

**DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YORULMA
DAVRANIŞLARINA ÇELİK TEMİZLİĞİNİN ETKİSİ**

Yüksek Lisans Tezi

Barış KARABAYRAK

Eskişehir, 2017

**DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YORULMA
DAVRANIŞLARINA ÇELİK TEMİZLİĞİNİN ETKİSİ**

Barış KARABAYRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Dilek TURAN

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Ocak, 2017

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Barış KARABAYRAK'ın "Düşük Alaşımli Çeliklerin Yorulma Davranışlarına Çelik Temizliğinin Etkisi" başlıklı tezi 05/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Dilek TURAN	
Üye	: Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Asiye Akile YILDIRIM	

.....
Enstitü Müdürü

ÖZET

DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN YORULMA DAVRANIŞLARINA ÇELİK TEMİZLİĞİNİN ETKİSİ

Barış KARABAYRAK

Uçak Gövde-Motor Bakım Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak, 2017

Danışman: Doç. Dr. Dilek TURAN

Çelik geniş bir kullanım alanına sahip olan önemli bir malzeme olup, çelik üretiminde son yıllarda üzerinde durulan en önemli konu temiz çelik olarak tabir edilen çeliği elde edebilmektir. Çelik üretim sürecinde Al ile deokside edilmiş çeliklerde bulunan en temel kalıntılar Al_2O_3 ve MnS kalıntılarıdır. Al ile deokside edilmiş çeliklere kalsiyum işlemi uygulanarak temiz çelik elde edilmektedir. Bu çalışmada, işlemsiz ve kalsiyum işlemi uygulanarak çelik temizliği yapılmış düşük alaşımlı çeliklerin yorulma dayanımları incelenmiştir. Bunun için öncelikle yorulma testleri yapılacak, işlemsiz ve çelik temizliği yapılmış düşük alaşımlı çelik malzemelerin akma yükleri belirlenmiştir. Bu akma yüklerine göre belirlenen yük değerleri ile malzemelerin sabit genlikli eksenel yükler altında yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde yük oranı 0,1 olarak alınmıştır, maksimum yük değerleri ise 18 kN, 16,5 kN ve 15,5 kN olarak belirlenmiştir. Yorulma testi sonuçlarına göre işlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelere ait S-N (gerilme-ömür) diyagramları oluşturulmuştur. Test sonuçlarının yorumlanmasında optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, çelik temizliği yapılan numunelerin yorulma dayanımı işlemsiz numunelerin yorulma dayanımına yakın olmakla beraber, bir miktar düşük olarak ölçülmüştür. Çelik malzeme içerisinde yer alan kalıntıların şekil, boyut, adet ve yapı içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak yorulma ömrünü etkilediği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Çelik, Çelik temizliği, Yorulma, S-N diyagramı, Mikroyapı

ABSTRACT

AFFECT OF STEEL CLEANLINESS TO FATIGUE BEHAVIOURS OF THE LOW ALLOY STEELS

Barış KARABAYRAK

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Anadolu University, Graduate School of Science, January, 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Dilek TURAN

Steel is an important material with a wide range of usage area and in recent years, the most important issue for steel making process is to produce clean steel. During steel making process, the basic inclusions are Al_2O_3 and MnS for Aluminum-killed steels. Calcium treatment is used to produce clean steel in Aluminum-killed steels. In this study, fatigue strengths of the low alloy steels was examined with untreated and calcium treatment applied samples. Firstly, yield loads of low alloy steels for untreated and steel cleanliness applied materials were determined before the fatigue tests. Fatigue tests were performed under the constant amplitude axial loads and load values were determined according to yield loads. In the experiments conducted, load ratio was taken as 0,1 and the maximum load values were determined as 18 kN, 16,5 kN and 15,5 kN. According to the fatigue test results, S-N (stress-life) diagrams was created for untreated and steel cleanliness applied samples. The interpretation of the test results in an optical microscope and scanning electron microscope (SEM) was used. As a result of the study, fatigue strength of steel cleanliness applied samples is close to fatigue strength of untreated samples, although a lower amount was measured. It was observed that the inclusions which are contained in the steel material affect the fatigue life, depending on their shape, size, quantity and distribution within the structure.

Keywords: Steel, Steel cleanliness, Fatigue, S-N diagram, Microstructure

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında her aşamada bana destek olan ve değerli görüşlerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Dilek TURAN'a, görüş ve yönlendirmeleriyle tezin zenginleşmesine katkıda bulunan Prof. Dr. Servet TURAN'a, deneysel çalışmalardaki yardımları için Öğr. Gör. Ramazan KALE'ye, mikroyapı çalışmalarındaki katkıları için Uzm. Sinem BAŞKUT'a ve Alper ÇINAR'a en içten kalbimle teşekkür ederim.

Bugüne dek beni her zaman destekleyen, hiçbir fedakârlıktan kaçınmayarak maddi manevi hep yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

05/01/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “Bilimsel İntihal Tespit Programı” ile tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Barış KARABAYRAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİK	3
2.1. Çeliğin Tanımı ve Özellikleri	3
2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması	4
2.2.1. Düşük alaşımlı çelikler	6
2.2.1.1. Düşük karbonlu çelikler	7
2.2.1.2. Orta karbonlu çelikler	7
2.2.1.3. Yüksek karbonlu çelikler	7
2.2.2. Alaşımlı çelikler	7
2.3. Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi	8

2.3.1. Karbon (C)	9
2.3.2. Mangan (Mn).....	10
2.3.3. Silisyum (Si)	10
2.3.4. Kükürt (S)	10
2.3.5. Kurşun (Pb).....	10
2.3.6. Selenyum (Se).....	11
2.3.7. Fosfor (P)	11
2.3.8. Kalsiyum (Ca)	11
2.3.9. Krom (Cr)	11
2.3.10. Nikel (Ni)	11
2.3.11. Seryum (Ce)	12
2.3.12. Molibden (Mo)	12
2.3.13. Vanadyum (V)	12
2.3.14. Volfram (W).....	12
2.3.15. Niobyum (Nb).....	13
2.3.16. Titanyum (Ti).....	13
2.3.17. Kobalt (Co)	13
2.3.18. Alüminyum (Al).....	13
2.3.19. Bor (B)	13
2.3.20. Bakır (Cu)	13
2.3.21. Azot (N)	14
2.3.22. Oksijen (O)	14
2.3.23. Hidrojen (H)	14
2.3.24. Zirkonyum (Zr).....	14
2.4. Çelik Temizliğinin Çelik Yapısına Etkisi	14
3. YORULMA.....	18

3.1. Yorulmanın Tanımı	18
3.2. Yorulma Olayının Meydana Gelişi	18
3.3. Yorulma Türleri.....	21
3.4. Yorulma Deneyi	21
3.4.1. Yorulma deneyi türleri.....	22
3.4.2. Yorulma deneyi cihazları	23
3.4.3. Yorulma deneyi numunesi.....	23
3.4.4. Yorulma deneyi ile ilgili terimler	25
3.4.5. S-N diyagramı (Wöhler diyagramı).....	27
3.5. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler	28
3.5.1. Parça geometrisi.....	29
3.5.2. Üretim süreci	29
3.5.3. Yük dağılımı	30
3.5.4. Çevresel etkiler	30
3.5.5. Malzemenin mikro yapısı.....	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme	37
4.2. Sertlik Testlerinin Yapılması	37
4.3. Çekme ve Yorulma Test Cihazı	38
4.4. Çekme ve Yorulma Test Numunelerinin Hazırlanması	40
4.5. Çekme Testlerinin Yapılması.....	41
4.6. Yorulma Testlerinin Yapılması	43
4.7. Mikroyapı İncelemeleri	46
4.7.1. Numune hazırlama	46
4.7.2. Optik mikroskop incelemeleri	48
4.7.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri	48

4.7.4. Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) incelemeleri	49
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	50
5.1. Mekanik Test Sonuçları	50
5.2. Mikro Yapı Sonuçları.....	53
5.3. Kırık Yüzey İncelemeleri	66
6. GENEL SONUÇLAR	68
KAYNAKÇA	69
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Çelikler üzerinde alaşım elementlerinin etkisi	9
Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik malzemenin kimyasal bileşimi	37
Tablo 4.2. Çekme testi numune ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir)	40
Tablo 4.3. Yorulma testi numune ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir)	41
Tablo 4.4. Çelik temizliği yapılmayan numunenin çekme testi sonuçları	43
Tablo 4.5. Çelik temizliği yapılan numunenin çekme testi sonuçları	43
Tablo 4.6. Yorulma testlerinde kullanılan değerler	44
Tablo 4.7. Otomatik parlatma aşamaları	47
Tablo 5.1. Çelik temizliğinin sertlik testi sonuçlarına etkisi	50
Tablo 5.2. Çelik temizliğinin çekme testi sonuçlarına etkisi	50
Tablo 5.3. Çelik temizliğinin yorulma testi sonuçlarına etkisi	52
Tablo 5.4. Nokta EDS analizine ait nicel sonuçlar (ağırlıkça %)	64
Tablo 5.5. Genel EDS analizine ait nicel sonuçlar (ağırlıkça %)	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılması	5
Şekil 2.2. Çeliklerin karbon miktarı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler	6
Şekil 2.3. Çelik yapısında bulunan oksit ve sülfid kalıntıları	15
Şekil 3.1. Yorulma çatlak ilerlemesinin üç aşaması	19
Şekil 3.2. Çelik bir malzemede görülen yorulma kırığının yüzeyi	20
Şekil 3.3. Yorulma türleri	21
Şekil 3.4. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri	24
Şekil 3.5. Yorulma deneyi ile ilgili terimlerin gerilme – zaman grafiğinde sinüzoidal yükleme tipi için gösterilmesi	25
Şekil 3.6. Çelik malzeme ve demir dışı malzemelere ait S-N eğrileri	28
Şekil 3.7. ASTM standartlarına göre tane büyüklükleri belirlenen malzemeler	32
Şekil 3.8. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi	34
Şekil 3.9. Düşük alaşımlı bir karbon çeliğinde bulunan MnS kalıntısı	35
Şekil 3.10. Yüksek mukavemetli bir çelik içerisinde bulunan cüruf kalıntısı	36
Şekil 4.1. a) Sertlik testlerinin yapıldığı sertlik ölçüm cihazı b) Sertlik testlerinin uygulandığı numuneler	38
Şekil 4.2. Çekme ve yorulma testlerinin yapıldığı Instron test cihazı	39
Şekil 4.3. Çekme testi numune geometrisi	40
Şekil 4.4. Yorulma testi numune geometrisi	41

Şekil 4.5. Çekme testi sonucu kopan numune	42
Şekil 4.6. MAX V5,0 programında sinüs eğrisi şeklinde uygulanan çevrimsel yüklemeye	45
Şekil 4.7. Kırılarak kopan yorulma testi numunesi	46
Şekil 4.8. Kesme işleminden sonra elde edilen kırık numuneler	47
Şekil 4.9. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler	48
Şekil 5.1. Çelik temizliği yapılmayan numunenin gerilme – şekil değişimi grafiği	51
Şekil 5.2. Çelik temizliği yapılan numunenin gerilme – şekil değişimi grafiği	51
Şekil 5.3. Yorulma testleri sonucunda çizilen S-N eğrileri	52
Şekil 5.4. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin optik mikroskop ile incelenmesi	53
Şekil 5.5. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) dağlanmış numunelerin optik mikroskop ile incelenmesi	54
Şekil 5.6. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin 435 X büyütmedeki SEM görüntüleri	55
Şekil 5.7. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin 304 X büyütmedeki SEM görüntüleri	56
Şekil 5.8. Çelik temizliği yapılmayan numunede yer alan küresel biçimde olmayan bir kalıntının SEM görüntüsü	57
Şekil 5.9. Çelik temizliği yapılan numunede yer alan küresel biçimde olan bir kalıntının SEM görüntüsü	58
Şekil 5.10. Çelik temizliği yapılan numunede yer alan küresel biçimde olmayan bir kalıntının SEM görüntüsü	58
Şekil 5.11. Çelik temizliği yapılan numunede yer alan bir kalıntının boyutu	59
Şekil 5.12. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) dağlanmış numunelerin tane boyutlarının incelenmesi	61
Şekil 5.13. Nokta EDS analizlerinin yapılması	62

Şekil 5.14. Genel EDS analizlerinin yapılması	63
Şekil 5.15. Kalıntıların görüntü analiz teknikleriyle yüzdelerinin hesaplanması (a) işlemsiz numune (b) çelik temizliği uygulanan numune	65
Şekil 5.16. Maksimum yükün 18 kN olarak uygulandığı yorulma testi sonrasında kırılan numuneler (a) işlemsiz (b) çelik temizliği yapılmış	66
Şekil 5.17. Maksimum yükün 16,5 kN olarak uygulandığı yorulma testi sonrasında kırılan numuneler (a) işlemsiz (b) çelik temizliği yapılmış	66
Şekil 5.18. Maksimum yükün 15,5 kN olarak uygulandığı yorulma testi sonrasında kırılan numuneler (a) işlemsiz (b) çelik temizliği yapılmış	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Gerilme Oranı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSE	: Geri Yansımali Elektron
°C	: Derece Celsius
CE	: Karbon Eşdeğeri
dk	: Dakika
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi
F	: Yük
HV	: Vickers Sertliği
Hz	: Hertz
kg	: Kilogram
kN	: Kilo Newton
max	: Maksimum
min	: Minimum
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Pascal
N	: Çevrim Sayısı
ppm	: Milyonda Bir
R	: Gerilme Oranı
σ_a	: Gerilme Genliği
σ_{ds}	: Yorulma Dayanımı Sınırı
σ_m	: Ortalama Gerilme

$\sigma_{\max}$	: Maksimum Gerilme
$\sigma_{\min}$	: Minimum Gerilme
σ_r	: Gerilme Aralığı
S	: Gerilme
SE	: İkincil Elektron
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
S-N	: Gerilme - Ömür
sn	: Saniye

1. GİRİŞ

Çelik geniş bir kullanım alanına sahip olan önemli bir malzeme olup, çelik üretiminde son yıllarda üzerinde durulan en önemli konu temiz çelik olarak tabir edilen çeliği elde edebilmektir.

Çeliğin temizliği, metalik olmayan kalıntılardan arınmış olması manasına gelmektedir. Bu kalıntılar şekil, boyut, adet ve yapı içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak çeliklerin yorulma ömrünü etkileyecektir. Bu yüzden, temiz çelik elde edebilmek için yapıdaki kalıntıların azaltılması ve modifiye edilerek zararsız kalıntılara dönüştürülmesi gerekmektedir.

Çelik üretim sürecinde Al ile deokside edilmiş çeliklerde bulunan en temel kalıntılar Al_2O_3 ve MnS kalıntılarıdır. Bu kalıntılar nihai ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerinin bozulmasına sebep olurlar. Ayrıca şekillendirme ve kaynak işlemi sırasında çatlak oluşumuna ve kırılmaya yol açabilirler. Uygulanan kalsiyum işlemi ile çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerine olumsuz etki edebilecek kalıntıların azaltılması ve modifiye edilerek zararsız hale dönüştürülmesi mümkündür. Kalsiyum işleminde ideal koşullar oluşturulamadığı takdirde çelik temizliğinin artırılmasının aksine çelik kirliliğinde bir artış olacaktır.

Al ile deokside edilmiş çeliklere kalsiyum işlemi uygulanarak temiz çelik elde edilmektedir. Bu işlemin çelik malzemelerin yorulma davranışına etkileri konusunda yeterli çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, işlemsiz ve kalsiyum işlemi uygulanarak çelik temizliği yapılmış düşük alaşımlı çeliklerin yorulma dayanımları incelenmiştir. Bunun için öncelikle yorulma testleri yapılacak, işlemsiz ve çelik temizliği yapılmış düşük alaşımlı çelik malzemelerin akma yükleri belirlenmiştir. Bu akma yüklerine göre belirlenen yük değerleri ile malzemelerin sabit genlikli eksenel yükler altında yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde yük oranı 0,1 olarak alınmıştır, maksimum yük değerleri ise 18 kN, 16,5 kN ve 15,5 kN olarak belirlenmiştir. Yorulma testi sonuçlarına göre işlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelere ait S-N (gerilme-ömür) diyagramları oluşturulmuştur.

Test sonuçlarının yorumlanmasında optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, çelik temizliği yapılan

numunelerin yorulma dayanımı işlemsiz numunelerin yorulma dayanımına yakın olmakla beraber, bir miktar düşük olarak ölçülmüştür. Çelik malzeme içerisinde yer alan kalıntıların şekil, boyut, adet ve yapı içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak yorulma ömrünü etkilediği görülmüştür.

2. ÇELİK

2.1. Çeliğin Tanımı ve Özellikleri

Metalik malzemeler, demir esaslı ve demir dışı malzemeler olmak üzere ikiye ayrılır. Demir esaslı malzemeler, kimyasal bileşiminde demir (Fe) elementinin ana bileşen olarak yer aldığı malzemeler olarak tanımlanır ve çelik ile dökme demirleri kapsar. Demir esaslı malzemelerin oldukça yaygın olarak kullanılması şu faktörlere bağlıdır: Demir içeren bileşikler yeryüzünde bol miktarda bulunmaktadır; demir metalinin cevherden ayrıştırılması, arıtılması, alaşımlandırılması ve imal edilmesi işlemleri göreceli olarak daha ekonomik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir; demir alaşımlarına çok değişik aralıklarda mekanik ve fiziksel özellikler kazandırılabilir. Demir esaslı malzemelerin büyük çoğunluğuna ait en önemli sorun, korozyona olan eğilimlerinin fazla olmasıdır.

Çelikler demir-karbon (Fe-C) alaşımları olup, diğer bazı alaşım elementlerini de bileşimlerinde bulundurabilir. Çok farklı bileşimde ve/veya değişik ısıtma işlem uygulamalarına tabi tutulmuş binlerce çelik türü bulunmaktadır. Çeliklerin mekanik özellikleri içerdikleri karbon miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir ve karbon miktarı çoğunlukla % 1'in altındadır (Callister and Rethwisch, 2014, s. 394).

Çeliklerin sahip olduğu özellikler, içerdikleri elementlerin kimyasal bileşimi ve mikroyapı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Çeliklerin büyük çoğunluğu ısıtma işlemlere karşı duyarlı olduğundan kimyasal bileşimin yanı sıra uygulanan ısıtma işlemleri sayesinde istenilen sertlik, mekanik ve fiziksel özellik, elektriksel özellik, korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanım özelliklerine sahip olabilmektedir. Çelikler gerekli sıcaklıklara ısıtıldığında şekillenebilme özelliğine kavuşmaktadırlar. Kimyasal bileşimi ve içyapısı uygun olan çelikler soğuk olarak da şekillendirilebilir. Östenitik olmayan çelikler (çeliklerin büyük bölümü) mıknatıslanabilir. Çelik, talaş kaldırıcı tezgâhlarda işlenerek istenilen şekil ve yüzey düzgünlüğü elde edilebilir. Kimyasal bileşimi uygun olan çelikler kaynak metodu ile birleştirilebilir. Çeliklerin çoğu metal ile kaplanmaya, emaye yapılmaya, boyanmaya ve plastik maddeler ile kaplanmaya elverişlidir. Çeliklerin düşük alaşımlı olanları genelde asitlerden ve koroziv tuz çözeltilerinden etkilenir fakat alkalilerden etkilenmezler. Özel alaşımlı çelikler ise yüksek korozyon direncine sahiptirler (Yaşar, 2001, s. 230).

