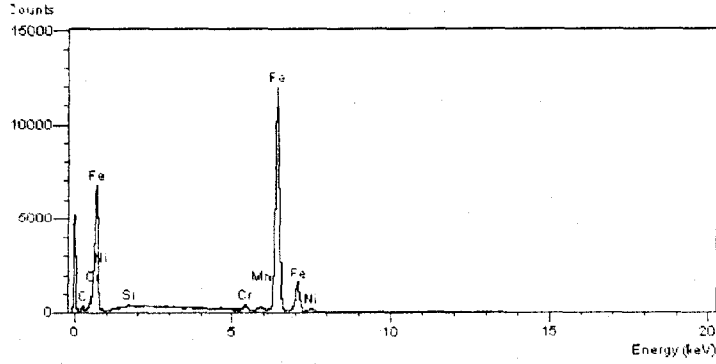


Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.555	1.46	4.05	0.22	16.26
Si K	ED	0.752	1.04	0.35	0.06	0.60
Cr K	ED	1.132	1.00	18.53	0.23	17.17
Mn K	ED	0.978	1.00	1.44	0.18	1.27
Fe K	ED	0.973	1.00	66.64	0.39	57.50
Ni K	ED	0.917	1.00	8.42	0.29	6.91
Mo L	ED	0.751	1.04	0.57	0.17	0.29
Total				100.00		100.00

EK 3

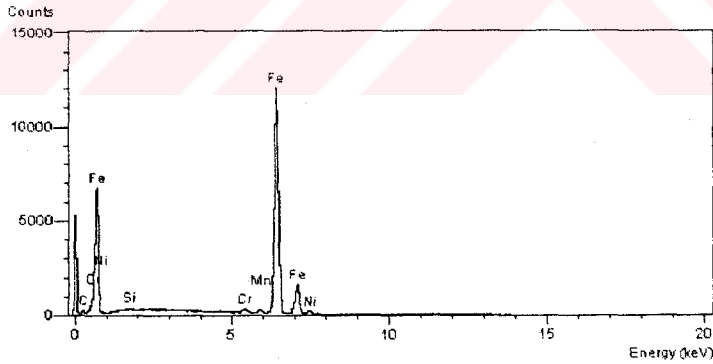
2100 d/d'da AISI 4340 çeliği ile birleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çeliğin Şekil 5.14'de verilen mikroyapı fotoğrafı üzerinde belirlenen bölgelerin EDAX analizleri

1 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



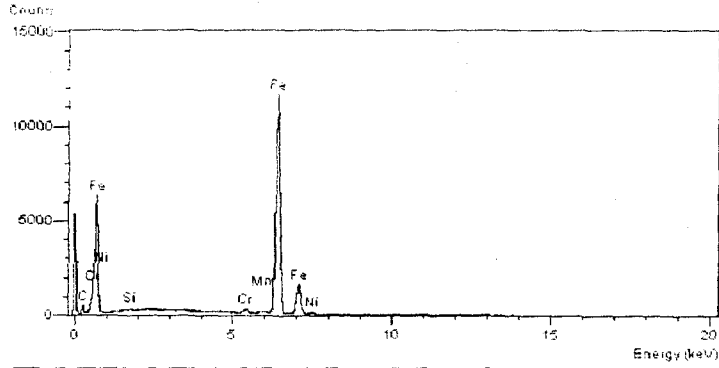
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.546	1.46	3.75	0.19	15.29
Si K	ED	0.741	1.04	0.30	0.05	0.53
Cr K	ED	1.281	1.00	0.93	0.07	0.88
Mn K	ED	0.974	1.00	0.77	0.10	0.69
Fe K	ED	0.994	1.00	92.46	0.27	81.13
Ni K	ED	0.908	1.00	1.79	0.16	1.49
Total				100.00		100.00