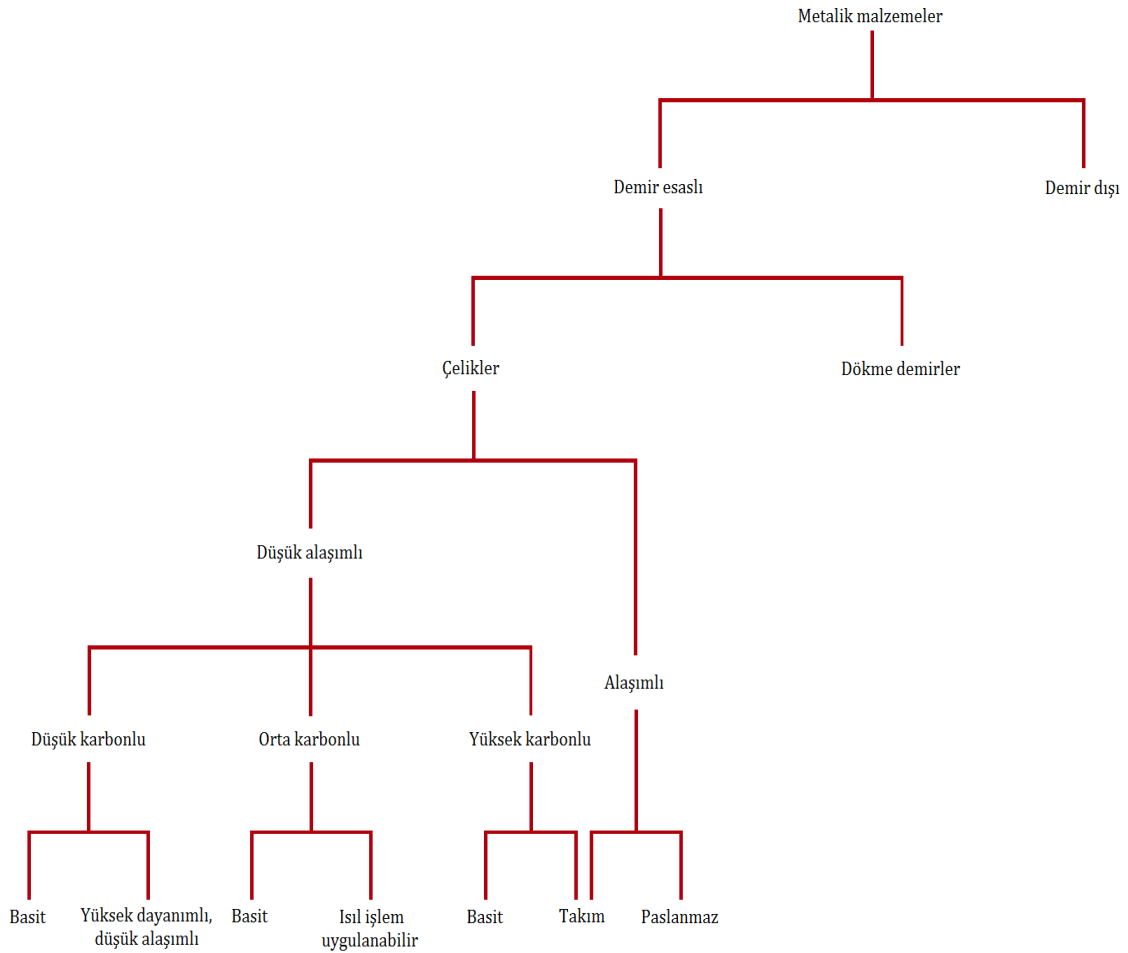
Çeliğin esas metali demir elementidir ve kaynağı doğadaki demir oksitlerdir. Bu oksitler yüksek fırınlarda indirgendikten sonra, yüksek fırınlardan sıvı ham demir alınır. Ham demirdeki kükürt giderildikten sonra, içerisinde yüksek oranda bulunan karbon yakılarak azaltılır. Karbon yakma şekline göre değişik çelik üretme teknikleri geliştirilmiştir. En çok kullanılan üretim tekniğinde, içerisinde ham demirin yer aldığı konvertere saf oksijen üflenerek ham demirin içindeki karbon yakılıp belirli seviyelere getirilir ve böylece sıvı çelik elde edilmiş olunur. Karbon yakma işlemi esnasında artan sıcaklığı düşürmek için hurda ilavesi yapılmaktadır. İstenilen alaşım elementleri ilave edildikten sonra potaya alınan sıvı çelik, pota metalürjisi işlemlerinin ardından sürekli döküm tesislerine gönderilerek sürekli döküm veya kalıba döküm sonrasında yarı mamul haline getirilmektedir (Can, 2006, s. 161).

2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler daha kolay incelenebilmek için sınıflandırılmaktadırlar. Çelikler sınıflandırılırken bir çelik türü için birkaç farklı sınıflandırma yapılabileceği için çeliklerin sınıflandırılmasında kesin bir sınır bulunmamaktadır. Çeliklerin sınıflandırılması, çeliklerin bazı ortak özelliklere dayanarak gruplara ayrılması veya sistematik olarak düzenlenmesidir. Çelikleri şu şekilde sınıflandırmak mümkündür: Bileşimine göre; örneğin basit (yalın) karbonlu çelik veya alaşımlı çelik. Üretim metoduna göre; örneğin Bazık Oksijen Fırını çeliği veya Elektrik Ark Fırını çeliği. Son işlem metoduna göre; örneğin sıcak haddelenmiş veya soğuk haddelenmiş levha. Mikroyapısına göre; örneğin ferritik veya martensitik. Gerekli dayanım seviyesine göre; ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarında belirtildiği gibi. Isıl işleme göre; örneğin tavlanmış veya su verilmiş ve menevişlenmiş. Kalite tanımlayıcısına göre; örneğin dövme kalitesi veya yapısal kalite. Mamul şekillerine göre; örneğin çubuk, levha, şerit (Davis, 2015, s. 203).

Çelikler için yapılan bu sınıflandırmalardan en yaygın olarak kullanılanı bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılmasıdır. Çeliklerin düşük karbonlu, orta karbonlu ve yüksek karbonlu çelikler olarak alt gruplara ayrıldığı sınıflandırma türü Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Bileşimine göre çelikleri Şekil 2.1'deki gösterimlerinden farklı olarak basit (yalın) karbonlu çelikler ve alaşımlı çelikler olarak da sınıflandırmak mümkündür. Basit karbonlu çelikler sadece karbon içermemekle birlikte, çelik üretimi sırasında hammaddeden kaynaklanan mangan (Mn), fosfor (P), kükürt (S) ve silisyum (Si) elementlerinden maksimum mangan limiti % 1,65'i ve maksimum silisyum limiti % 0,60'ı geçmemelidir (Singh, 2016, s. 57). Alaşımlı çelikler ise özellikle belirli miktarlarda ilave edilmiş olan alaşım elementlerini içeren çeliktir.

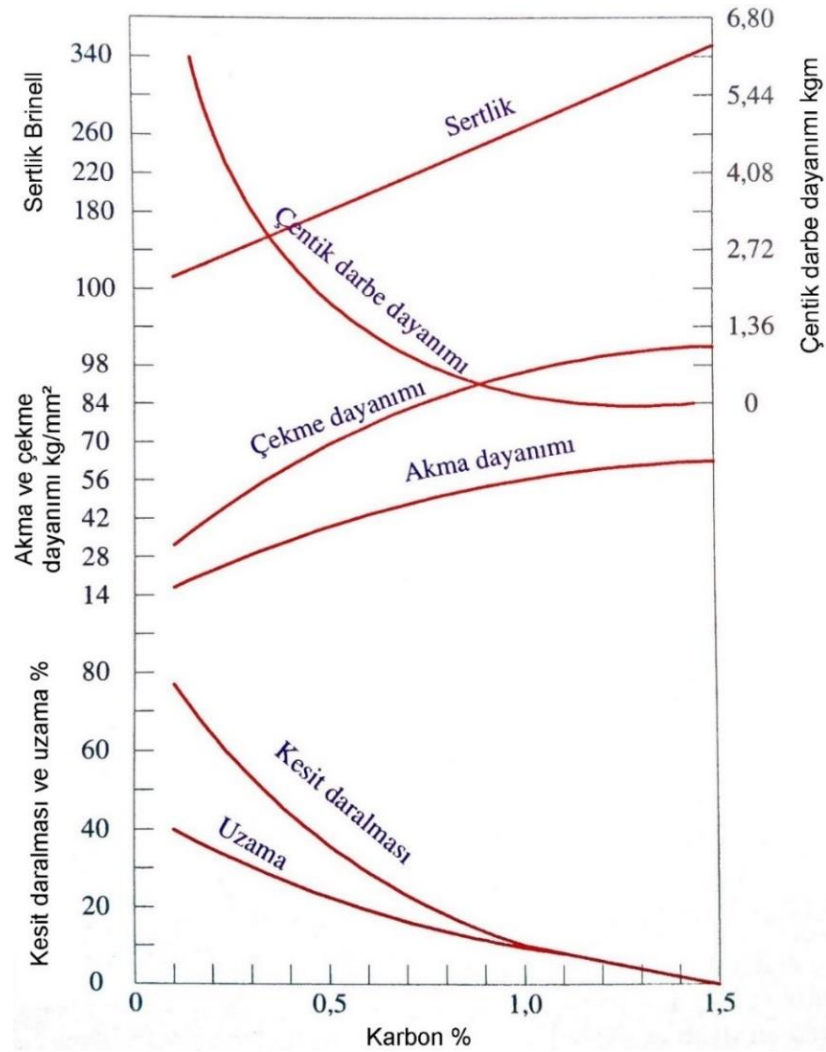


Şekil 2.1. Bileşimine göre çeliklerin sınıflandırılması

Kaynak: Callister and Rethwisch, 2014, s. 393

2.2.1. Düşük alaşımlı çelikler

Karbon yüzdelere göre çelikler, genel ve kesin olmayan bir ifadeyle, içerdikleri karbon miktarına göre *düşük karbonlu çelik* (karbon oranı % 0,25'e dek), *orta karbonlu çelik* (karbon oranı % 0,25 ile % 0,6 arası) ve *yüksek karbonlu çelik* (karbon oranı % 0,6 ile % 1,4 arası) olarak sınıflandırılır (Callister and Rethwisch, 2014, s. 396). Çeliklerde karbon miktarı arttıkça mekanik özelliklerin nasıl değiştiği Şekil 2.2'de verilmiştir. Artan karbon miktarı ile birlikte çeliklerde sertlik, akma ve çekme dayanımı artarken süneklik (% uzama ve % kesit daralması) ve darbe dayanımının azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.2. Çeliklerin karbon miktarı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler

Kaynak: Dikeç, 2010, s. 73

2.2.1.1. Düşük karbonlu çelikler

Bu çelik sınıfının çoğunluğunu genellikle sac veya şerit gibi düz haddelenmiş ürünler oluşturmaktadır. Çok düşük miktarda karbon içerdikleri için kolay şekillendirilebilirler (Singh, 2016, s. 59). Tüm çelik türleri içinde en çok üretilen ve en geniş kullanım alanına sahip düşük karbonlu çelikler nispeten yumuşak ve düşük dayanımın yanı sıra, yüksek süneklik ve tokluğa sahiptir. Ayrıca bu çelikler talaşlı imalata, kaynakla birleştirmeye uygun özellikler sergilemekte olup diğer tüm çeliklere oranla daha düşük maliyetle üretimleri mümkündür. Otomotiv sektöründe, çeşitli mühendislik yapılarının imalatında düşük karbonlu çelik kullanılmaktadır (Callister and Rethwisch, 2014, s. 394).

2.2.1.2. Orta karbonlu çelikler

Bileşimindeki karbon miktarı arttığından düşük karbonlu çeliklere göre daha serttirler. Orta karbonlu çeliklerin ısıtılma işlemi ile mekanik özelliklerini iyileştirmek mümkündür (Callister and Rethwisch, 2014, s. 395). Şaftlar, akslar, dişliler, krank mili orta karbonlu çeliklerin kullanım yerlerine örnek olarak verilebilir (Singh, 2016, s. 59).

2.2.1.3. Yüksek karbonlu çelikler

Yüksek karbonlu çelikler artan karbon oranına bağlı olarak oldukça serttirler ve sade karbonlu çelikler arasında en dayanıklı grupta olup en düşük sünekliğe sahiptirler (Callister and Rethwisch, 2014, s. 396). Bazı el aletleri, yay malzemeleri ve yüksek mukavemetli teller, yüksek karbonlu çeliklerin kullanım yerlerine örnek olarak verilebilir (Singh, 2016, s. 59).

2.2.2. Alaşımli çelikler

Karbonlu çeliklerden normal bir şekilde sağlanamayan özellikleri sağlayabilmek amacıyla içerisinde karbonlu çeliklerde ancak belirli sınırlara kadar bulunabilen alaşım elementlerini içeren çelikler, alaşımli çelikler olarak tanımlanmaktadır (Dikeç, 2010, s. 72). Alaşımli çelikleri kendi arasında düşük

alaşımli çelikler ve yüksek alaşımli çelikler olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Bileşiminde % 5'ten az alaşım elementi içeren çeliklere düşük alaşımli çelik, % 5'ten çok alaşım elementi içeren çeliklere yüksek alaşımli çelik denilmektedir (Onaran, 2009, s. 316).

2.3. Alaşım Elementlerinin Çelik Yapısına Etkisi

Çeliğe katılan her bir alaşım elementinin özel bir amacı vardır. İstenilen amaca uygun olarak alaşımlandırma yapabilmek için de alaşım elementlerinin özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Çelikteki önemli alaşım elementlerinin çelikler üzerinde nasıl etkileri olduğu Tablo 2.1'de verilmiştir.

Isıl işlem sırasında davranışlarını değiştirmek için yalın karbonlu çeliklere alaşım elementleri eklenir ve bu da çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar. Alaşım ilaveleri aşağıdaki nedenlerden bir veya birkaçı için yapılır (Davis, 2015, s. 219):

- Sünekliği belirgin şekilde düşürmeden çekme dayanımını artırmak
- Tokluğu artırmak
- Sertleşebilirliği artırmak
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti korumak
- Daha iyi bir korozyon dayanımı elde etmek
- Aşınma direncini artırmak
- Çeliğe ince tane boyutu vermek

Ayrıca çeliğe alaşım ilavesi yapılarak manyetik geçirgenliği veya manyetik gücü artırmak da mümkündür (Singh, 2016, s. 9).

Tablo 2.1. Çelikler üzerinde alaşım elementlerinin etkisi

Alaşım elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma noktası	Yüzde uzama	Kesit daralması	Darbe direnci	Elastisite	Yüksek sıcaklık dayanımı	Soğutma hızı	Karbür oluşumu	Aşınma direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme eğilimi	Korozyon direnci
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	-
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	-	↓	~	↓↓	↑	↓	~	-
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	-	-	-	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	-	↓↓↓	↑↑↑
Ni*	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓	↓	-
Ni**	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
Al	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	-	↓↓	-
W	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	-
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑	-	↑↑↑	↓	~	↓	-
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↑	-	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	-
S	-	-	-	↓	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↑↑↑	-	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
* Perlitik çeliklerde					↑		↓		-			~			
** Östenitik çeliklerde					Artırır		Azaltır		Değişmez			Önemsiz ya da bilinmiyor			

Kaynak: Dikeç, 2010, s. 48

2.3.1. Karbon (C)

Karbon, çelik için temel alaşım elementidir. Karbon miktarının artmasıyla birlikte sertlik ve dayanımın önemli ölçüde arttığı görülmektedir. % 0,8 karbon içeriğine kadar çekme gerilmesi ve akma sınırı değeri artmaktadır. Ancak bu değerden sonra kırılma artar. Çeliklerde karbon miktarı bazı özellikleri (süneklik, dövülebilirlik, kaynak kabiliyeti gibi) olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca yüksek karbonlu çeliklerin ısıtılmasında çatlama riski de fazladır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 70).

2.3.2. Mangan (Mn)

Mangan genel olarak sünekliği azaltmakla birlikte, çeliğin dayanımını arttırıcı bir özelliğe sahiptir. Çeliğin dövülebilme özelliğini iyileştirirken kaynak kabiliyetini de olumsuz yönde etkilemez. Manganın iyi yöndeki etkisi karbon oranının artmasıyla birlikte artış göstermektedir (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 70). Mangan, tüm ticari karbon çeliklerinde % 0,03 ile % 1,00 arasında bulunarak kükürdü gidermek üzere işlev görür ve çelik eriyiğinde deoksidan olarak görev yapar (Singh, 2016, s. 8).

2.3.3. Silisyum (Si)

Çelik üretimi esnasında oksijen giderici olarak kullanılmaktadır. Silisyum, çeliğin akma sınırını, çekme dayanımını ve sertliğini artırmaktadır. Ancak artan silisyum miktarıyla çeliğin darbe dayanımı düşmekte, dövülebilme ve kaynak kabiliyeti azalmaktadır (Güngör, 2001, s. 62).

2.3.4. Kükürt (S)

Kükürt genel olarak çeliğin içinde istenmeyen bir elementtir. Çeliğin içerisinde yer alan kükürt miktarı arttıkça çeliğe aşırı derecede kırılganlık sağlar ve düşük sıcaklıklarda da çatlaklar oluşturur. Kükürdün mangan ile dengelenmesi gerekmektedir. Çeliğe kükürt miktarının iki katı kadar mangan katılması ile kolay talaş kaldırılabilen ve temiz yüzey elde edilebilen bir malzeme olan otomat çelikleri elde edilir. Otomat çelikleri talaşlı imalat için oldukça yaygın kullanıma sahiptir (Güngör, 2001, s. 62).

2.3.5. Kurşun (Pb)

Sadece otomat çeliklerine katılan kurşun çelikte çok ince ve iyi dağılımı sayesinde talaşlı işlemede talaşların kırılgan olmasını ve temiz yüzey elde edilmesini sağlarken mekanik özellikleri etkilemez (Yaşar, 2001, s. 216).

2.3.6. Selenyum (Se)

Selenyum otomat çeliklerine talaş kırılğanlığı vermek için katılan bir alaşım elementidir (Yaşar, 2001, s. 216).

2.3.7. Fosfor (P)

Fosfor genel olarak çeliğin içinde istenmeyen bir elementtir. Çeliğin ekme ve korozyon dayanımını az miktarda yükseltmesine rağmen çeliğin içerisinde yer alan fosfor miktarı mümkün olduğunca düşük tutulmaya çalışılır. Çeliğin içerisinde yer alan fosfor miktarı arttıa kırılğanlık özelliği artmakta; biçimlendirilme, kaynak edilebilme ve talaş kaldırılabilme kabiliyetleri azalmaktadır (Güngör, 2001, s. 62).

2.3.8. Kalsiyum (Ca)

Kalsiyum, silisyumla beraber oksitlenmeyi azaltıcı bir özellik göstermektedir (Yaşar, 2001, s. 215).

2.3.9. Krom (Cr)

eliklere belirli bir oranda krom katılırsa korozyona karşı dayanım artmaktadır. Çeşitli ortamlarda, özellikle atmosfere açık koşullarda korozyona ve paslanmaya karşı direnç gösteren paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşiminde en az ağırlıkça %11 oranında krom bulunmaktadır (Callister and Rethwisch, 2014, s. 397). Krom, eliğin yalnız korozyon dayanımını artırmakla kalmaz, aşınma direncini, sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve yüksek sıcaklık dayanımını da artırır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 71). Kromlu eliklerin sertlikleri fazla olduğundan darbelere karşı dayanıklı değillerdir ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyetleri düşüktür (Güngör, 2001, s. 63).

2.3.10. Nikel (Ni)

Genellikle krom ile birlikte kullanılan nikel, paslanmaya, korozyona, kimyasal maddelere, yüksek sıcaklığa ve darbelere karşı dayanımı, elastikiyet

özelliğini artırmaktadır (Güngör, 2001, s. 63). Ayrıca nikel içeren yapı çelikleri, yüksek sertleşebilirlik ve yüksek yorulma direnci gösterirler (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 71).

2.3.11. Seryum (Ce)

Kuvvetli bir oksitlenme önleyici olan seryumun çelikte temizleyici ve kükürt giderici etkisi vardır (Yaşar, 2001, s. 216).

2.3.12. Molibden (Mo)

Molibden genellikle kromla beraber kullanılmaktadır. Çeliğin sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve yüksek sıcaklığa dayanımını artırır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 71). Molibden kaynak kabiliyetini olumlu yönde etkilemesine rağmen dövülebilirliği azaltmaktadır (Dikeç, 2010, s. 47).

2.3.13. Vanadyum (V)

Vanadyum çeliğin sertleşebilirliğini artırır. Aynı zamanda tane küçültme etkisine de sahiptir ve darbe dayanımını yükseltir. Vanadyum kuvvetli karbür yapıcı olduğundan, aşınmaya ve sığa dayanımı arttırmak için takım çeliklerinde volframla, sığa dayanıklı çeliklerde krom ile birlikte katılır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 71).

2.3.14. Volfram (W)

Volfram, çok iyi bir karbür yapıcı olduğundan mukavemeti, sertliği, kesme kabiliyetini ve dayanıklılığı yükseltmekte, yüksek sıcaklıklarda mukavemetin muhafazasını sağlamaktadır. Bu yüzden volfram, sığa dayanımlı çeliklerin yapımında kullanılır (Dikeç, 2010, s. 47).

2.3.15. Niobyum (Nb)

Niobyum tane inceltici etkiye sahip olup, akma sınırını yükseltmekte ve karbür yapıcı özelliği ile sertliği artırmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 71).

2.3.16. Titanyum (Ti)

Titanyumun karbür yapıcı özelliği vardır ve sertliği artırmaktadır. Çeliğin üretimi aşamasında deoksidan olarak da kullanılan titanyum, tane inceltici bir etkiye sahiptir (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 71).

2.3.17. Kobalt (Co)

Kobalt, çeliğin sertliğini, yüklere ve sıcaklığa karşı dayanımını artırarak, ince taneli bir yapı oluşmasını sağlar (Güngör, 2001, s. 64). Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini yavaşlatıcı bir etkisi olan kobalt, sıcağa dayanıklı çeliklere ilave edilmektedir (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 72).

2.3.18. Alüminyum (Al)

Alüminyum güçlü bir deoksidan olup tane inceltici etkisi vardır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 72). Çelik içerisinde silisyum gibi hareket eden alüminyum, yüksek miktarlarda kullanıldığında çeliği kaba taneli yapmaktadır (Dikeç, 2010, s. 47).

2.3.19. Bor (B)

Bor, düşük ve orta karbonlu çeliklerin sertleşebilirliğini artırıcı özelliğe sahiptir (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 72).

2.3.20. Bakır (Cu)

Bakır, sertlik, çekme ve akma dayanımları ile korozyon ve sıcaklık direncini arttırırken dövülebilmeyi azaltmaktadır (Yaşar, 2001, s. 215).

2.3.21. Azot (N)

Akma mukavemetini yükselten azot, uzama ve çentik darbe mukavemetini çok düşürmektedir (Dikeç, 2010, s. 46). Azotun en önemli yararı, yüzeyde nitrür oluşturarak çok sert yüzeyler elde edilmesini sağlamaktır (Yaşar, 2001, s. 216).

2.3.22. Oksijen (O)

Çelik üretimi sırasında çeliğe geçen oksijen sıcak kırılmalığa yol açtığı için çeliğin içerisinde % 0,07'den fazlası istenmemektedir (Dikeç, 2010, s. 46).

2.3.23. Hidrojen (H)

Hidrojen, çelik içerisinde çok az miktarda dahi olsa oldukça zararlıdır ve kırılmalığa yol açmaktadır (Dikeç, 2010, s. 46).

2.3.24. Zirkonyum (Zr)

Genellikle yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde arıtilamayan elementleri denetleyici olarak kullanılmaktadır. Özellikle sülfürlerin biçimlerini değiştirerek çeliğin sünekliğini artırmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2002, s. 72).

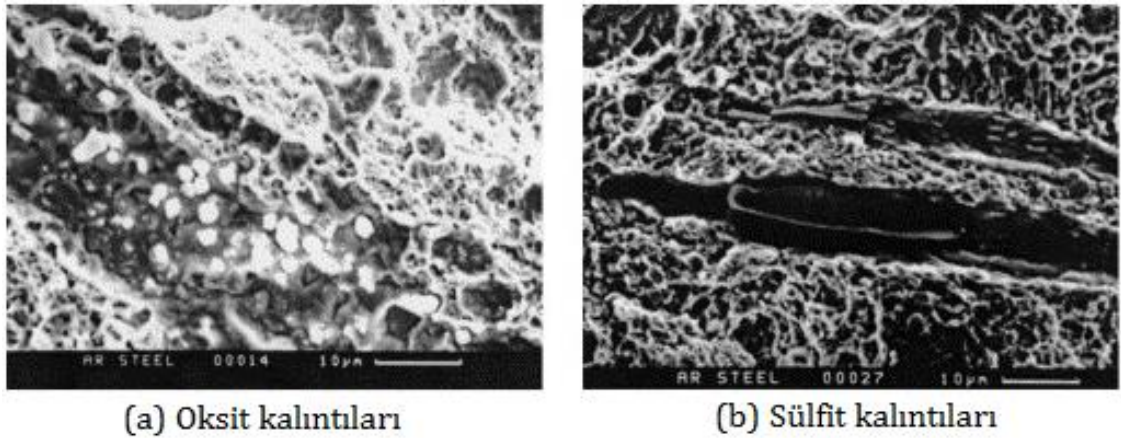
2.4. Çelik Temizliğinin Çelik Yapısına Etkisi

Çelik üretiminde son yıllarda üzerinde durulan en önemli konu, özellikle çelikteki P, S, N, O ve H gibi elementlerin çok düşük seviyelere kadar azaltılmasının amaçlandığı, temiz çelik olarak tabir edilen çeliği elde edebilmektir (Dikeç, 2010, s. 125).

Çeliğin temizliği, metalik olmayan kalıntılardan arınmış olması manasına gelmektedir. Bu kalıntılar şekil, boyut, adet ve yapı içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak çeliklerin yorulma ömrünü etkileyecektir (ASM International Handbook Committee, 1990, s. 678).

Temiz çelik üretimi için çelik temizliğini etkileyen faktörlerin araştırılması, kirliliği arttıran kaynakların azaltılması ve bunun proses yöntemleri veya kullanılan malzemenin seçimi yolu ile gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Temiz çelik öncelikle çeliğin oksit ve sülfid olarak düşük düzeyde safsızlıklar içermesi, yani yüksek oksit ve sülfid temizliğine sahip olmasını gerektirmektedir. Temiz çelik kavramı son zamanlarda daha da genişletilmiş, çok düşük azot, hidrojen ve bazı durumlarda düşük karbon içeriğini de tanımlar hale gelmiştir. Çeliğin kullanılma amacına göre değişebilen temiz çelik, kritik kalıntı boyutundan daha büyük kalıntı bulunma olasılığının çok düşük olduğu çeliktir (Bilgiç, 2002, s. 1). Şekil 2.3’de yer alan görsellerde çelik yapısında bulunan oksit kalıntıları ve sülfid kalıntıları görülmektedir. Bu kalıntılar çeliğin yapısını bozarak, çeliğin temizlik durumuna ya da genel olarak çeliğin niteliğine doğrudan etki ederler.

Çelik üretim sürecinde temiz çelik daha çok, çelikte istenilen kimyasal bileşimin sağlanmaya çalışıldığı pota (sekonder) metalurjisi işlemleri ile şekillenir, daha sonraki sürekli döküm aşamasında ise elde edilmiş olan yüksek temizlik düzeyi korunmaya çalışılır (Bilgiç, 2002, s. 1).



Şekil 2.3. Çelik yapısında bulunan oksit ve sülfid kalıntıları

Kaynak: Atkinson and Shi, 2003, s. 484

Çelik üretiminde karbon yakma işlemi esnasında çelik içine üflenen oksijenin bir kısmı sıvı metal içinde çözünerek katılaşma esnasında çelik içinde boşluk oluşmasına neden olacağından çelik kalitesini arttırmak için oksijenin alınması gerekir. Oksijeni gidermek (deoksidasyon) için alüminyum ve ferrosilis şeklinde

silisyum ilave edilir. Bu aşamada ferro alaşım şeklinde mangan, niyobyum, vanadyum eklenmesi ile çelik kalitesini daha da arttırmak mümkündür. İlave edilen bu elementler oksijen ile oksit bileşikleri oluşturarak cüruf meydana getirmekte veya kalıntı bileşiği olarak çelik içinde kalmaktadır (Can, 2006, s. 162).

Deoksidasyon dışında refrakterden veya cüruftan aşınma ve mekanik karışma sonucunda ya da kalıpta katılaşma sürecinde oluşan kalıntılar da çeliği kirlletmektedir. Pota metalürjisi işlemleri sonrasında çok düşük oksijen düzeyleri elde edilebilmesine rağmen sıvı çeliğin transfer süreçlerinde yeniden oksijen alma durumuyla karşılaşmakta, aynı zamanda sıvı çelik azot ve bazı durumlarda da hidrojen kapmaktadır. Bunlar da yapı içerisinde metalik olmayan kalıntılara yol açmaktadır. Yeniden oksitlenme bileşikleri çoğunlukla büyük kalıntılar şeklinde oluşurlar ve eğer özellikle üretimin son aşamalarında oluşmuşlarsa çelikteki kirliliğin en büyük nedeni olurlar.

Temiz çelik elde ederken sadece oksitçe temiz değil aynı zamanda sülfitle de temiz yapılar istenmektedir. Sülfitle temizliği düşük kükürt değeri ile eş anlamlı olarak kullanılır. Çeliğe CaO, CaC₂, Mg, Mn katarak kükürdü gidermek mümkündür (Bilgiç, 2002, s. 11). Kükürt, demirle birleşerek düşük sıcaklıklarda ergiyen FeS bileşimini oluşturur ve sıcak kırılabilirliğe yol açar (Singh, 2016, s. 8).

Hidrojen gevrekliği adıyla bilinen hidrojenin kötü etkileri son yıllarda çeliklerde 1 ppm (milyonda bir) altında olacak şekilde tasarlanmalarını gerekli kılmıştır. Hidrojen miktarının artışı ile birlikte malzeme sünekliği şiddetli bir şekilde düşmektedir. Bu yüzden yüksek mukavemetli ve diğer özel çeliklerin üretiminde hidrojen miktarının önemi dolayısı ile hidrojen giderici etkinlikler (vakumlu ergitme, koruyucu ortamlarda döküm, gaz giderme, pota metalürjisi gibi) geniş çapta uygulanır olmuşlardır (Dikeç, 2010, s. 125).

Temiz çelik ve temiz olmayan çelik kıyaslanacak olursa, çelik temizliğinin birçok faydası olduğu görülecektir. Temiz olmayan çeliklerin yorulma ve pullanma dayanımları temiz çeliklere göre daha düşüktür. Temiz olmayan çeliklerde akma sınırları ve çekme dayanımları yöne bağlı olarak fazla değişmezken süneklikleri, toklukları ve yorulma dayanımları değişmektedir. Boylamasına kopma uzamaları,

kopma büzülmeleri, toklukları ve yorulma dayanımları enlemesinden daha fazla olmaktadır.

Çelik temizliği yapıldığında, çentik darbe tokluğu özelliklerinde iyileşme olmaktadır. Fakat çeliğin talaşlı işleme özelliği ile temizliği arasında ilişki kurmak zordur. Çünkü MnS çeliğin işlenmesi kolaylaştırırken, silisyum ve alüminyum bileşikleri işlemeyi zorlaştırır.

Çelik içerisindeki kalıntı bileşiklerin büyük boyutlu olması, çeliğin yüzey işleme kalitesini, boyanabilirliğini ve kaplama özelliğini kötüleştirir. Çeliğin içerisine kalsiyum ve titanyum katılması, büyük boyutlu kalıntı bileşik sayısını azaltarak, kalıntı bileşiklerin yuvarlak oluşmasını ve homojen dağılmasını sağlar, yöne bağımlılığı azaltır (Can, 2006, s. 171).

Çelik üretim sürecinde Al ile deoksidi edilmiş çeliklerde bulunan en temel kalıntılar Al_2O_3 ve MnS kalıntılarıdır. Bu kalıntılar nihai ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerinin bozulmasına sebep olurlar. Ayrıca şekillendirme ve kaynak işlemi sırasında çatlak oluşumuna ve kırılmaya yol açabilirler. Uygulanan kalsiyum işlemi ile çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerine olumsuz etki edebilecek kalıntıların azaltılması ve modifiye edilerek zararsız hale dönüştürülmesi mümkündür. Kalsiyum işleminde ideal koşullar oluşturulmadığı takdirde çelik temizliğinin arttırılmasının aksine çelik kirliliğinde bir artış olacaktır. Temiz çelik elde edebilmek için yapıdaki kalıntıların azaltılması ve modifiye edilerek zararsız kalıntılara dönüştürülmesi gerekmektedir (Kaçar, 2011, s. 255).

3. YORULMA

3.1. Yorulmanın Tanımı

Metalik yapılarda görülen yorulma hatalarının ilk laboratuvar çalışmaları 19. yüzyılda August Wöhler tarafından gerçekleştirilmiştir. 20. yüzyılda, tekrarlı yüklemelerin malzemede bir yorulma mekanizması başlatarak küçük bir çatlak oluşumuna, ardından çatlağın büyümesine ve en nihayetinde kırılarak kopmasına neden olacağı öğrenilmiştir (Schijve, 2009, s.1). Birçok parçaya etki eden ve büyük felaketlere yol açan yorulma, çevrimsel yükleme sonucu meydana gelen oldukça zarar verici bir hasar türüdür (François, D., Pineau, A., and Zaoui, A., 2013, s. 307).

Laboratuvar şartlarında, yorulma özelliklerinin karakterizasyonu iyi tanımlanmış olmasına rağmen, halen daha birçok hata yorulmadan kaynaklı olarak meydana gelmektedir. Gerçek uygulama koşullarında yorulma davranışı birçok durumdan etkilenebilmektedir (Becker and Shipley, 2002, s. 700). Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinaların parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık olarak % 90'ı yorulma sonucunda oluşmaktadır (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 143).

Yeterli sayıda tekrarlanan değişken gerilmeler ve plastik şekil değişiminin etkisiyle meydana gelen bölgesel kalıcı yapısal değişiklikler sonucunda malzeme içerisinde çatlakların oluşması ve bu çatlakların ilerleyerek kırılmaya yol açması yorulma olarak tanımlanmaktadır (Becker and Shipley, 2002, s. 700).

3.2. Yorulma Olayının Meydana Gelişi

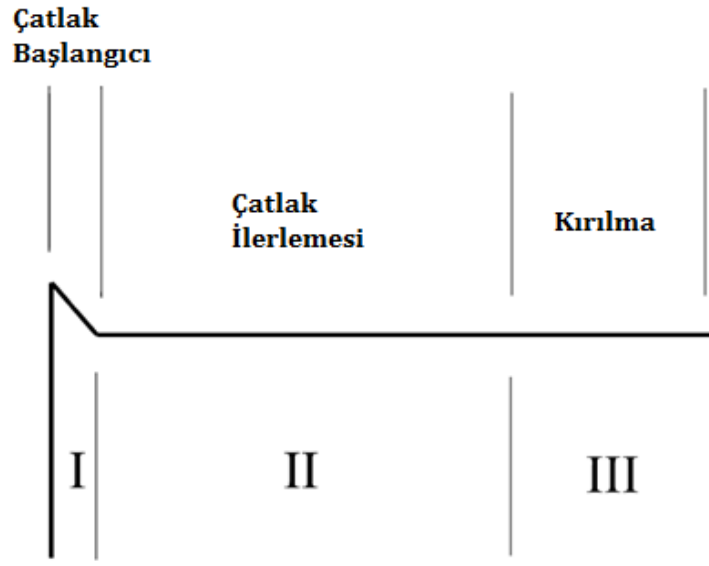
Yorulma hasarı plastik şekil değişiminin, çekme gerilmesinin ve çevrimsel gerilmelerin eş zamanlı etkisiyle oluşur. Bu üç etkenden birinin olmaması durumunda yorulma çatlakları başlamayacak ve ilerlemeyecektir. Çevrimsel gerilme ve plastik şekil değişimi çatlak oluşumunu başlatır, çekme gerilmesi ise çatlak ilerlemesini meydana getirir (Davis, 2015, s. 1218). Yorulma olayında çatlak oluşumu için şu üç ana faktör gereklidir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 143):

- Yeteri derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesi
- Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması
- Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı

Yorulma süreci üç aşamadan meydana gelmektedir (Becker and Shipley, 2002, s. 706):

- Çatlak oluşumu ve başlangıcı
- Çatlağın kritik bir boyuta kadar ilerlemesi
- Kırılma

Şekil 3.1’de yorulma çatlak ilerlemesinin üç aşaması olan mikroçatlak başlangıcı, makroçatlak ilerlemesi ve kırılma aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yorulma çatlak ilerlemesinin üç aşaması

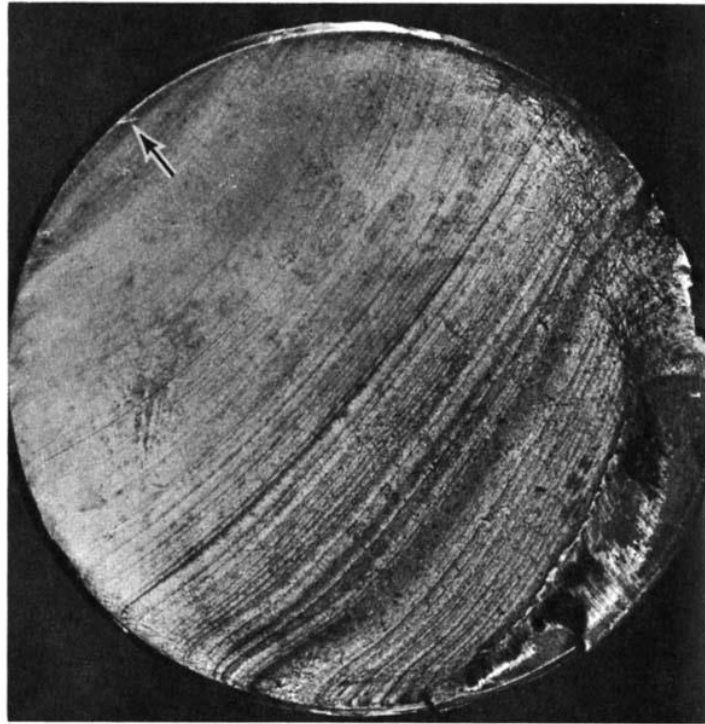
Kaynak: Pook, 2007, s. 26

Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeydeki bir pürüzde, çentikte, çizikte, kılçak çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlamaktadır (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 143). Yorulma çatlakları bölgesel gerilmenin maksimum olduğu noktalarda görülmektedir. Bölgesel gerilme değeri; parçanın şekli, yük tipi, yük büyüklüğü, makroskobik gerilmeleri yoğunlaştıran metalürjik ve yüzey kusurları gibi bölgesel özellikler ile belirlenir. Malzeme yüzeyindeki çizikler,

apaklar ve diğ er imalat hataları gibi bölgesel yüzey kusurları, yorulma çatlaklarını başlatan en açık kusurlardır. Malzeme içindeki kalıntılar, katı çökelti parçacıkları, tane sınırları gibi süreksizlikler malzeme yapısı içerisinde yorulma çatlak oluşumuna sebep olan mikroskobik gerilme yığılmalarına örnektir.