2 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



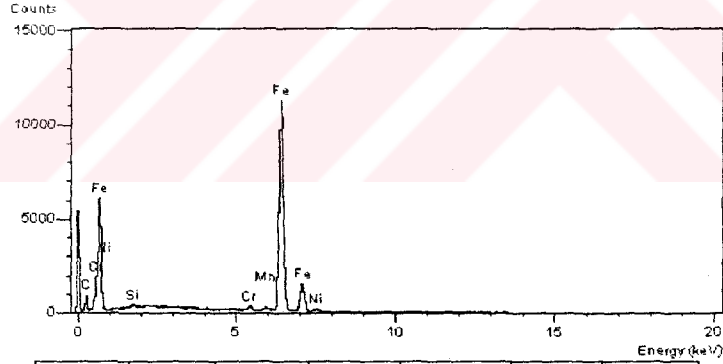
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.547	1.46	3.11	0.19	12.97
Si K	ED	0.741	1.04	0.20	0.05	0.36
Cr K	ED	1.286	1.00	0.71	0.07	0.68
Mn K	ED	0.975	1.00	0.74	0.10	0.67
Fe K	ED	0.995	1.00	93.56	0.27	83.88
Ni K	ED	0.908	1.00	1.69	0.16	1.44
Total				100.00		100.00

3 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



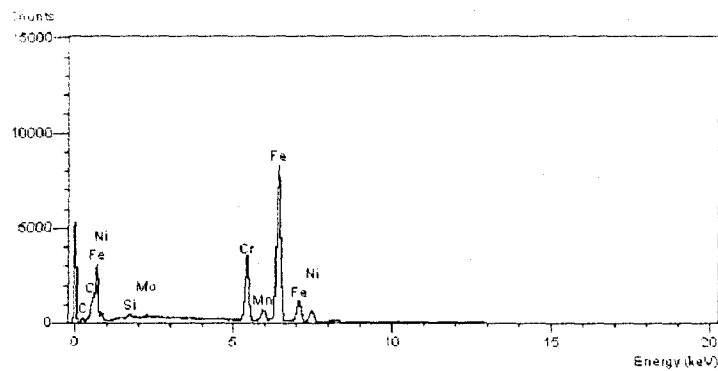
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.548	1.46	6.42	0.20	24.13
Si K	ED	0.744	1.04	0.25	0.05	0.40
Cr K	ED	1.278	1.00	0.76	0.07	0.66
Mn K	ED	0.970	1.00	0.43	0.10	0.35
Fe K	ED	0.989	1.00	90.67	0.28	73.32
Ni K	ED	0.905	1.00	1.48	0.16	1.14
Total				100.00		100.00

4 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



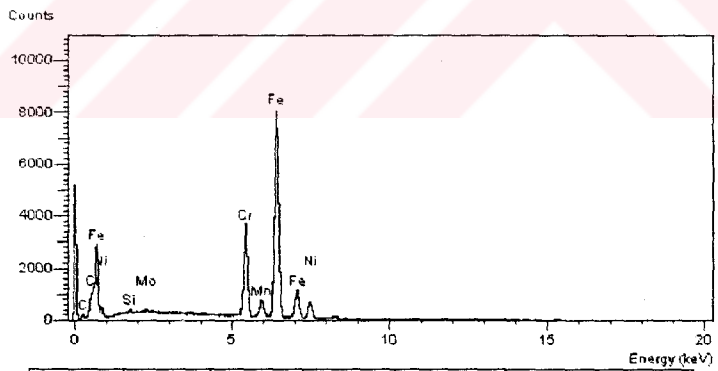
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.551	1.46	11.12	0.23	36.69
Si K	ED	0.750	1.04	0.31	0.05	0.44
Cr K	ED	1.264	1.00	0.81	0.07	0.61
Mn K	ED	0.963	1.00	0.63	0.10	0.46
Fe K	ED	0.982	1.00	85.59	0.28	60.75
Ni K	ED	0.901	1.00	1.54	0.16	1.04
Total				100.00		100.00