Metalik bir parçaya etkiyen çevrimsel yüklerden dolayı mikro yapı içerisindeki dislokasyonlar bölgesel olarak hareket ederler ve kayma bantlarını oluştururlar. Kayma bantlarının oluşumu sonucu yüzeyde meydana gelen girinti ve çıkıntılar gerilim yoğunlaşmasına sebep olurlar. Oluşan gerilme yığınlarının etkisiyle yüzeyde oluşan mikro çatlaklar zamanla büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar (Becker and Shipley, 2002, s. 706).

Yorulma atlağı ilerledikçe malzemenin çatlaksız kesitinde azalma görülecektir. Parçanın kalan kısmı zayıflayacak ve belirli bir noktada, parça sadece birkaç y k uygulaması ile kırılabilir hale gelecektir (Uludağ, 2002, s. 13). şekil 3.2’de görüldüğü gibi parçanın kenar kısmından başlayarak ilerleyen yorulma çatlağı kırılma ile son bulmuştur.

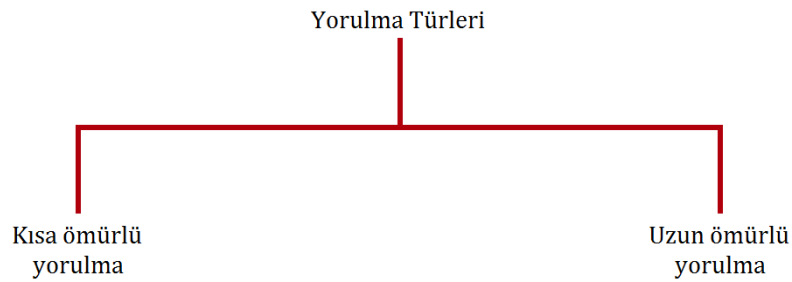


şekil 3.2. elik bir malzemede g r len yorulma kırığının yüzeyi

Kaynak: Davis, 2015, s. 1222

3.3. Yorulma Türleri

Yorulma, kısa ömürlü yorulma ve uzun ömürlü yorulma olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 3.3). Malzemenin akma gerilmesinden büyük gerilmelerde 10^4 'ten küçük bir çevrim sayısında yorulularak kırılması kısa ömürlü yorulma olarak ifade edilmektedir. Malzemenin akma gerilmesinden düşük gerilmelerde 10^5 'ten yüksek bir çevrim sayısında yorulularak kırılması ise uzun ömürlü yorulma olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.3. Yorulma türleri

Kısa ömürlü yorulma ile yüksek ömürlü yorulma arasındaki sınırı belirli bir çevrim sayısı ile kesin olarak belirlemek mümkün değildir. İki durumu ayırt etmek için elastik ve plastik davranışları incelemek daha doğru olacaktır. Yüksek ömürlü yorulma, düşük ömürlü yorulmaya göre pratikte daha yaygın olarak görülmektedir (Schijve, 2009, s.146). Kısa ömürlü yorulmada çevrimsel gerilmeler sadece elastik değil, aynı zamanda plastik şekil değişimi de oluşturmaktayken uzun ömürlü yorulmada şekil değişimi tamamen elastiktir (Callister and Rethwisch, 2014, s. 259).

3.4. Yorulma Deneyi

Metalik bir parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü artırmak için iyi bir dizayna gerek vardır. Küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarını karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür çünkü laboratuvarında standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterirler ve karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Dolayısı ile yorulma deneyi

sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir bir şekilde kullanılamazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir vermekte ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olmaktadır.

Son yıllarda özellikle önemli parçaların yorulma davranışlarını tespit etmek için, standart bir deney numunesi yerine parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmakta ve böylece daha güvenilir sonuçlara ulaşılmaktadır (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 143).

3.4.1. Yorulma deneyi türleri

Çalışma esnasında bir parçaya gelecek olan gerilmeler değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak farklı türdeki yorulma deneyleri ile malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında bilgi edinilebilir ve gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlarla teknik yorumlar yapılabilir. Bir deneyde kullanılan gerilme türü yorulma deneyine de adını vermektedir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 145):

a. Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi: Basit bir sisteme sahip olan eksenel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanmakta, uygulanan gerilme numune enine de üniform olarak dağılmaktadır.

b. Eğme Gerilmeli Yorulma Deneyi: Bu deney türü kendi arasında düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi ve dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İlk deney türünde numune nötr (tarafsız) bir düzleme veya eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. İkinci deney türünde ise numune devamlı dönen nötr bir eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır.

c. Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi: Burma gerilmeli yorulma deneyinde, deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma (dönme) işlemi uygulanmaktadır.

d. Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi: Yukarıda sayılan farklı gerilme türlerinden ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusudur.

3.4.2. Yorulma deneyi cihazları

Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, bu cihazlar numuneye uyguladıkları gerilme türü açısından 4 grupta toplanabilir:

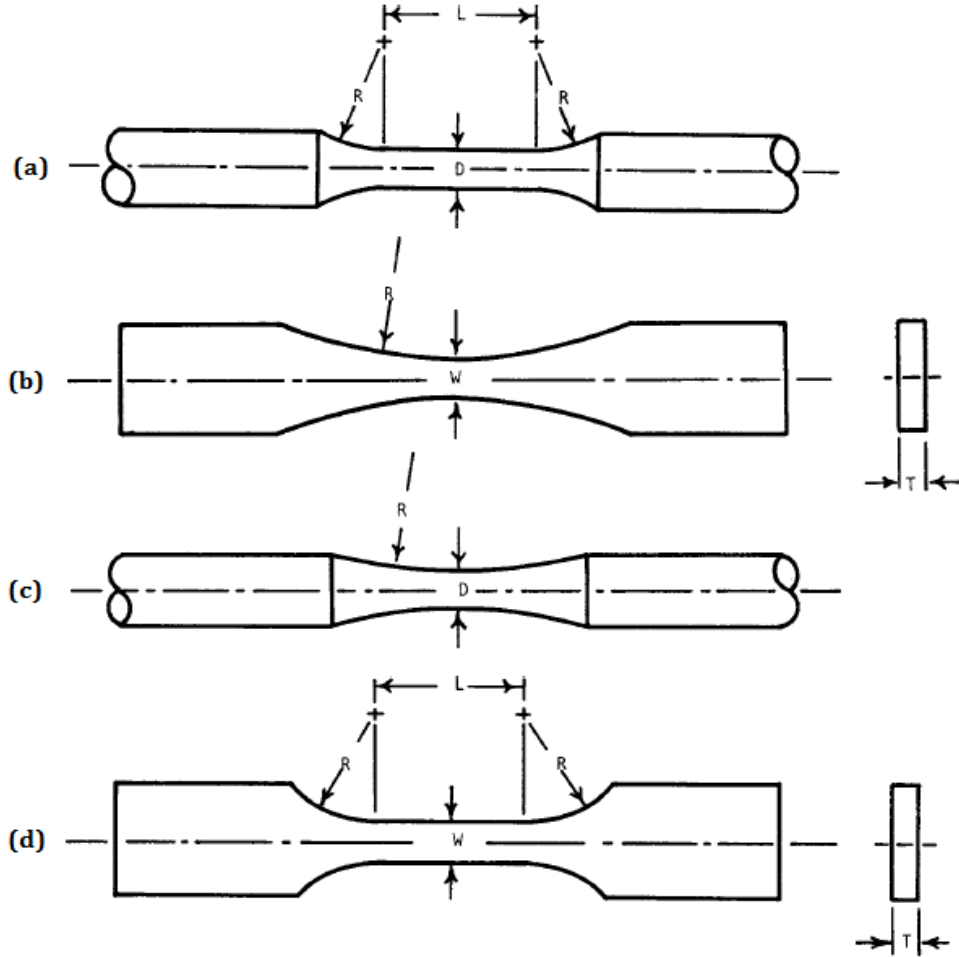
- a. Eksenel çekme - basma gerilmeleri uygulayan yorulma cihazları
- b. Eğme gerilmeleri uygulayan yorulma cihazları
 - Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan yorulma cihazları
 - Dönen eğme gerilmesi uygulayan yorulma cihazları
- c. Burma gerilmesi uygulayan yorulma cihazları
- d. Bileşik gerilme uygulayan yorulma cihazları

Malzemesi deneye tabi tutulacak parça çalışması esnasında ne tür gerilmelere maruz kalacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazları seçilmelidir. Aksi takdirde elde edilen sonuçlar güvenli olamaz. Yorulma deneyi süresince uygulanan yükte meydana gelen değişim, cihazın çalışma kapasitesinin % 2'sini aşmamalıdır. Ayrıca cihazlarda uygulanan kuvvetleri gösterebilecek, kontrolünü sağlayabilecek ve yorulma kırılması gerçekleştiğinde cihazı durduracak bir düzen bulunmalıdır. Yorulma deneyi cihazlarını çalışma prensiplerine göre de mekanik, elektromekanik, manyetik, hidrolik ve elektrohidrolik cihazlar şeklinde sınıflandırmak mümkündür (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 152).

3.4.3. Yorulma deneyi numunesi

Yorulma deneylerinde kullanılacak deney numunesinin tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir. Deney numunesinin dikdörtgen veya dairesel kesitli olmasına göre ASTM

standartlarındaki numune şekilleri değişmektedir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 155). Şekil 3.4'te ASTM E-466'ya göre aksenal gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Aksenal gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri

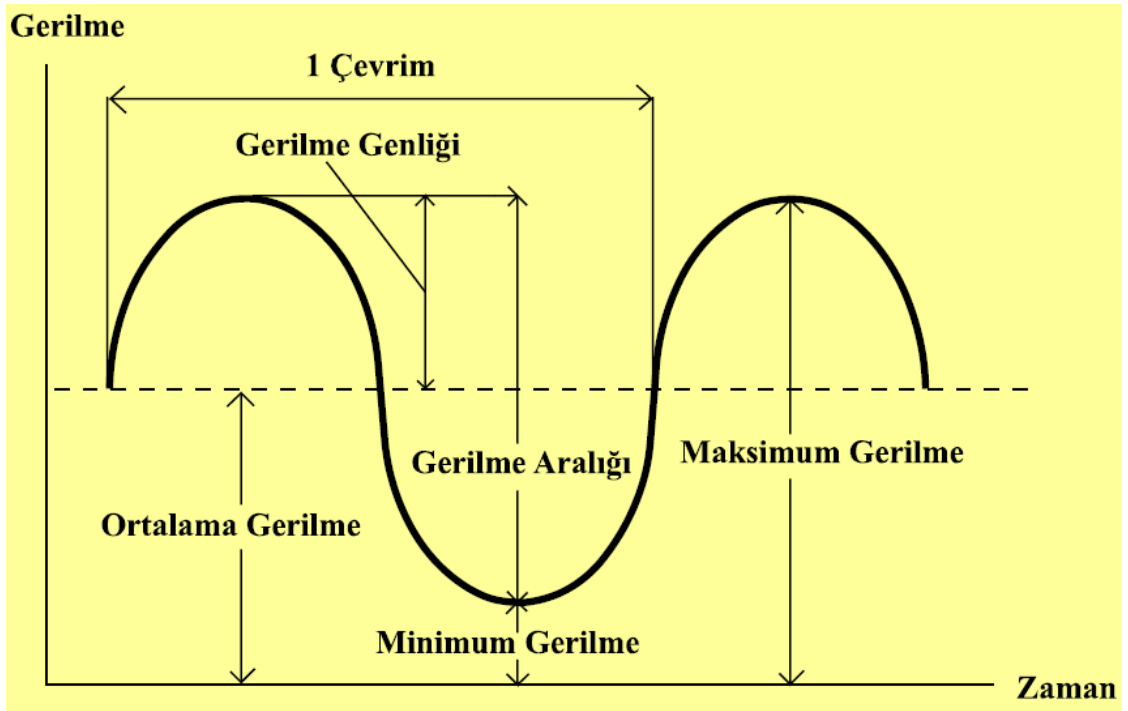
Kaynak: ASTM E466-07, 2007, s. 2

Şekil 3.4'te (a) ve (c) ile gösterilen numune şekilleri dairesel kesitli numuneler olup (b) ve (d) ile gösterilen numune şekilleri dikdörtgen kesitlidir. Numune şekillerinin üzerinde yer alan harflerin temsil ettiği ifadeler aşağıda verilmiş olup her birinin alacağı değer standartlara göre belirlenmektedir ve deney numunelerinin hazırlanmasında bu standartlara uyulmalıdır.

- R: Kavis yarıçapı
W: İnceltilmiş kısmın genişliği
L: İnceltilmiş kısmın uzunluğu
D: İnceltilmiş kısmın çapı
T: Numunenin kalınlığı

3.4.4. Yorulma deneyi ile ilgili terimler

Yorulma deneyinde kullanılan terimler aşağıda açıklanmış olup bu terimlerin sinüzoidal yükleme tipi için gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Yorulma deneyi ile ilgili terimlerin gerilme – zaman grafiğinde sinüzoidal yükleme tipi için gösterilmesi

Kaynak: Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 146

Çevrim: Gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denir. Çevrim sayısı N ile gösterilmektedir.

Maksimum Gerilme: Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir. Maksimum gerilme σ_{max} sembolü ile gösterilir.

Minimum Gerilme: Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir. Minimum gerilme σ_{min} sembolü ile gösterilir.

Ortalama Gerilme: Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır. Ortalama gerilme σ_m sembolü ile gösterilir ve formülü 3.1 eşitliğinde verilmektedir.

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (3.1)$$

Gerilme Aralığı: Maksimum gerilme ile minimum gerilme arasındaki cebirsel farktır. Gerilme aralığı σ_r sembolü ile gösterilir ve formülü 3.2 eşitliğinde verilmektedir.

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.2)$$

Gerilme Genliği: Gerilme aralığı değerinin yarısına eşittir. Gerilme genliği σ_a sembolü ile gösterilir ve formülü 3.3 eşitliğinde verilmektedir.

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \quad (3.3)$$

Gerilme Oranı: Gerilme oranı için iki çeşit kullanım mevcuttur. En çok kullanılan gerilme oranı, minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı olup R sembolü ile gösterilir ve formülü 3.4 eşitliğinde verilmektedir. Diğer gerilme oranı, gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranı olup A sembolü ile gösterilir ve formülü 3.5 eşitliğinde verilmektedir (Liu Alan, 2016, s. 139).

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (3.5)$$

3.4.5. S-N diyagramı (Wöhler diyagramı)

Yorulma deneyleri sonucunda elde edilen S-N (gerilme-ömür) eğrileri sayesinde bir malzemenin yorulma dayanımı hakkında fikir sahibi olmak mümkündür (Milella, 2013, s. 111). Wöhler diyagramı, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda kırılacağını gösteren bağıntıyı vermektedir. S-N eğrisinin çizilmesi için çok sayıda benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı tespit edilmektedir. Gerilme genliği deneylerin tümünde deney süresince sabit tutulmaktadır. S-N diyagramında ordinatta gerilme eksenini yer alırken, apsiste ise logaritmik ölçek kullanılır ve çevrim sayısı eksenini yer alır.

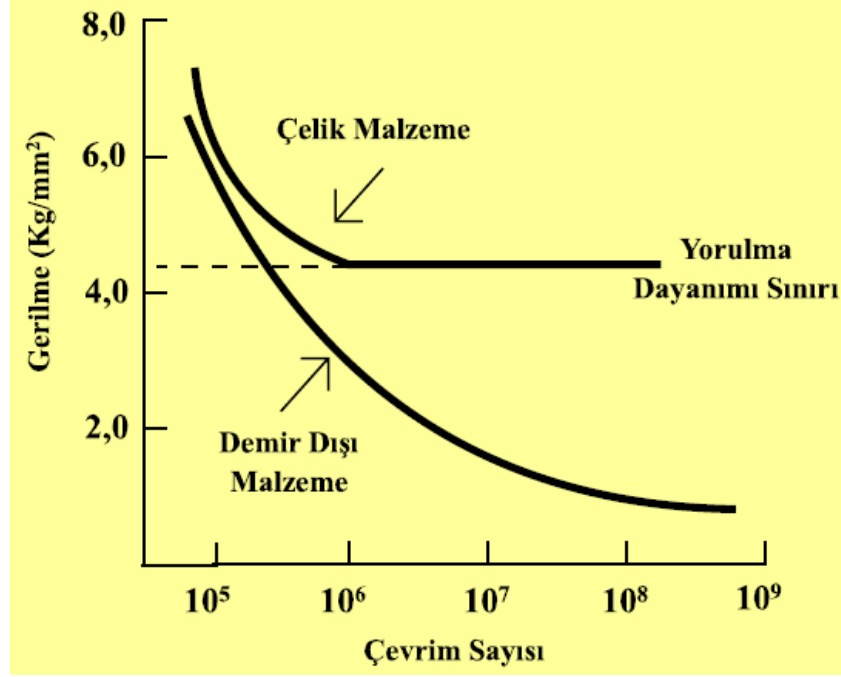
Yorulma Dayanımı (N çevrim için): Bir malzemenin tam N çevrim sonunda kopma gösterdiği gerilme olarak tanımlanır.

Yorulma Sınırı (Yorulma Dayanımı Sınırı): S-N diyagramında, eğrinin asimptotik durum aldığı gerilmeye yorulma sınırı veya yorulma dayanımı sınırı denmektedir. Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 150).

Yorulma Ömrü: Belirli bir gerilme seviyesinde hasara neden olan çevrim sayısıdır (Callister and Rethwisch, 2014, s. 258).

Bir malzemenin yorulma dayanımı sınırı için çekme dayanımı ve Brinell sertlik değerlerinden faydalanılarak yaklaşık değerler seçilmektedir. Demir – çelik grubu malzemelerde yorulma dayanım sınırı çekme dayanımının yaklaşık 0,5'i veya Brinell sertlik değerinin yaklaşık 0,18'i kadardır. Demir dışı metal ve alaşımlarda ise yorulma dayanımı sınırı çekme dayanımının yaklaşık 1/3'ü kadardır. Nispeten yüksek gerilmelerin uygulandığı ilk deneylerde çekme dayanımının yaklaşık 2/3'ü değerinde bir gerilme seçilmektedir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 159).

S-N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum göstermektedirler (ASM International Handbook Committee, 1996, s. 18). Şekil 3.6'da çelik malzeme ve demir dışı malzemelere ait S-N eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.6: Çelik malzeme ve demir dışı malzemelere ait S-N eğrileri

Kaynak: Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 146

Nispeten küçük gerilmeler uygulandığında deneyler sonsuz sayıda çevrim için devam ettirilmez, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney sürdürülür. Çelik malzemelerde bu sayı genellikle $10 \cdot 10^6$ olup demir dışı metal ve alaşımlarda böyle bir çevrim sayısı yoktur. Demir dışı metalik malzemeler için malzemenin cinsine göre yorulma deneyi $50 \cdot 10^6$ ila $500 \cdot 10^6$ çevrime kadar devam ettirilir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 159).

3.5. Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler

Yorulma dayanımına etki eden faktörleri şu şekilde gruplamak mümkündür:

- Parça Geometrisi: Yüzey düzgünlüğü, çentikler, kaynaklama, birleştirmeler ve parça kalınlığı
- Üretim Süreci: İmalat ve yüzey işlemleri
- Yük Dağılımı: Çevrim şekli, değeri, frekansı ve yük geçmişi
- Çevresel Etkiler: Sıcaklık ve korozyon
- Malzemenin Mikro Yapısı: Tane boyutu ve malzemenin içyapısı

3.5.1. Parça geometrisi

Çoğu yükleme durumu için maksimum gerilme, yapı veya onu oluşturan parçanın yüzeyinde meydana gelir. Yorulma hasarına yol açan çoğu çatlak, yüzeyden özellikle de gerilme yığılmasının olduğu bölgelerden başladığı için yorulma ömrü yüzey durumu ve koşullarına duyarlıdır. Herhangi bir çentik veya geometrik süreksizlik gerilme yığılmasına yol açarak çatlak başlangıç yeri olarak davranabilir. Tasarımda yer alan yivler, delikler, kama yuvaları, vida dişi ve benzerleri bunlara birer örnektir. Süreksizlikler ne kadar keskin (yuvarlatma yarıçapı küçük) ise gerilme yığılması şiddeti o kadar yüksek olacağından yapısal düzensizliklerden ve keskin köşelere yol açan ani kesit değişikliklerinden kaçınmak gereklidir (Callister and Rethwisch, 2014, s. 262).

Kaynaklama ve birleştirmeler de geometrik süreksizlik yaratarak gerilme yığılmalarına sebep olur ve çatlak başlangıcına yol açar (Ellyin, 1997, s. 25).

Malzeme kalınlığı da yorulma mukavemetine etki etmektedir. Çelik malzemelerde kalınlık arttıkça lamellerin çatlama hassasiyeti artış göstermektedir. Bu yüzden kalın malzemelerde, haddelenmeye paralel, dik ve kalınlık yönlerinde izotropik özelliklerin elde edilmesi çok önemlidir (Dikeç, 2010, s. 125).

3.5.2. Üretim süreci

Parça üretimi sonrasında, parça yüzeyinde yer alan küçük çizik ve yiv gibi izler birer çentik etkisi yaratarak yorulma ömrünü azaltacaktır. Son işlem olarak parlatma yapılarak yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ile birlikte yorulma ömrünü artırmak mümkündür. Yorulma performansını artırmak için ise en dış yüzey tabakasında basma artık gerilmeleri oluşturularak çatlak oluşumu azaltılmaya çalışılır. Bu işlemi bilya püskürtme denilen bir yöntemle gerçekleştirmek mümkündür. Bunun dışında çelik alaşımlarında hem yüzey sertliğinin hem de yorulma ömrünün arttırıldığı bir yöntem olan kabuk sertleştirme, parçanın yüksek sıcaklıkta karbonca ya da azotça zengin bir ortama maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilen sementasyon (karbürleme) ya da nitrürleme işlemleriyle yapılabilir (Callister and Rethwisch, 2014, s. 263).

Üretim sürecinde soğuk dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi soğuk kalıcı şekil verme teknikleri, meydana getirdikleri tane yönlenmesinden dolayı, malzemelerde yöne bağlı özellikler oluşmaktadır. Yönlendirilmiş doğrultudaki yorulma dayanımı diğer kısma göre daha yüksek olmaktadır (Ellyin, 1997, s. 23).

3.5.3. Yük dağılımı

Uygulama esnasında birçok parça değişken gerilmelere maruz kaldığı için malzemelerin yorulma direncini belirleyebilmek amacıyla yapılan yorulma deneylerinde gerilme türünün etkisi önemlidir. Genellikle aksenal gerilme ile düzlemsel eğme gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar birbirine çok yakın olup burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda sonuçlar farklıdır. Aynı tür gerilme için ortalama gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranının etkileri de çok önemlidir. Ortalama gerilme değeri arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısı için dayanabileceği gerilme genliği azalmaktadır. Gerilme oranı arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısı için dayanabileceği gerilim genliği azalmaktadır. Bunun dışında uygulama esnasında parçada zaman zaman meydana gelen aşırı gerilmeler yorulma ömrünü kısaltacaktır.

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak saptanamamakla birlikte deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200-10.000 çevrim/dakika'lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir. Fakat çok düşük deney hızlarında çevrenin etkisinin daha fazla olması nedeniyle yorulma dayanımı sınırının azaldığı kabul edilmektedir. Diğer yandan çok yüksek frekanslarda, malzemede oluşan ısıların kısa zamanda yayınamaması, yorulma deneyi sonuçlarını olumsuz yönde etkilemektedir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 168). Çelik için yorulma dayanımının 200-5.000 çevrim/dakika'lık frekanstan etkilenmeyeceği söylenebilir (Becker and Shipley, 2002, s. 718).

3.5.4. Çevresel etkiler

Çevresel faktörler de malzemelerin yorulma davranışını etkileyebilmektedir. Oda sıcaklığı altında yapılan yorulma deneylerinde sıcaklık düştükçe yorulma dayanımının arttığı ancak bunun yanında malzemenin çentik hassasiyetinde artış

olduğu görülür. Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde ise genellikle sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımının azaldığı görülür. Deney sıcaklığı belirli bir sıcaklığa çıktığında ise kopma, yorulmadan çok sürünme sonucunda meydana gelmektedir. Bunun yanında, makine parçalarının kullanılma esnasında sıcaklık değişimlerine uğramaları, ısısal gerilmelere yol açarak yorulmaya neden olabilir. Bir defalık ani sıcaklık değişimi malzemenin çatlamasına yol açmışsa bu olaya ısı (termal) şok adı verilirken, çatlama çok sayıda tekrarlanan ısısal gerilmeler sonucunda olmuşsa bu olaya ısısal (termal) yorulma adı verilir.

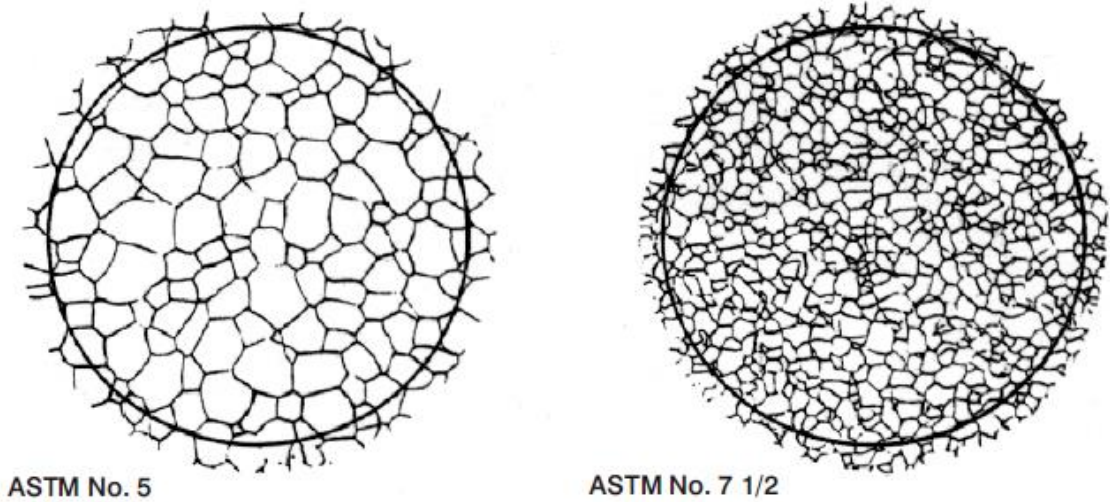
Yorulma olayından önce malzemenin korozyona uğraması ile malzemenin yüzeyinde meydana gelen pürüzler ve boşluklar çentik etkisi yaparak gerilmelerin birikmesine ve yorulma dayanımının düşmesine neden olurlar. Korozyon olayının kimyasal etkisi ile yorulma olayının mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına korozyon yorulması denir. Korozyon ve yorulma olaylarının beraber olduğu durumlarda, yorulma dayanımında daha büyük düşüşler görülmektedir. Korozyon, çatlak başlangıcını ve çatlağın ilerlemesini hızlandırmaktadır. Ayrıca korozyon, yorulma deneyinde uygulanan frekansın etkisini de değiştirmektedir. Düşük hızlarda deney zamanı uzayacağı için korozyon daha etkili olacağından, korozyon ortamlarda frekansın etkisini azaltmak için mümkün olduğu kadar yüksek hızlarda çalışılmalıdır (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 167).

3.5.5. Malzemenin mikro yapısı

Malzemenin mikro yapısı plastik deformasyon sürecini engelleyerek veya değiştirerek çatlak büyümesini etkilemektedir. Malzemenin tane boyutu uzun ömürlü yorulma koşullarında daha çok ön plana çıkmaktadır. Gerilmelerin büyük seviyelerde olduğu kısa ömürlü yorulma koşulları altında çoğu metalin yorulma ömrü tane boyutundan bağımsızdır. Buna karşılık, gerilmelerin daha düşük seviyelerde olduğu uzun ömürlü yorulma koşulları altında tane boyutu küçüldükçe çoğu metalin yorulma ömrü artmaktadır. Tane büyüklüğünü değiştirmek için uygulanacak olan işlemler, malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz bir şekilde değiştirebileceğinden ortalama bir tane boyu en uzun çalışma ömrünü sağlayabilir (Becker and Shipley, 2002, s. 718).

Teknolojik uygulamalarda, özellikle çeliklerde optimum mekanik özelliklere ulaşmak için ince tane üretimi amaçlanmaktadır (Demirci, 2004, s. 160). Kaliteli çelik üretiminde, kimyasal bileşimde mümkün olan en düşük seviyede karbon ve alaşım elementinin bulunmasının yanı sıra küçük boyutlu ve gevrek davranış göstermeyen iç yapılar istenmektedir. Tane küçültme işlemi çeliğin bileşiminde Al, V, Ti, Nb, Zr, B gibi alaşım elementlerinin varlığının yanı sıra; normalizasyon, sıcaklık kontrollü haddeme ve diğer termomekanik işlemlerle yapılabilmektedir (Dikeç, 2010, s. 125).

Şekil 3.7’de tane büyüklükleri ASTM standartlarına göre belirlenen iki farklı malzeme yer almaktadır. Tane büyüklüğü 5 olan malzemede inç karedeki tane sayısı 16, tane büyüklüğü 7 olan malzemede inç karedeki tane sayısı 64’tür. Malzemenin tanelerinin küçük olması mekanik özellikleri arttırırken, tanelerin büyük olması malzemeyi gevrekleştirir ve daha kırılgan yapar.



Şekil 3.7. ASTM standartlarına göre tane büyüklükleri belirlenen malzemeler

Kaynak: Koçak, 2006, s. 20

Bir malzemenin kimyasal bileşiminin yorulma dayanımına etkisi yaklaşık olarak çekme dayanımına etkisi ile orantılıdır. Dolayısıyla malzeme yapısında alaşımlar kullanarak malzemenin statik çekme dayanımının arttırılması, yorulma dayanımını da arttırabilmektedir.

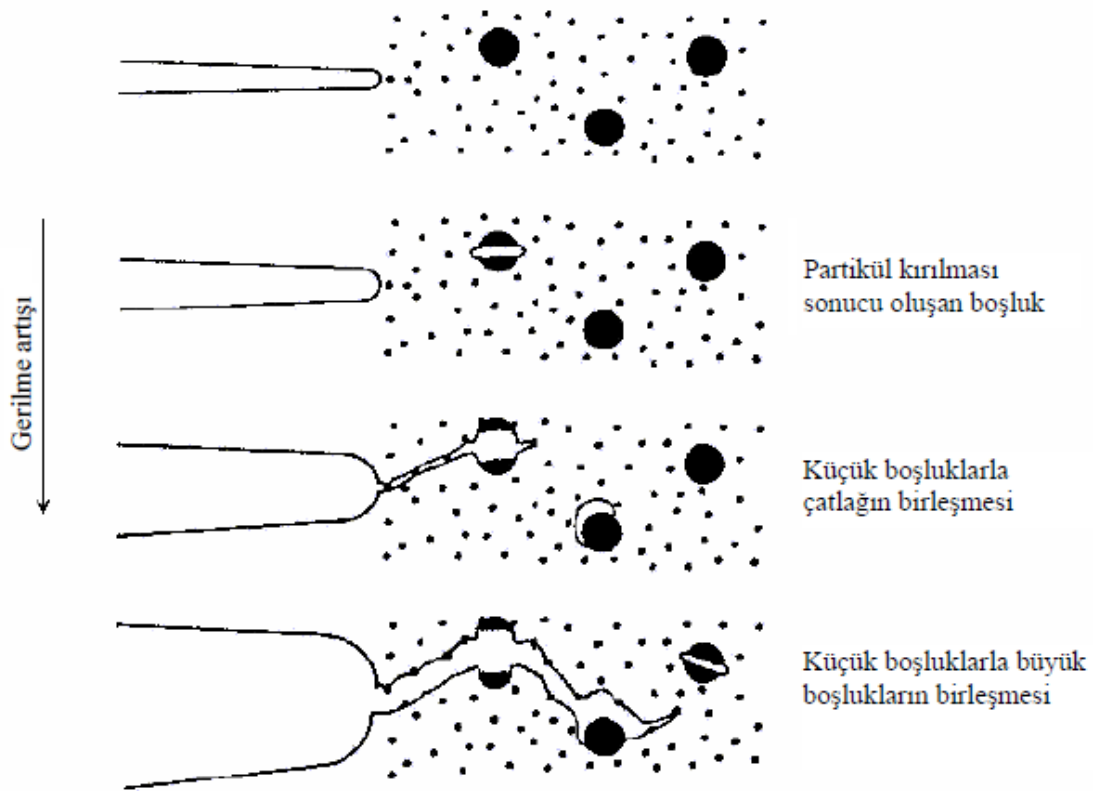
Çelikler için de, katılan alaşım elementlerinin statik çekme dayanımını artırarak, yorulma dayanımı arttırdığı söylenebilir. Sade karbonlu çeliklerin yorulma dayanımı genellikle karbon içeriğiyle birlikte artmaktadır. Molibden, krom ve nikel de benzer etkiye sahiptir. Yüksek mukavemetli çeliklerin yorulma dayanımı bakır ilavesi ile artırılabilir. Fosforun malzeme içerisindeki kimyasal bileşimi kırılabilirliği önlemek için minimum seviyede tutulmasına rağmen, yüksek fosfor içeren çeliklerin daha büyük yorulma dayanımları vardır. Sülfür ise malzeme içerisinde % 0,01'den düşük miktarda olduğu sürece yorulma sınırına etki etmemektedir. Nikel ve krom içeren östenitik çelikler, düşük çentik hassasiyeti ve korozyon yorulmasına yüksek dayanımlarının yanı sıra, yüksek bir yorulma sınırına sahiptir. Bununla birlikte alaşım elementlerinin döküm esnasında segregasyonlar meydana getirerek yorulma dayanımını etkileyebileceği de belirtilmelidir (Becker and Shipley, 2002, s. 719).

Bir malzemeye katılan alaşım elementlerinin (karbon hariç) çeliklerin yorulma dayanımını artırması aynı zamanda çeliklerin içyapısını da değiştirmelerine bağlıdır. Uygun su verme ve menevişleme işlemleri ile statik çekme dayanımı ve sertliği artırılan çeliklerin yorulma dayanımı da artmaktadır (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 161). Isıl işlem ile güçlendirilemeyen alaşımların yorulma dayanımlarını soğuk şekillendirme ile arttırmak mümkündür (Becker and Shipley, 2002, s. 718).

Metalik malzemelerde yorulma hasarı dislokasyon hareketleri sonucunda oluşan kalıcı şekil değişimlerinden kaynaklandığı için dislokasyon hareketlerini etkileyen faktörler malzemenin yorulma özelliklerini de etkileyecektir. Dislokasyon hareketleri yapı içerisindeki çökeltilerden, kalıntılardan, tane sınırlarından etkilenir (Ellyin, 1997, s. 23). Malzeme kalıntıları, katı çökelti parçacıkları, tane sınırları gibi kristal süreksizlikler malzeme yapısı içerisinde yorulma çatlak oluşumuna sebep olan mikroskobik gerilme yığılmalarına örnektir. Oluşan gerilme yığılmalarının etkisiyle yüzeyde oluşan mikro çatlaklar zamanla büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar (Becker and Shipley, 2002, s. 706).

Malzeme içerisinde genellikle hata olarak tanımlanan kalıntılar gerilme yığılmalarına sebep olarak yapının mukavemetini dolayısıyla da yorulma

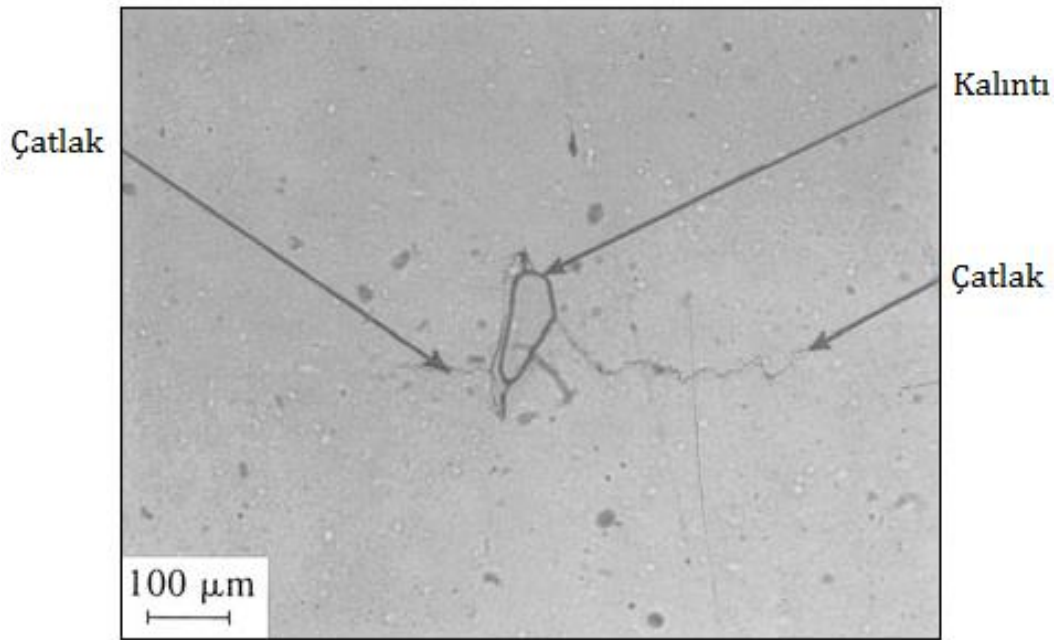
dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadır. Kalıntılar malzeme yapısına göre daha kırılgandırlar ve etrafını çevreleyen matris gibi kolay şekil değiştiremezler. Bu da kalıntı sınırlarında veya içerisinde mikro boşluklar oluşmasına yol açar. Bu mikro boşlukların başlama, ilerleme ve birleşme mekanizması karakteristik kırılma özelliğini ortaya çıkarır (Ewalds and Wanhill, 1984, s. 270). Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi

Mikro yapıdaki kalıntılar, onlarca yıl çeliklerdeki yorulma hasarının genel bir problemi olarak ilişkilendirilmiş ve yorulma dayanımını azaltıcı bir etki göstermiştir. Günümüzde genel olarak düzgün bir numunenin, kalıntı miktarındaki artışla beraber yorulma sınırının düşeceği kabul edilmektedir. En zararlı kalıntılar sert ve kırılgan oksit kalıntılar iken en az zararlı kalıntılar MnS kalıntılarıdır (Atkinson and Shi, 2003, s. 461). Kalıntıların yorulma dayanımına etkisi, şekil ve boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Yumuşak çelikler, sert çeliklere göre kalıntılardan daha az etkilenmektedir (Becker and Shipley, 2002, s. 719). Çelik

içindeki kalıntı bileşikleri çeliğin kırılma davranışları ile dayanım özelliklerini büyük ölçüde etkiler ve yöne bağımlılık meydana getirirler. Kalıntı bileşiklerinin etrafında oluşan gerilme yığılmaları sonucunda yorulma çatlakları genellikle buralardan başlar (Can, 2006, s. 170). Çelikler kalıntılardan arıtıldığı zaman yorulma dayanımlarında artış meydana gelecektir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 163). Şekil 3.9'da düşük alaşımlı bir karbon çeliğinde bulunan MnS kalıntısı görülmektedir. Şekil 3.10'da ise yüksek mukavemetli bir çelik içerisinde bulunan cüruf kalıntısı görülmektedir.