5 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



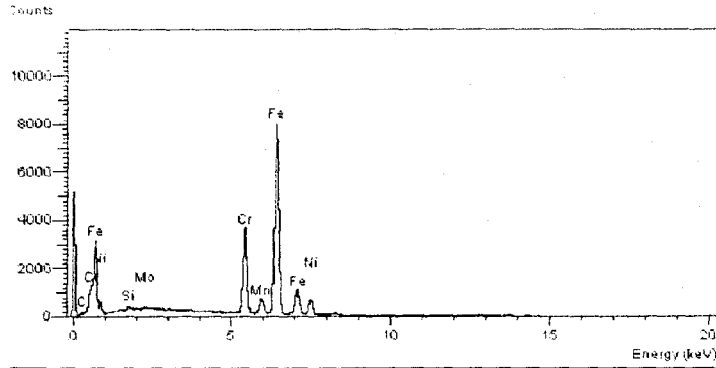
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.554	1.46	4.12	0.19	16.48
Si K	ED	0.752	1.04	0.44	0.05	0.75
Cr K	ED	1.141	1.00	16.88	0.18	15.61
Mn K	ED	0.977	1.00	1.47	0.14	1.28
Fe K	ED	0.975	1.00	69.09	0.32	59.47
Ni K	ED	0.915	1.00	7.54	0.23	6.18
Mo L	ED	0.751	1.04	0.47	0.14	0.23
Total				100.00		100.00

6 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



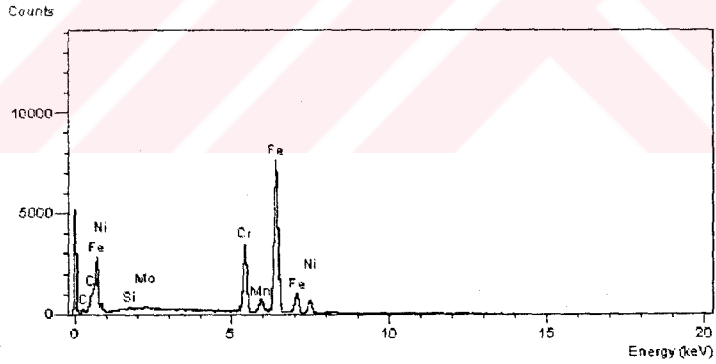
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.558	1.46	2.50	0.17	10.53
Si K	ED	0.750	1.04	0.31	0.05	0.55
Cr K	ED	1.139	1.00	18.58	0.19	18.10
Mn K	ED	0.981	1.00	1.50	0.15	1.39
Fe K	ED	0.976	1.00	68.74	0.32	62.32
Ni K	ED	0.917	1.00	8.07	0.24	6.96
Mo L	ED	0.751	1.04	0.30	0.14	0.16
Total				100.00		100.00

7 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.554	1.46	2.64	0.18	11.06
Si K	ED	0.750	1.04	0.44	0.05	0.78
Cr K	ED	1.136	1.00	19.22	0.19	18.62
Fe K	ED	0.974	1.00	68.70	0.31	61.96
Ni K	ED	0.918	1.00	8.57	0.24	7.35
Mo L	ED	0.750	1.04	0.44	0.15	0.23
Total				100.00		100.00

8 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:

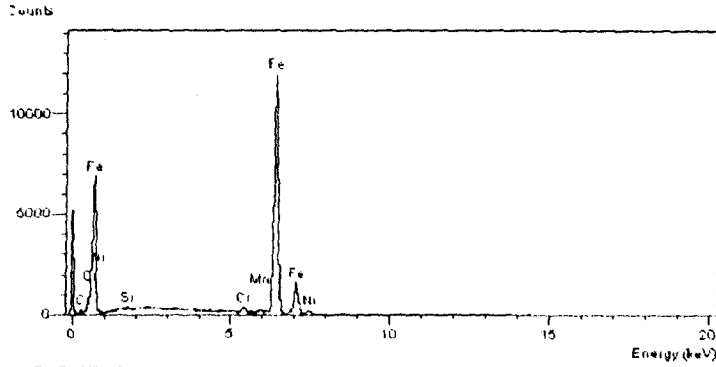


Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.556	1.46	3.16	0.19	13.07
Si K	ED	0.752	1.04	0.32	0.05	0.56
Cr K	ED	1.135	1.00	18.62	0.20	17.77
Mn K	ED	0.980	1.00	1.38	0.15	1.25
Fe K	ED	0.975	1.00	67.72	0.33	60.16
Ni K	ED	0.918	1.00	8.05	0.24	6.80
Mo L	ED	0.752	1.04	0.74	0.15	0.38
Total				100.00		100.00

EK 4

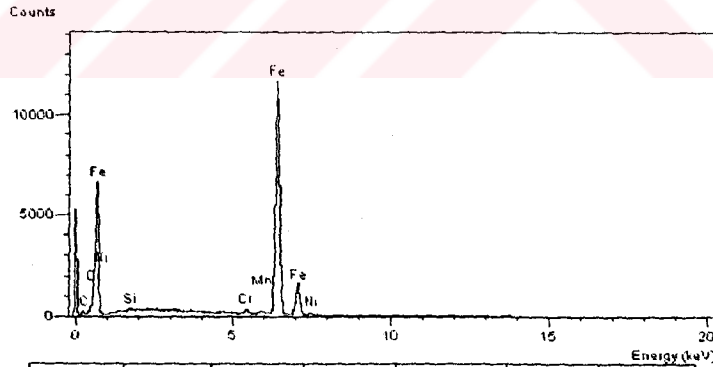
2100 d/d'da AISI 4340 çeliği ile birleştirilmiş AISI 440 paslanmaz çeliğin Şekil 5.16'de verilen mikroyapı fotoğrafı üzerinde belirlenen bölgelerin EDAX analizleri

1 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



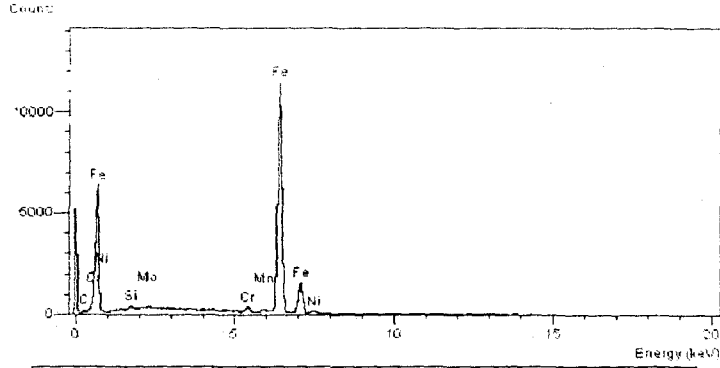
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.547	1.46	2.73	0.18	11.52
Si K	ED	0.740	1.04	0.26	0.05	0.47
Cr K	ED	1.284	1.00	0.92	0.07	0.90
Mn K	ED	0.975	1.00	0.60	0.10	0.55
Fe K	ED	0.995	1.00	93.72	0.27	85.04
Ni K	ED	0.909	1.00	1.77	0.17	1.53
Total				100.00		100.00

2 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



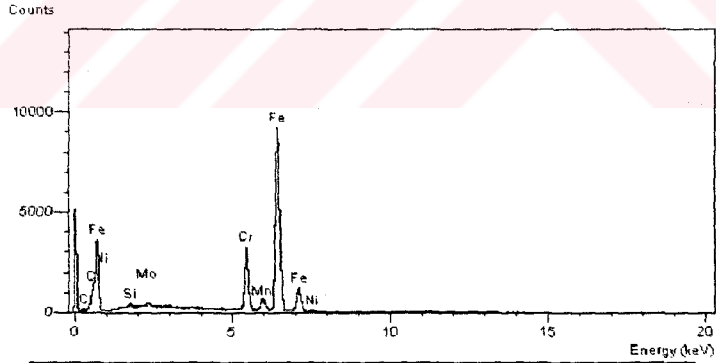
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.546	1.46	2.75	0.18	11.60
Si K	ED	0.740	1.04	0.31	0.05	0.55
Cr K	ED	1.284	1.00	0.89	0.07	0.86
Mn K	ED	0.975	1.00	0.64	0.11	0.59
Fe K	ED	0.995	1.00	93.50	0.27	84.75
Ni K	ED	0.909	1.00	1.91	0.16	1.65
Total				100.00		100.00