Şekil 3.9. Düşük alaşımlı bir karbon çeliğinde bulunan MnS kalıntısı

Kaynak: Milella, 2013, s. 138



Şekil 3.10. *Yüksek mukavemetli bir çelik içerisinde bulunan cüruf kalıntısı*

Kaynak: *Schijve, 2009, s. 28*

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada çelik temizliği yapılan ve yapılmayan numunelerin farklı genliklerdeki yorulma davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik malzemenin yorulma testlerinin yapılabilmesi için, akma ve çekme gerilmelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle çekme testleri yapılarak bu değerler belirlenmiş, ardından yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler ve sonuçları bu bölümde açıklanmıştır.

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzeme

Deneysel çalışmalarda, Tablo 4.1’de kimyasal bileşimi verilen çelik malzeme kullanılmıştır. CE ile ifade edilen değer karbon eşdeğeridir. Çeliğin bileşiminde bulunan karbon ve mangana ek olarak krom, molibden, vanadyum, nikel ve bakır elementleri de sertliğe katkıda bulunur ve bu elementlerin sertliğe katkılarını belirlemek üzere karbon eşdeğeri kavramı oluşturulmuştur. Karbon eşdeğeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Ginzburg and Ballas, 2000, s. 142):

$$CE = C + \left(\frac{Mn}{6}\right) + \left(\frac{Cr + Mo + V}{5}\right) + \left(\frac{Ni + Cu}{15}\right) \quad (3.1)$$

Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik malzemenin kimyasal bileşimi

% C	% Mn	% P _{max}	% S _{max}	% Al	Ca (ppm)	% Ti _{max}	% Cr _{max}	% Mo _{max}	CE
0,14- 0,18	0,85- 1,05	0,035	0,035	0,02- 0,06	20-60	.010	.080	.020	0,41

4.2. Sertlik Testlerinin Yapılması

Deneysel çalışmalarda, öncelikle incelenen çelik numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin çelik temizliği işlemi öncesi ve sonrasındaki sertlik değerlerinin belirlenmesinde Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Vickers sertliği (HV), metalik malzemeler için güvenilir bir sertlik ölçüm metodu olduğu için tercih edilmiştir. Sertlik testleri EMCOTEST M1C 010 model sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1.a).

Sertlik testleri için öncelikle, işlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelerden birer kesit alınmıştır (Şekil 4.1.b). Alınan kesitlerin incelenecek yüzeyleri otomatik parlatma cihazı (STRUERS TegraPol-25) ile parlatılmıştır. Testlerde kullanılan elmas kare piramit ucu numunelere batırmak için 0,5 kg ($HV_{0,5}$) ve 1 kg (HV_1) yük uygulanmıştır. Vickers sertliğinin sonuçları uygulanan yüke bağlı değildir. Piramit ucun numunede bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek, cihaz tarafından sertlik değerleri hesaplanmaktadır. Çelik temizliği yapılan ve yapılmayan numuneler için en az 3 farklı noktadan ölçüm yapılmış olup yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.1. a) Sertlik testlerinin yapıldığı sertlik ölçüm cihazı b) Sertlik testlerinin uygulandığı numuneler

4.3. Çekme ve Yorulma Test Cihazı

Çekme ve yük kontrollü sabit genlikli eksenel yorulma testleri Şekil 4.2’de gösterilen Instron (8501 model) test cihazında yapılmıştır. 200 kN statik, 100 kN dinamik yük kapasiteli servo-hidrolik Instron cihazı bilgisayar yardımıyla kumanda edilebilmektedir.

Bu cihazdaki çekme testleri, cihazın bağı olduğu bilgisayarda yer alan Series IX paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu programa numune boyutları ve hareketli çenenin çekme hızı bilgileri girilerek statik testler yapılmaktadır. Test sonunda akma dayanımı, çekme dayanımı gibi istenilen mekanik özellikler program tarafından hesaplanmakta ve gerilme-şekil değişim grafiği çizilmektedir.

Bu cihazdaki yorulma testleri, cihazın bağı olduğu bilgisayarda yer alan MAX V5,0 paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu programda testler, ortalama yük, genlik, frekans ve çevrim sayısı değerleri girilerek yapılmaktadır. Test sonunda yorulma kırılan test numunesinin hangi çevrim sayısında koptuğı cihaz tarafından verilmektedir.

Çekme ve yorulma numuneleri Instron test cihazına bağlanırken, kavrama çenelerine uygulanan hidrolik gücün, her iki çene için de eşit olmasına ve numunenin çene eksenine paralel olarak bağlanmasına dikkat edilmiştir.

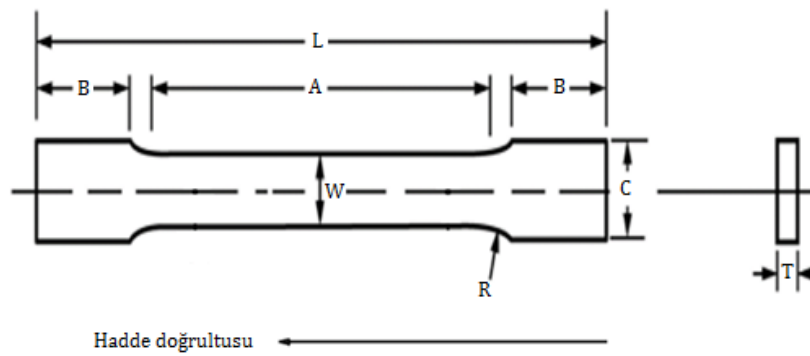


Şekil 4.2. Çekme ve yorulma testlerinin yapıldığı Instron test cihazı

4.4. Çekme ve Yorulma Test Numunelerinin Hazırlanması

ASTM E8 standartlarına göre (ASTM E 8/E 8M – 08, 2008, s. 3) hazırlanan çekme testi numunesinin geometrisi Şekil 4.3'te gösterilmiş ve ölçüleri Tablo 4.2'de verilmiştir. ASTM E466 standartlarına göre (ASTM E466-07, 2007, s. 3) hazırlanan yorulma testi numunesinin geometrisi Şekil 4.4'te gösterilmiş ve ölçüleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

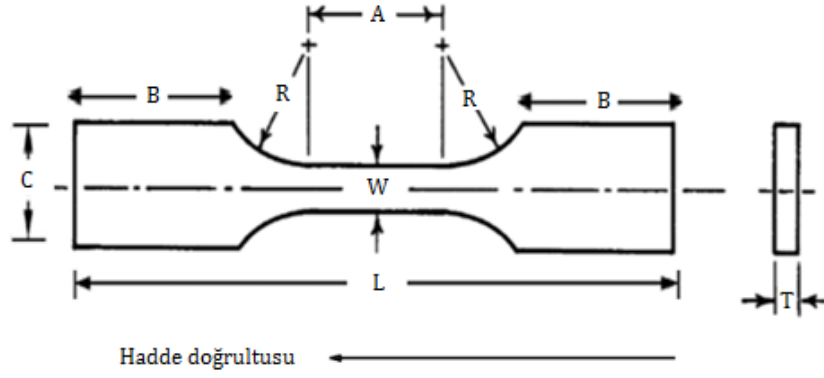
Metalik malzemelerin yük kontrollü eksenel yorulma testleri için ortam sıcaklığı 10 °C ile 35 °C arasında bir değer olmalıdır (ISO 1099:2006(E), 2006, s. 1). Hazırlanan test numuneleri ile yapılan tüm mekanik testlerde Instron cihazı 23 °C ortam sıcaklığında çalışmıştır.



Şekil 4.3. Çekme testi numune geometrisi

Tablo 4.2. Çekme testi numune ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir)

W	İnceltilmiş kısmın genişliği	12,5
T	Numunenin kalınlığı	4,4
R	Kavis yarıçapı	12,5
L	Numunenin tüm uzunluğu	200
A	İnceltilmiş kısmın uzunluğu (Kavisin bittiği birbirine paralel iki uç arasındaki mesafe)	57
B	Grip kısmının uzunluğu	50
C	Grip kısmının genişliği	20



Şekil 4.4. Yorulma testi numune geometrisi

Tablo 4.3. Yorulma testi numune ölçüleri (ölçüler mm olarak verilmiştir)

W	İnceltilmiş kısmın genişliği	10
T	Numunenin kalınlığı	4,4
R	Kavis yarıçapı	85
L	Numunenin tüm uzunluğu	190
A	İnceltilmiş kısmın uzunluğu (Kavisin bittiği birbirine paralel iki uç arasındaki mesafe)	30
B	Grip kısmının uzunluğu	40
C	Grip kısmının genişliği	30

4.5. Çekme Testlerinin Yapılması

Çelik temizliğinin yapılmadığı işlemsiz numuneler ile çelik temizliği yapılan numuneler aynı koşullar altında, ASTM standartlarına göre çekme testlerine tabii tutulmuş, çekme hızı da bu standartlara göre belirlenmiştir. Çekme hızı, Şekil 4.3'te A ile gösterilen inceltilmiş kısmın uzunluğunun milimetre/dakika cinsinden minimum 0,05'i kadar olmalıdır. Buna göre yapılan çekme testlerinde çekme hızı yaklaşık 4 mm/dk olarak alınmıştır. Çekme testleri, numune kopuncaya kadar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5).

Çelik temizliği yapılmayan numuneye ait çekme testi sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir. Çekme testinin aynı şartlar altında tekrarları yapılarak sonuçlar kontrol edilmiştir.

Çelik temizliği yapılan numuneye ait çekme testi sonuçları ise Tablo 4.5'te verilmiştir. Çekme testinin aynı şartlar altında tekrarları bu numuneler için de yapılarak sonuçlar kontrol edilmiştir.

Çekme testlerinin yapılmasıyla birlikte, yorulma testlerinin yapılabilmesi için bilinmesi gereken akma ve çekme gerilmeleri elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Çekme testi sonucu kopan numune

Tablo 4.4. Çelik temizliği yapılmayan numunenin çekme testi sonuçları

% 0,2 akmadaki gerilme (MPa)	361,8
Elastisite modülü (MPa)	115200
Maksimum şekil değişimi (%)	31,59
Maksimum yük (kN)	27,54
Maksimum uzama (mm)	24,62
Kopma yükü (kN)	20,10

Tablo 4.5. Çelik temizliği yapılan numunenin çekme testi sonuçları

% 0,2 akmadaki gerilme (MPa)	348,4
Elastisite modülü (MPa)	103300
Maksimum şekil değişimi (%)	27,84
Maksimum yük (kN)	26,36
Maksimum uzama (mm)	23,39
Kopma yükü (kN)	19,81

4.6. Yorulma Testlerinin Yapılması

İncelenen çelik malzemenin yorulma dayanımı hakkında fikir edinebilmek için, yük kontrollü sabit genlikli eksenel yorulma testleri yapılarak işlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelere ait S-N (gerilme-ömür) diyagramları oluşturulmuştur. Numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilirken, ilk deney numunesi üst gerilme, akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanmış, daha sonraki deney numunelerine ise azalan şekilde zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanmıştır.

Öncelikle S-N diyagramı oluşturulurken kullanılacak, maksimum yük, minimum yük, yük oranı, ortalama yük, genlik ve frekans değerleri belirlenmiştir. Yorulma testleri gerçekleştirilirken, nispeten yüksek gerilmelerin uygulandığı ilk deneylerde çekme dayanımının yaklaşık 2/3'ü değerinde bir gerilme seçilmektedir (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 159).

Çelik temizliği yapılmayan numunelerin çekme testleri sonucunda, tüm testlerde elde edilen çekme mukavemetleri ortalaması olarak $F_{max} = 27$ kN alınmıştır. Buradan hareketle, yapılan ilk yorulma deneyinde maksimum yük

$F_{\max} = 18 \text{ kN}$ olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak yük oranı ise 0,1 olarak seçilmiştir. Maksimum yük ve yük oranının belirlenmesi ile birlikte minimum yük, ortalama yük ve genlik değerleri aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

Denklem 3.4'e göre minimum yük $F_{\min} = 1,8 \text{ kN}$

$$(R = F_{\min} / F_{\max} \quad 0,1 = F_{\min} / 18 \text{ kN} \quad F_{\min} = 1,8 \text{ kN})$$

Denklem 3.1'e göre ortalama yük $F_m = 9,9 \text{ kN}$

$$(F_m = \frac{(F_{\max} + F_{\min})}{2} = \frac{(18 \text{ kN} + 1,8 \text{ kN})}{2} = 9,9 \text{ kN})$$

Denklem 3.3'e göre genlik $F_a = 8,1 \text{ kN}$

$$(F_a = \frac{(F_{\max} - F_{\min})}{2} = \frac{(18 \text{ kN} - 1,8 \text{ kN})}{2} = 8,1 \text{ kN})$$

S-N eğrisi oluşturabilmek için yapılan diğer yorulma deneylerinde maksimum yükler sırasıyla 16,5 kN ve 15,5 kN olarak seçilmiştir. Tablo 4.6'da uygulanan farklı yük değerleri için minimum yük, ortalama yük ve genliğin hangi değerleri aldığı gösterilmektedir. Çelik temizliği yapılan numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilirken, çelik temizliği yapılmayan numunelerle kıyaslama yapabilmek için, uygulanan maksimum yük değerleri (18 kN, 16,5 kN ve 15,5 kN) değiştirilmemiştir.

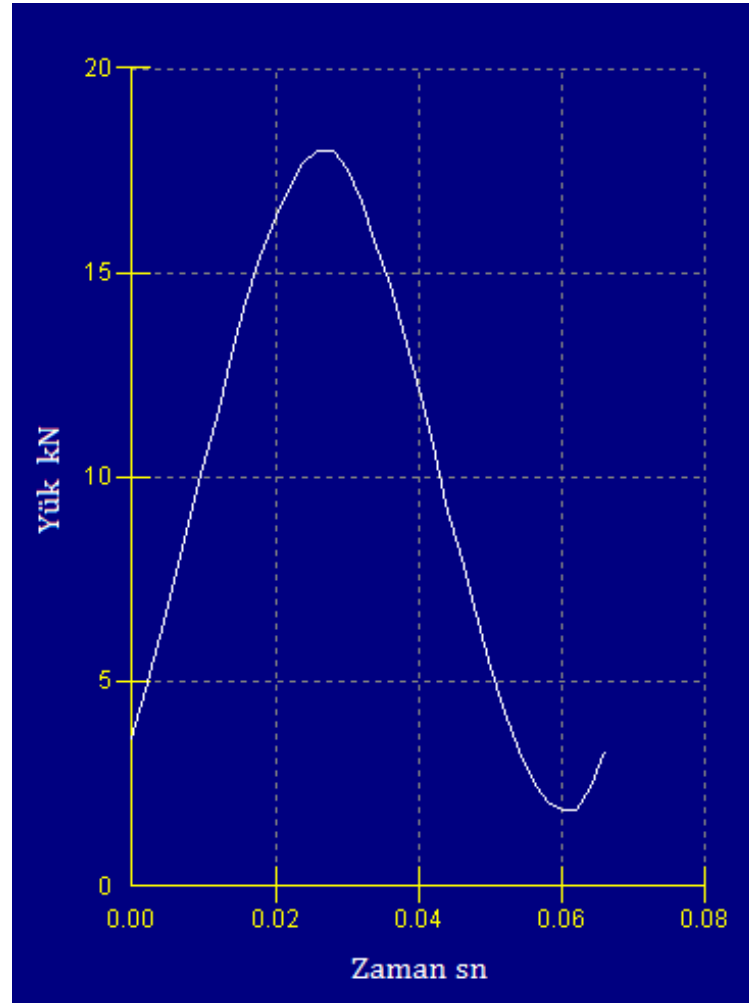
Tablo 4.6. Yorulma testlerinde kullanılan değerler

$F_{\max}(\text{kN})$	R	$F_{\min}(\text{kN})$	$F_m(\text{kN})$	$F_a(\text{kN})$
18	0,1	1,8	9,9	8,1
16,5	0,1	1,65	9,075	7,425
15,5	0,1	1,55	8,525	6,975

Frekans, yorulma testlerinin sonuçlarını etkilemeyecek şekilde 15 Hz (Hertz) olarak seçilmiş ve yapılan tüm yorulma testlerinde bu değer uygulanmıştır. Yapılan tüm deneylerde uygulanan yük sinüs eğrisi şeklinde olup (Şekil 4.6), yorulma testleri numune kopuncaya kadar gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).

Yorulma dayanımı sınırı (σ_{ds}), S-N diyagramında eğrinin asimptotik durum aldığı gerilmedir ve bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilmektedir. Demir – çelik grubu malzemelerde yorulma dayanımı sınırı çekme dayanımının yaklaşık yarısı, demir dışı metal ve alaşımlarda ise yorulma dayanımı sınırı çekme dayanımının yaklaşık 1/3'ü kadardır (Dikeç, Ensari ve Kayalı, 1983, s. 159).

Yapılan çekme testlerinin sonucunda, incelenen çelik malzemenin yorulma dayanımı sınırının yaklaşık olarak $F_{ds} = 12$ kN olacağı ön görülmüştür. Bu değer, kesin bir değer olmamakla beraber, malzemenin gerçek kullanım koşullarına göre bir miktar artabilir ya da azalabilir.



Şekil 4.6. MAX V5,0 programında sinüs eğrisi şeklinde uygulanan çevrimsel yükleme

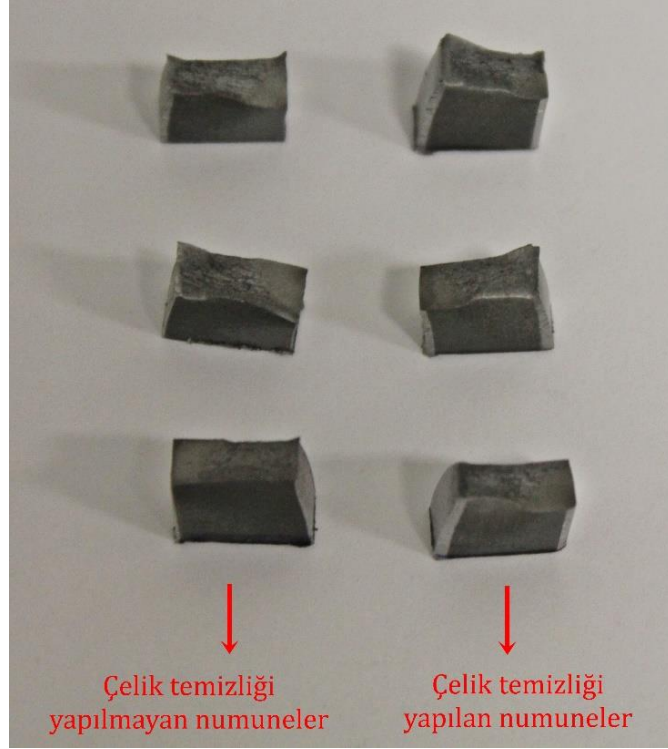


Şekil 4.7. Kırılarak kopan yorulma testi numunesi

4.7. Mikroyapı İncelemeleri

4.7.1. Numune hazırlama

İşlemsiz ve çelik temizliği yapılmış numunelerin mikroyapılarını incelemek için yorulma testleri sonrasında kopan parçalar hassas kesme cihazında (STRUERS Secotom-10) elmas disk ile kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında dönüş hızı 2800 devir/dk ve ilerleme hızı 0,010 mm/sn olarak alınmıştır. Kesme işleminden sonra elde edilen kırık numuneler Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



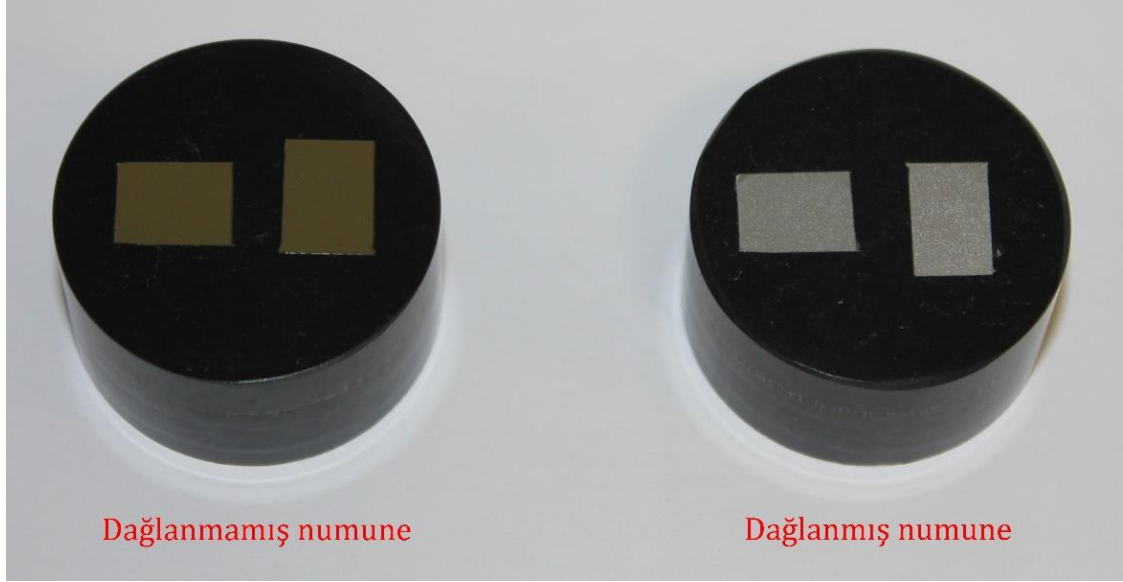
Şekil 4.8. Kesme işleminden sonra elde edilen kırık numuneler

Hassas kesme cihazından alınan numune kesitleri ise parlatma işleminin yapılabilmesi için sıcak kalıba alınmıştır. Sıcak kalıplama cihazında (STRUERS Struers LaboPress-3) 180 °C sıcaklık, 20 kN kuvvet ve 4 dakika ısınma ile soğuma süreleri seçilmiştir. Kalıba alınarak hazırlanmış numuneler otomatik parlatma cihazında (STRUERS TegraPol-25) kabadan inceye doğru sistemli bir şekilde parlatılmıştır. Tablo 4.7’de otomatik parlatma aşamaları ve detayları gösterilmektedir.

Tablo 4.7. Otomatik parlatma aşamaları

Kullanılan keçe	Kullanılan sıvı/çözelti	Dönme hızı (devir/dk)	Süre (dakika)	Kuvvet (N)
Piano 1200	Su	150	3,5	35
Largo	9µm’lik elmas çözelti	150	8	25
Dac	3µm’lik elmas çözelti	150	7	25
Nap	1µm’lik elmas çözelti	150	5	20

Otomatik parlatma işlemi bittikten sonra tane sınırlarının daha iyi görülebilmesi için seçilen bazı numuneler % 70 nitrik asit % 30 su çözeltisi ile yaklaşık 5 saniye süreyle dağlanmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler

4.7.2. Optik mikroskop incelemeleri

Mikroyapı incelemelerinde kullanılmak üzere hazırlanan numune kesitleri optik mikroskopta (Zeiss PrimoTech) 10X, 20X, 50X ve 100X büyütmelerde incelenmiştir. İşlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelerden görüntüler alınarak, çelik temizliği sonrasında içyapıda mevcut olan kalıntı miktarlarındaki değişim gözlemlenmiştir. Dağlama işlemi uygulanan numunelere de optik mikroskopla bakılarak, belirginleşen tane sınırları incelenmiştir.

4.7.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

İçyapıda meydana gelen değişiklikleri belirlemek amacıyla kırık yüzeyler ile numune kesitlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM, Zeiss SUPRA 50 VP) görüntüleri alınmıştır. Cihaz üzerinde yer alan ikincil elektron (SE) ve geri yansımali elektron (BSE) detektörlerinden farklı büyütmelerde alınan görüntülerde çelik temizliğinin içyapıya ve yorulma dayanımına etkileri araştırılmıştır.

4.7.4. Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) incelemeleri

Deneyisel çalışmalarda incelenen çelik numunelerin yapılarında bulunan elementler ve oranları, taramalı elektron mikroskobuna bağlı enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS, Oxford Instruments, INCA Energy) analizi ile belirlenmiştir. Çelik temizliği sonrasında değişim gösteren ağırlıkça element yüzdeleri ve bu durumun yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Mekanik Test Sonuçları

Çelik temizliği yapılan ve yapılmayan numuneler için gerçekleştirilen sertlik testi sonuçlarının ortalaması alınarak belirlenen sertlik değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Elde edilen sertlik testi sonuçlarına göre, çelik temizliği yapılan numunenin sertlik değeri işlem görmemiş numuneye göre bir miktar artmıştır.

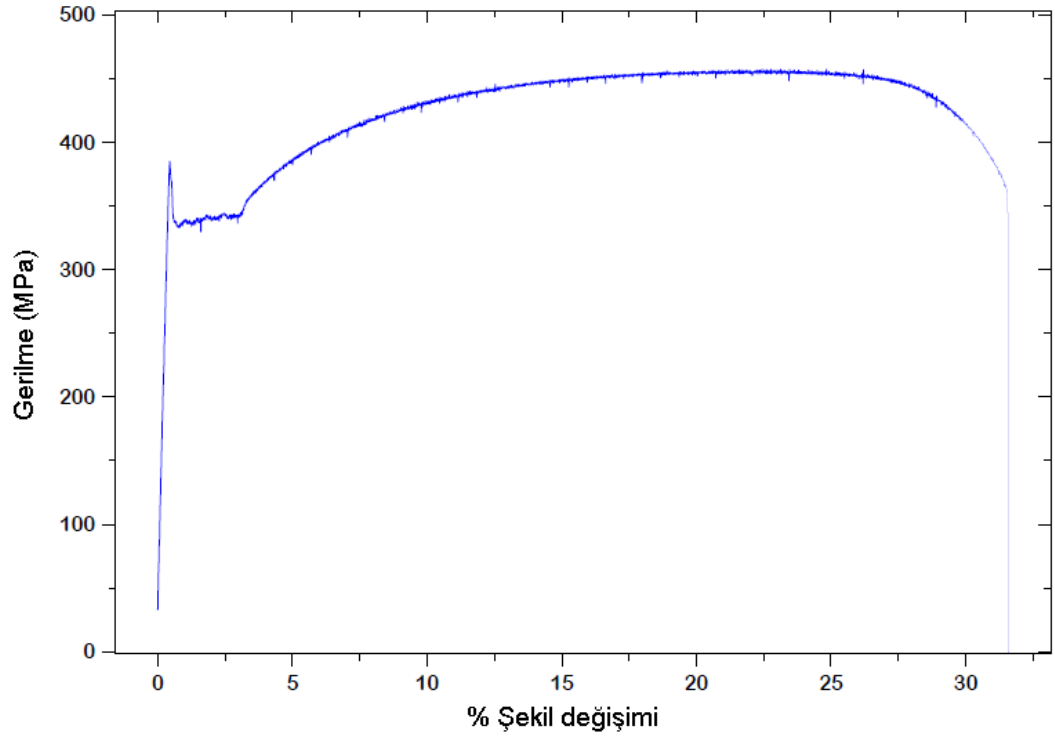
Tablo 5.1. Çelik temizliğinin sertlik testi sonuçlarına etkisi

Test numunesi	Uygulanan yük (kg)	Sertlik değeri (HV)
Çelik temizliği yapılmayan	0,5	154
	1	157
Çelik temizliği yapılan	0,5	176
	1	180

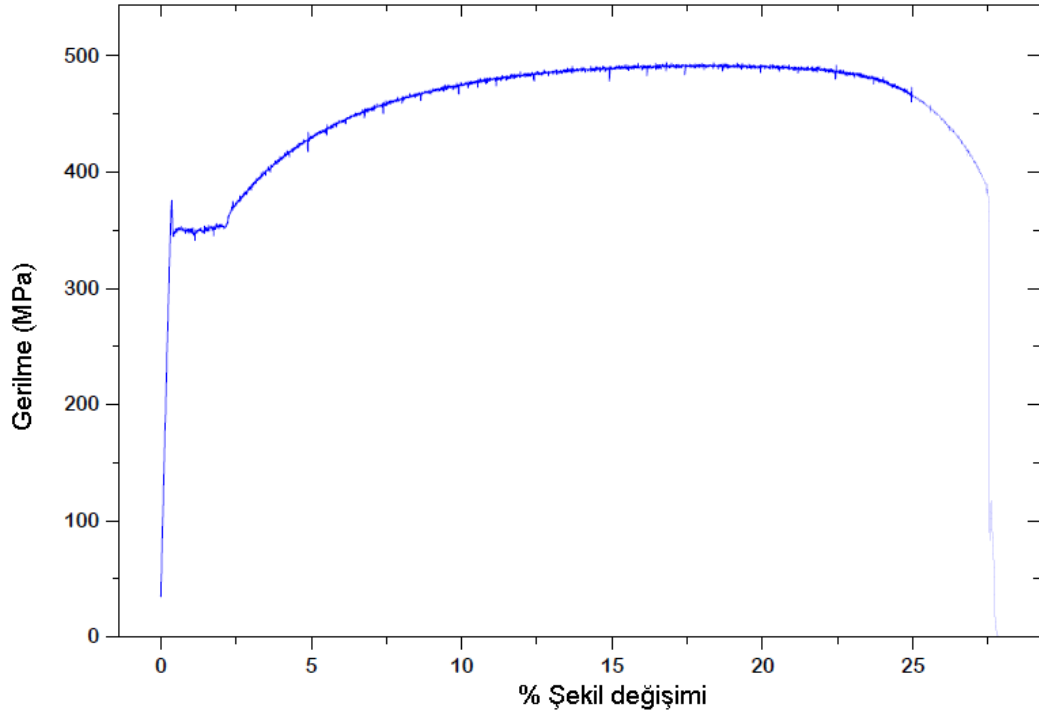
Çelik temizliği yapılan numunenin çekme testi sonuçları, çelik temizliği yapılmayan numunenin çekme testi sonuçlarına çok yakın olmakla beraber bir miktar düşük olarak ölçülmüştür (Tablo 5.2). Çelik temizliği yapılmayan numuneye ait çekme testi sonuçlarına göre çizilen gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Çelik temizliği yapılan numuneye ait çekme testi sonuçlarına göre çizilen gerilme-şekil değişimi grafiği ise Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Çelik temizliğinin çekme testi sonuçlarına etkisi

Ölçülen değerler	Çelik temizliği yapılmayan numune	Çelik temizliği yapılan numune	% Değişim
% 0,2 akmadaki gerilme (MPa)	361,8	348,4	3,70
Elastisite modülü (MPa)	115200	103300	10,33
Maksimum şekil değişimi (%)	31,59	27,84	11,87
Maksimum yük (kN)	27,54	26,36	4,28
Maksimum uzama (mm)	24,62	23,39	5,00
Kopma yükü (kN)	20,1	19,81	1,44



Şekil 5.1. Çelik temizliği yapılmayan numunenin gerilme – şekil değişimi grafiği

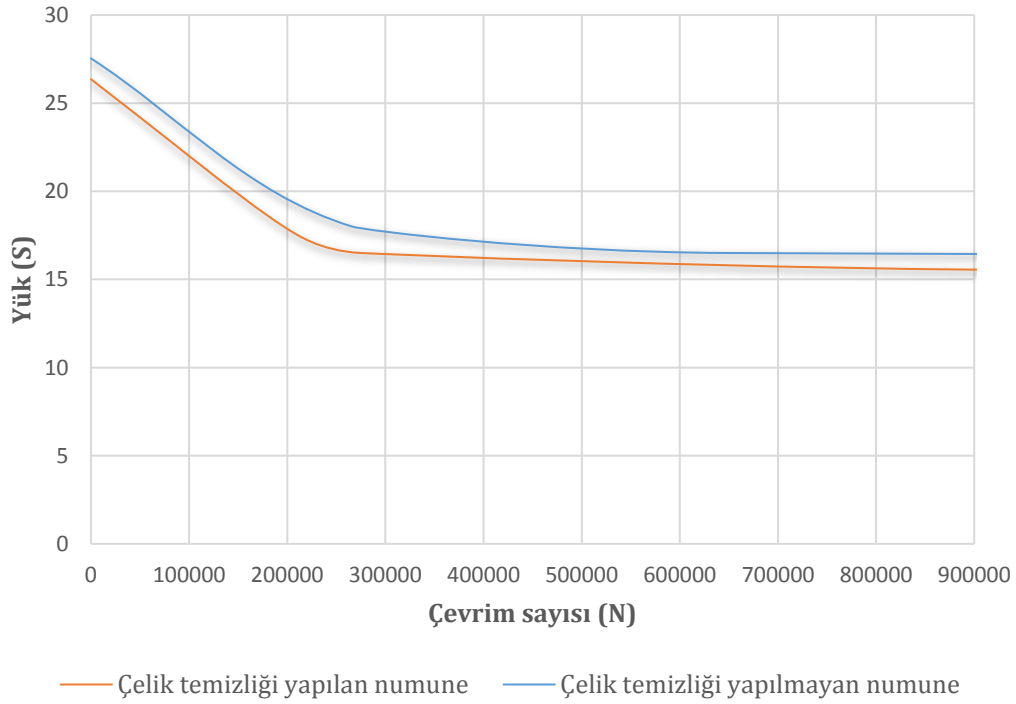


Şekil 5.2. Çelik temizliği yapılan numunenin gerilme – şekil değişimi grafiği

İşlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelere uygulanan maksimum yük değerleri sırasıyla 18 kN, 16,5 kN ve 15,5 kN olarak alınmıştır. Her bir maksimum yük değeri için, gerçekleştirilen testler sonrasında birbirine yakın sonuçların ortalaması alınarak, malzemenin o yük altında hangi çevrimde kırılacağı belirlenmiştir. Çelik temizliği yapılan numunenin yorulma testi sonuçları, çelik temizliği yapılmayan numunenin yorulma testi sonuçlarına göre bir miktar düşük olarak ölçülmüştür (Tablo 5.3). Yapılan yorulma testlerinin sonucuna göre çizilen S-N (gerilme-ömür) grafiği ise Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Çelik temizliğinin yorulma testi sonuçlarına etkisi

Maksimum yük (kN)	Çelik temizliği yapılmayan numune için kırılma çevrim sayısı	Çelik temizliği yapılan numune için kırılma çevrim sayısı	% Değişim
18	266.097	196.424	26,18
16,5	647.748	274.901	57,56
15,5	9.684.577	1.048.561	89,17



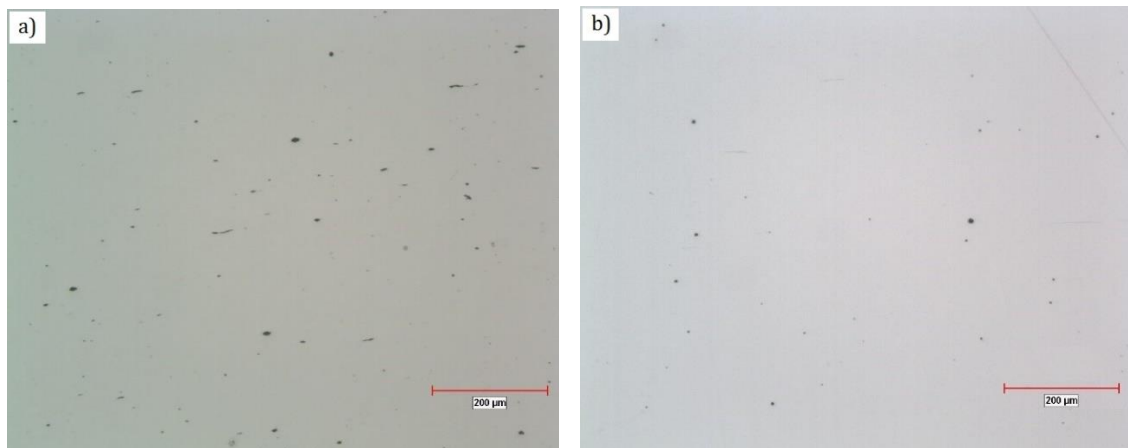
Şekil 5.3. Yorulma testleri sonucunda çizilen S-N eğrileri

Grafikte ordinat ekseninde yer alan S numuneye uygulanan yükü, apsis ekseninde yer alan N kırılma çevrim sayısını ifade etmektedir. Elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde, uygulanan kuvvet azaldıkça numunelerin yorulma ömürlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Numune, yorulma dayanımı sınırına ulaştığında ise, o kuvvet altında sonsuz çevrimde çalışabileceği kabul edilmektedir.