3 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.542	1.46	2.48	0.18	10.54
Si K	ED	0.742	1.04	0.43	0.05	0.79
Cr K	ED	1.275	1.00	1.10	0.08	1.08
Mn K	ED	0.975	1.00	0.89	0.11	0.83
Fe K	ED	0.995	1.00	92.69	0.30	84.84
Ni K	ED	0.910	1.00	1.90	0.17	1.66
Mo L	ED	0.745	1.04	0.50	0.14	0.27
Total				100.00		100.00

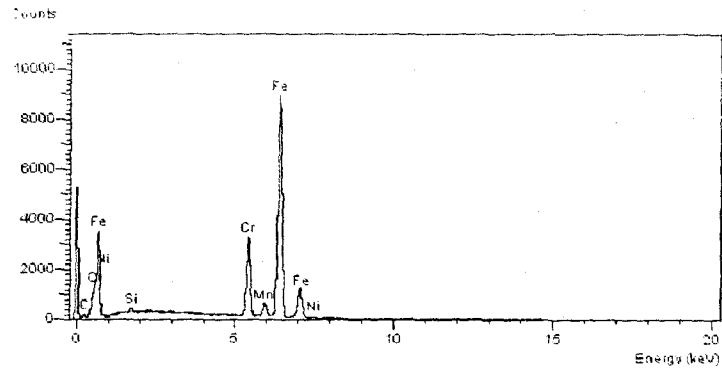
4 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.563	1.46	2.47	0.17	10.41
Si K	ED	0.760	1.04	0.51	0.05	0.92
Cr K	ED	1.164	1.00	15.95	0.18	15.53
Mn K	ED	0.975	1.00	1.30	0.14	1.19
Fe K	ED	0.972	1.00	78.45	0.30	71.14
Ni K	ED	0.911	1.00	0.32	0.14	0.28
Mo L	ED	0.757	1.04	1.01	0.14	0.53
Total				100.00		100.00

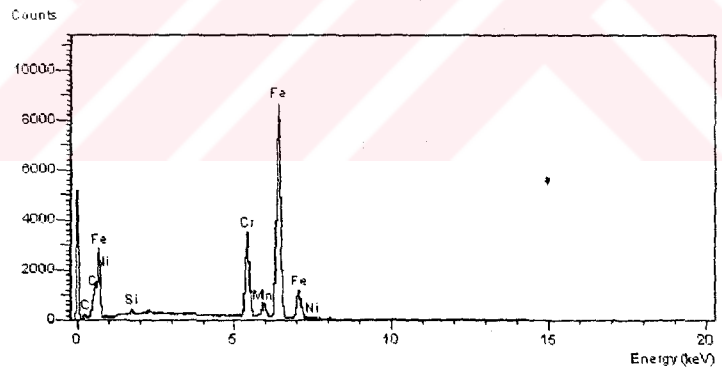
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

5 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



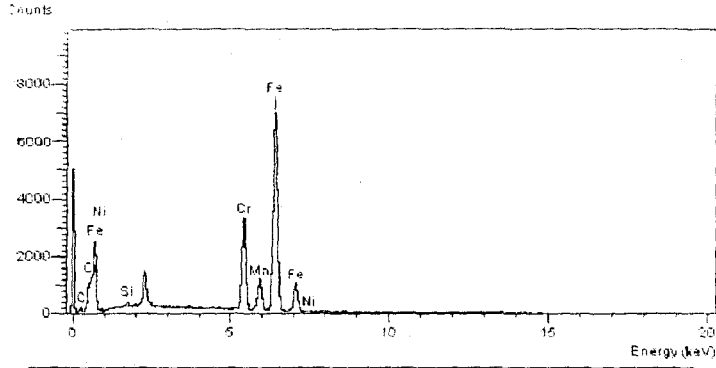
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.568	1.46	2.72	0.18	11.35
Si K	ED	0.757	1.04	0.48	0.05	0.85
Cr K	ED	1.168	1.00	16.32	0.18	15.70
Mn K	ED	0.975	1.00	0.92	0.14	0.84
Fe K	ED	0.971	1.00	79.17	0.28	70.93
Ni K	ED	0.910	1.00	0.39	0.15	0.34
Total				100.00		100.00

6 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.572	1.46	2.67	0.18	11.15
Si K	ED	0.759	1.04	0.46	0.05	0.82
Cr K	ED	1.157	1.00	18.47	0.19	17.78
Mn K	ED	0.975	1.00	0.75	0.15	0.68
Fe K	ED	0.968	1.00	77.30	0.29	69.27
Ni K	ED	0.910	1.00	0.35	0.14	0.30
Total				100.00		100.00

7 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



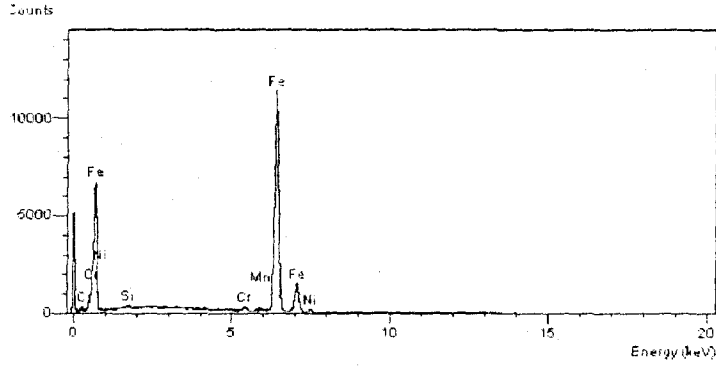
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.577	1.46	3.16	0.19	12.94
Si K	ED	0.764	1.04	0.47	0.05	0.83
Cr K	ED	1.145	1.00	18.79	0.20	17.78
Mn K	ED	0.975	1.00	6.00	0.19	5.37
Fe K	ED	0.967	1.00	71.25	0.30	62.79
Ni K	ED	0.911	1.00	0.34	0.15	0.28
Total				100.00		100.00

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

EK 5

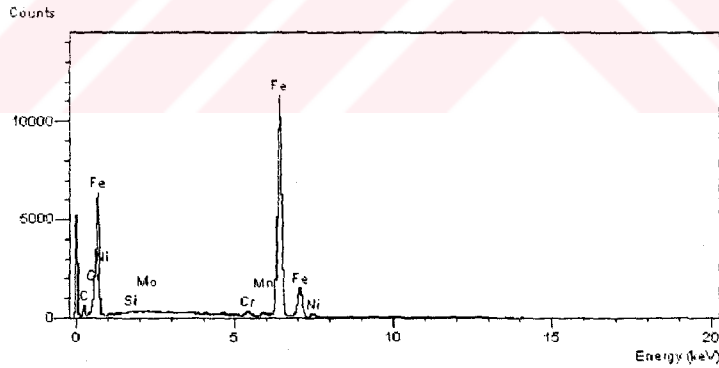
2100 d/d'da AISI 4340 çeliği ile birleştirilmiş AISI 430 paslanmaz çeliğin Şekil 5.17'de verilen mikroyapı fotoğrafı üzerinde belirlenen bölgelerin EDAX analizleri

1 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



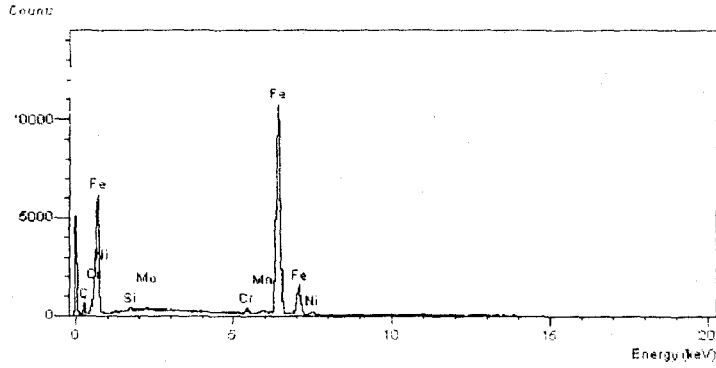
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.546	1.46	4.26	0.20	17.11
Si K	ED	0.742	1.04	0.28	0.05	0.48
Cr K	ED	1.282	1.00	0.82	0.07	0.77
Mn K	ED	0.973	1.00	0.47	0.11	0.41
Fe K	ED	0.993	1.00	92.50	0.28	79.87
Ni K	ED	0.907	1.00	1.67	0.16	1.37
Total				100.00		100.00

2 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



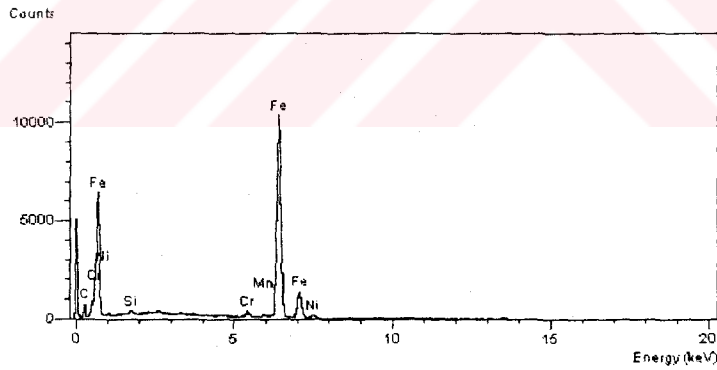
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.548	1.46	7.69	0.22	27.93
Si K	ED	0.746	1.04	0.16	0.05	0.25
Cr K	ED	1.271	1.00	0.73	0.07	0.61
Mn K	ED	0.968	1.00	0.74	0.10	0.59
Fe K	ED	0.988	1.00	88.76	0.31	69.29
Ni K	ED	0.905	1.00	1.61	0.16	1.20
Mo L	ED	0.748	1.04	0.30	0.13	0.13
Total				100.00		100.00

3 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



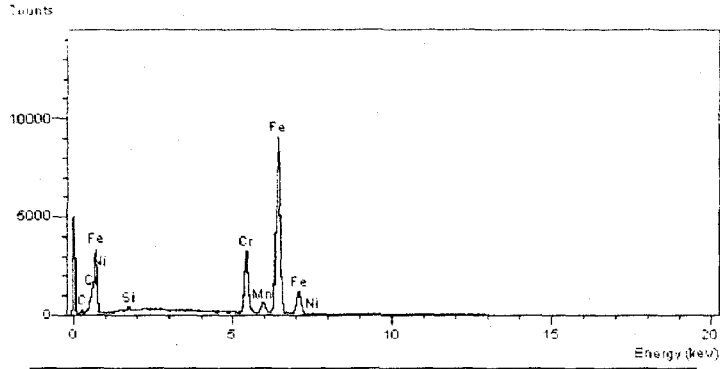
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.545	1.46	7.84	0.22	28.30
Si K	ED	0.747	1.04	0.36	0.05	0.56
Cr K	ED	1.263	1.00	1.09	0.07	0.91
Mn K	ED	0.968	1.00	0.80	0.11	0.63
Fe K	ED	0.987	1.00	87.74	0.31	68.11
Ni K	ED	0.905	1.00	1.80	0.16	1.33
Mo L	ED	0.748	1.04	0.37	0.14	0.17
Total				100.00		100.00

4 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



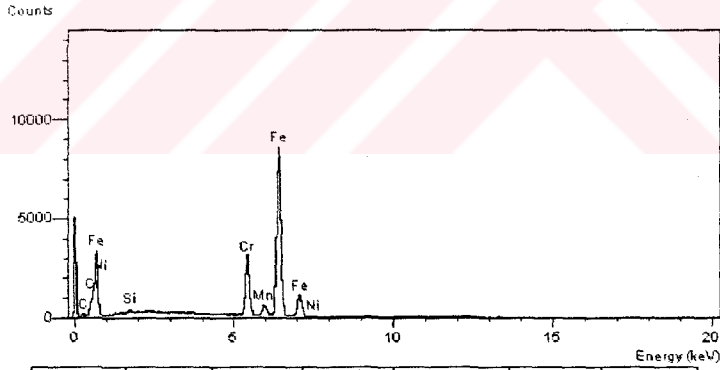
Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.548	1.46	9.44	0.23	32.55
Si K	ED	0.748	1.04	0.38	0.05	0.57
Cr K	ED	1.263	1.00	1.09	0.07	0.86
Mn K	ED	0.965	1.00	0.70	0.11	0.53
Fe K	ED	0.984	1.00	86.50	0.30	64.16
Ni K	ED	0.903	1.00	1.89	0.17	1.33
Total				100.00		100.00

5 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.568	1.46	3.79	0.19	15.25
Si K	ED	0.758	1.04	0.51	0.05	0.87
Cr K	ED	1.166	1.00	16.10	0.18	14.97
Mn K	ED	0.973	1.00	0.92	0.14	0.81
Fe K	ED	0.969	1.00	78.32	0.28	67.80
Ni K	ED	0.909	1.00	0.36	0.14	0.29
Total				100.00		100.00

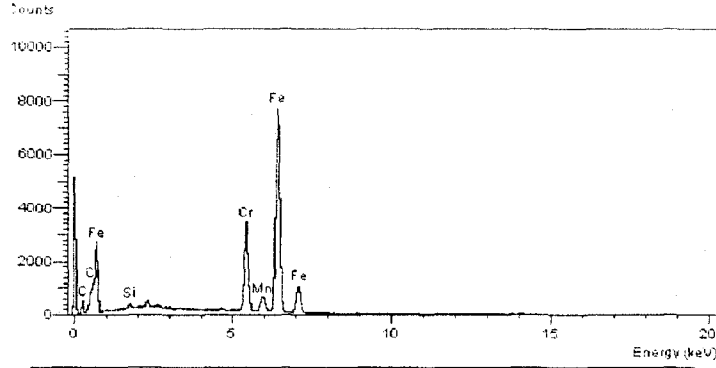
6 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.567	1.46	2.20	0.18	9.32
Si K	ED	0.757	1.04	0.61	0.05	1.11
Cr K	ED	1.167	1.00	16.55	0.18	16.18
Mn K	ED	0.975	1.00	0.90	0.15	0.83
Fe K	ED	0.971	1.00	79.45	0.29	72.31
Ni K	ED	0.910	1.00	0.29	0.14	0.25
Total				100.00		100.00

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

7 Nolu Bölgenin Nokta Analizi:



Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.576	1.46	6.87	0.22	25.17
Si K	ED	0.765	1.04	0.49	0.05	0.77
Cr K	ED	1.143	1.00	18.73	0.19	15.85
Mn K	ED	0.968	1.00	1.43	0.15	1.14
Fe K	ED	0.960	1.00	72.48	0.28	57.07
Total				100.00		100.00

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULTAYI
DOKÜMANTASYON BİREKİMİ