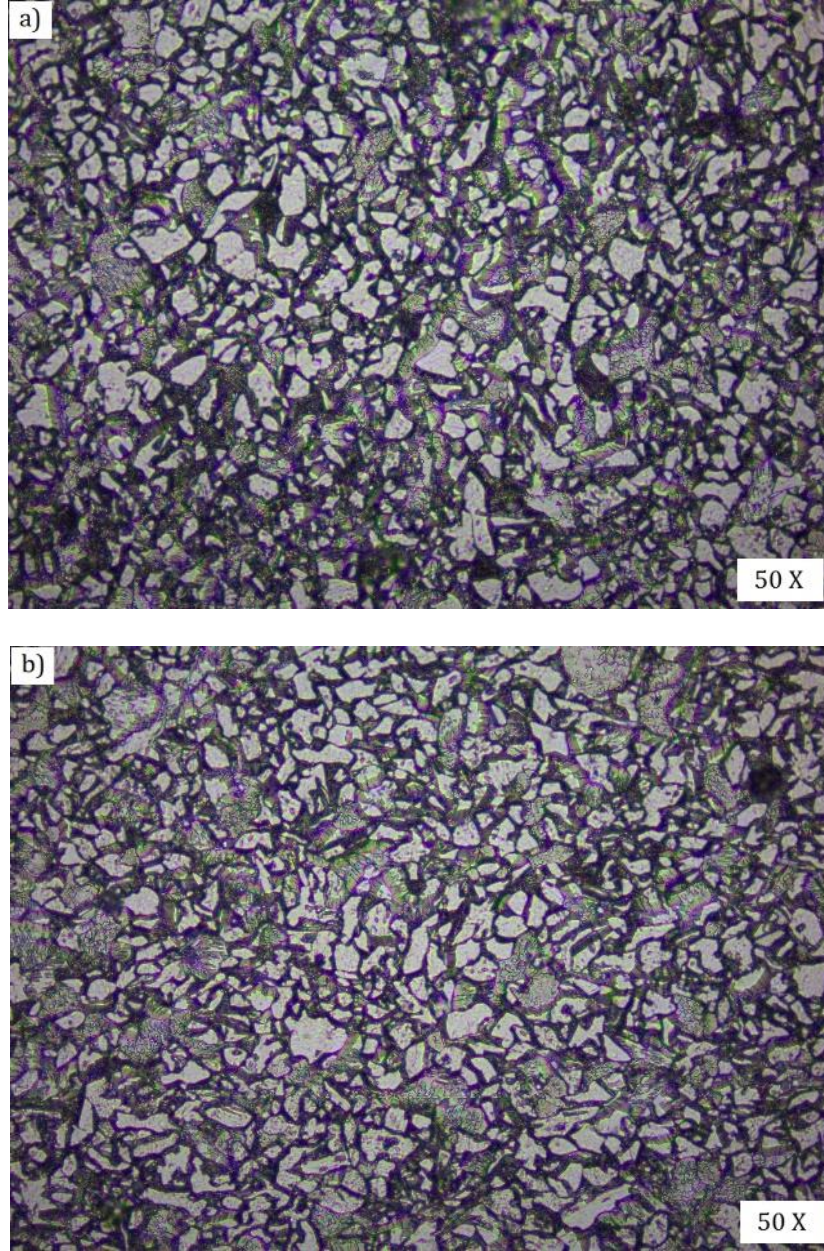
5.2. Mikro Yapı Sonuçları

Çelik temizliği işleminin yapılmasındaki amaç çelik malzemenin metalik olmayan kalıntılardan arındırılmasıdır. Bu kalıntılar şekil, boyut, adet ve yapı içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak çeliklerin yorulma ömrünü etkileyecektir. İncelenen numunelerde çelik temizliği işleminin mikroyapıya ve yorulma dayanımına etkileri bu bölümde tartışılmıştır.

Şekil 5.4'te işlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapılan çelik temizliği işlemi sonrasında mikro yapıda mevcut olan kalıntı miktarlarında azalış olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 5.5'te verilen işlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) dağlanmış numunelerin 50 X büyütmedeki görüntülerinde de çelik temizliğinin kalıntı miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. İçyapıdaki kalıntılar, uygulanan dağlama işlemi sonrasında ortaya çıkarılan tane sınırlarında veya tane içinde gözlemlenmiştir.

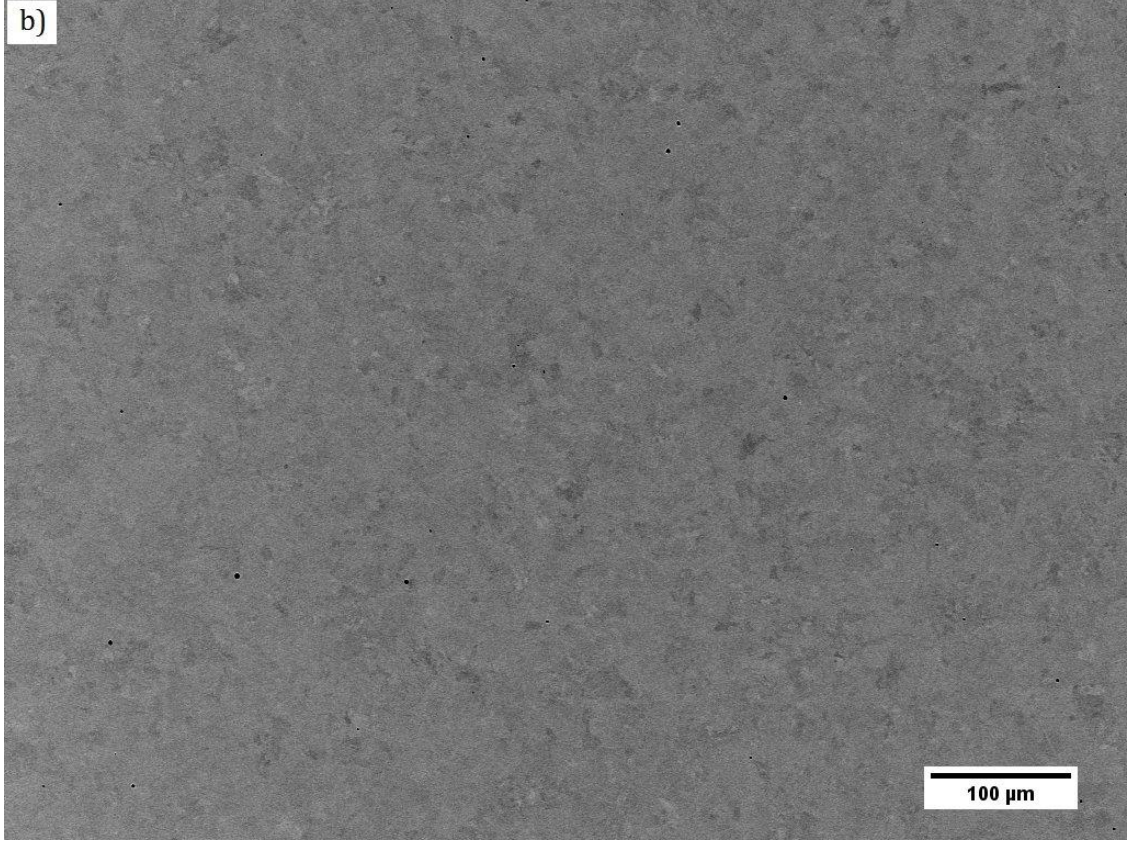
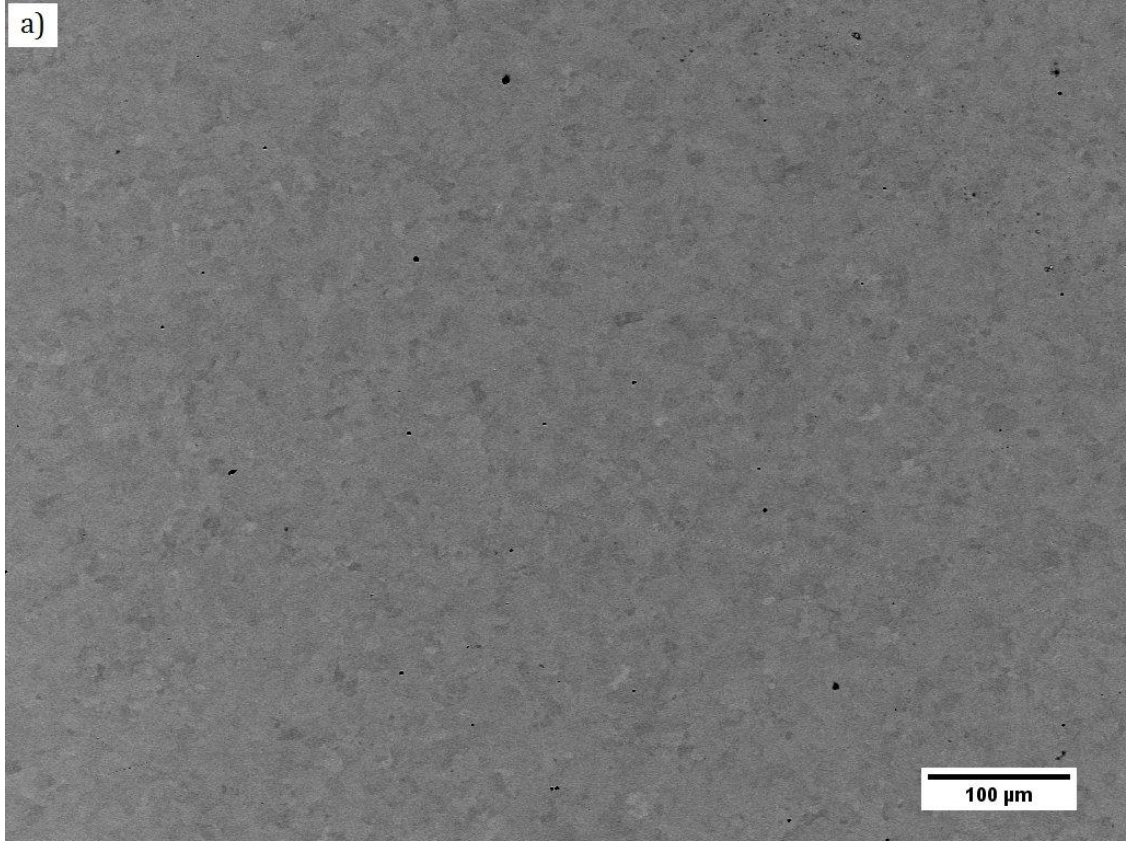


Şekil 5.4. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin optik mikroskop ile incelenmesi

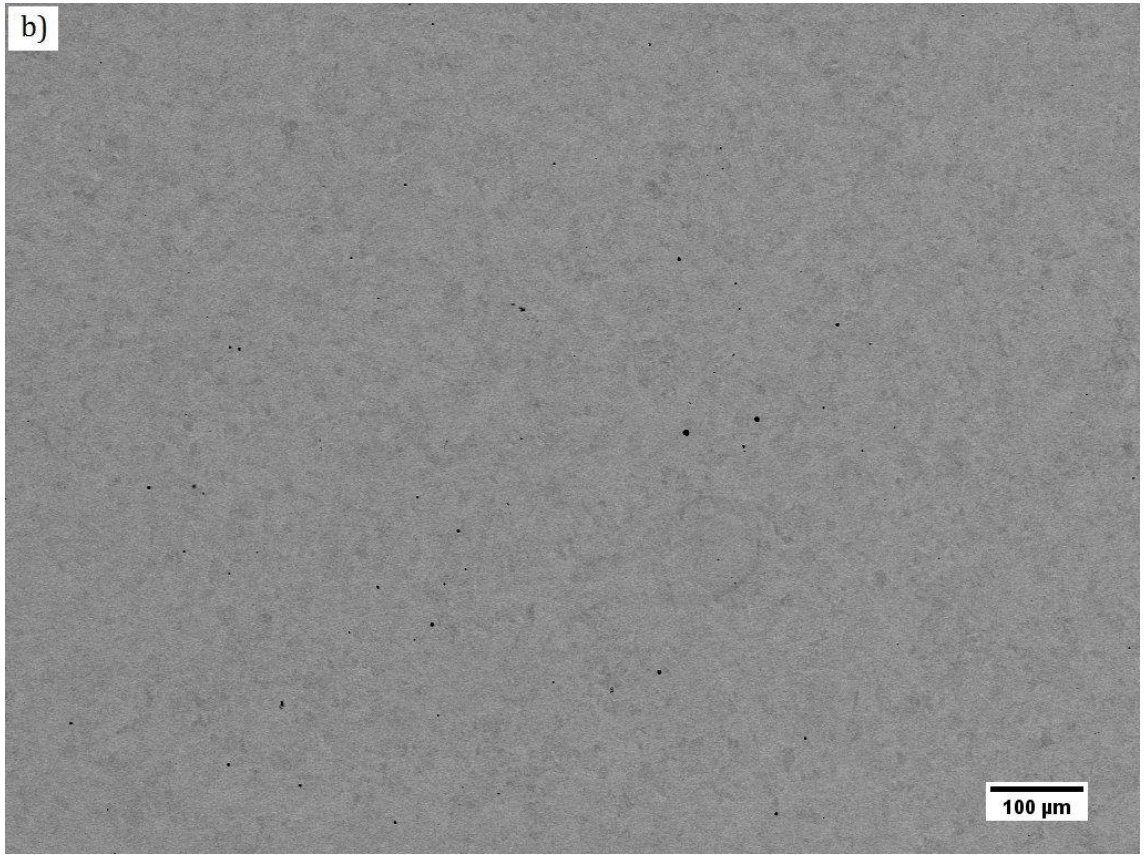
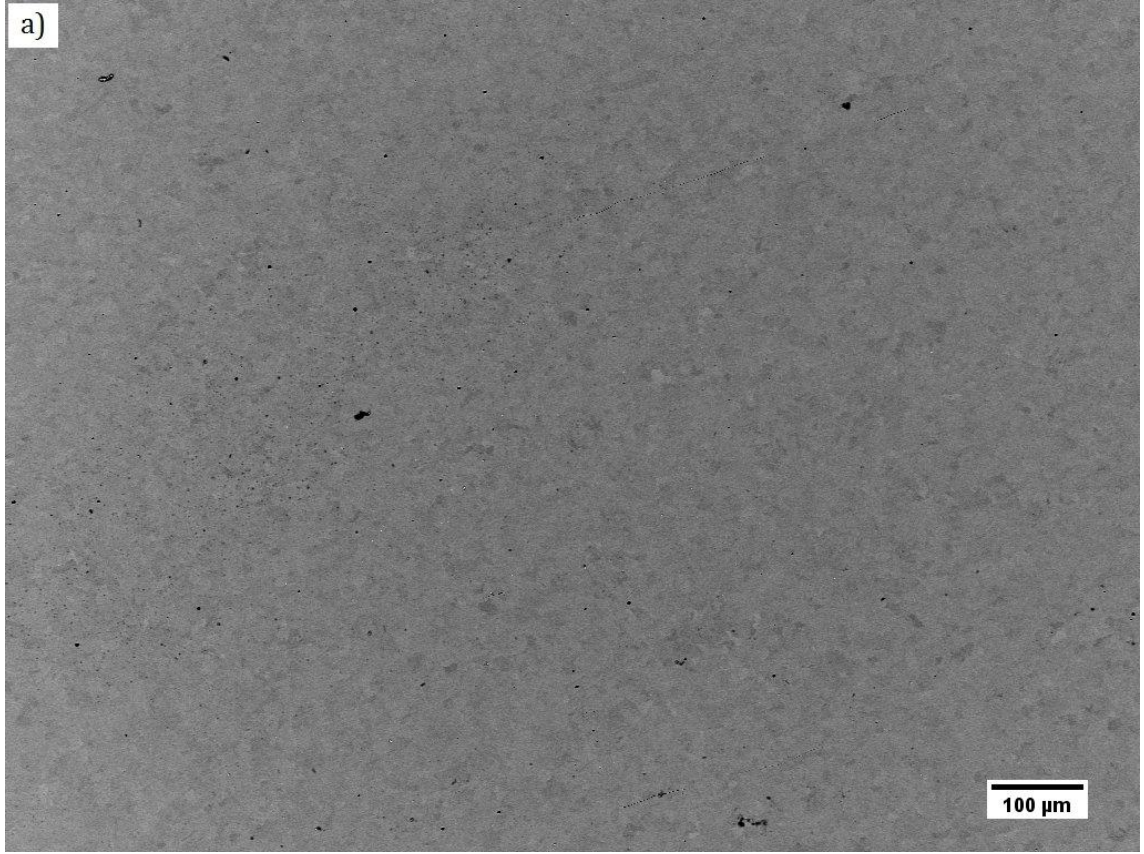


Şekil 5.5. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) dağlanmış numunelerin optik mikroskop ile incelenmesi

Yorularak kırılan numunelerden alınan kesitlerin taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmesi sonucunda çelik temizliği yapılan numunelerde içyapıdaki kalıntıların bir miktar azaldığını söylemek mümkündür. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de işlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Çelik temizliği işlemine tabi tutulan numunelerde mikroyapıda yer alan kalıntılar bir miktar azalmakla beraber şekilleri de küresel bir biçime dönüşmüştür.

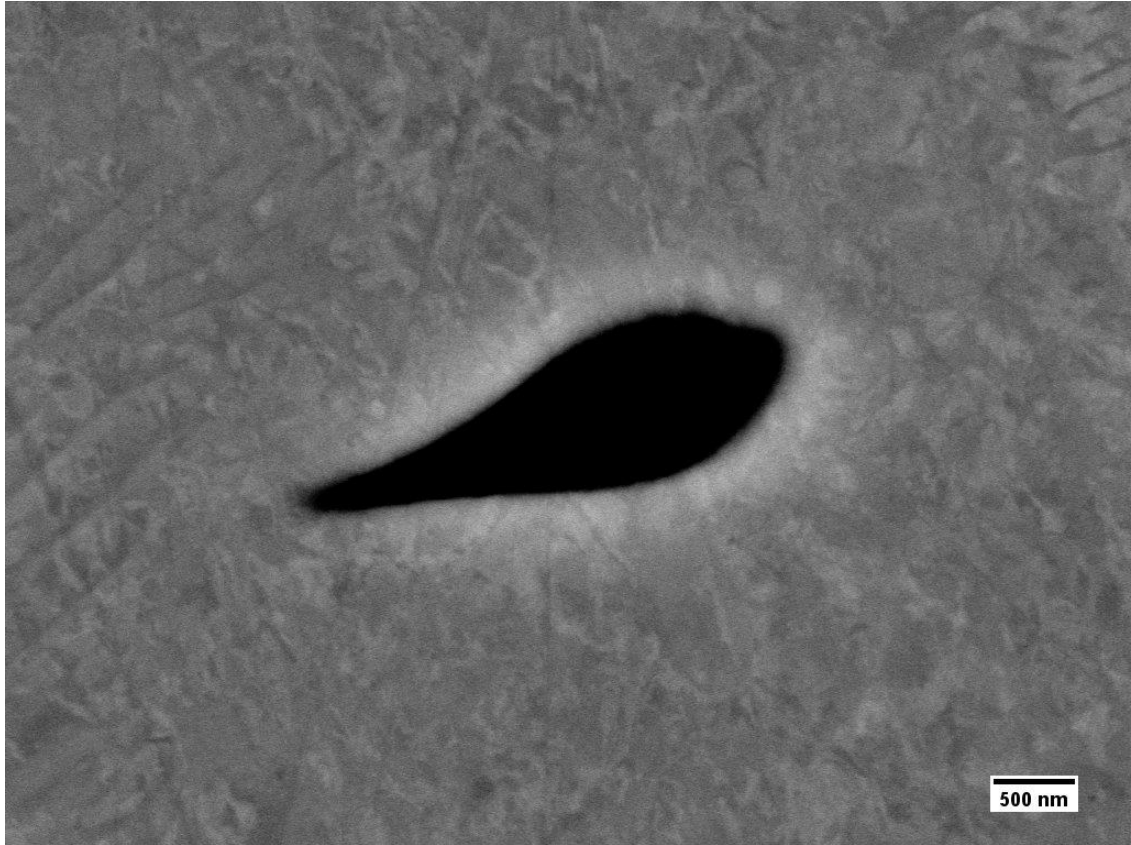


Şekil 5.6. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin 435 X büyütmedeki SEM görüntüleri

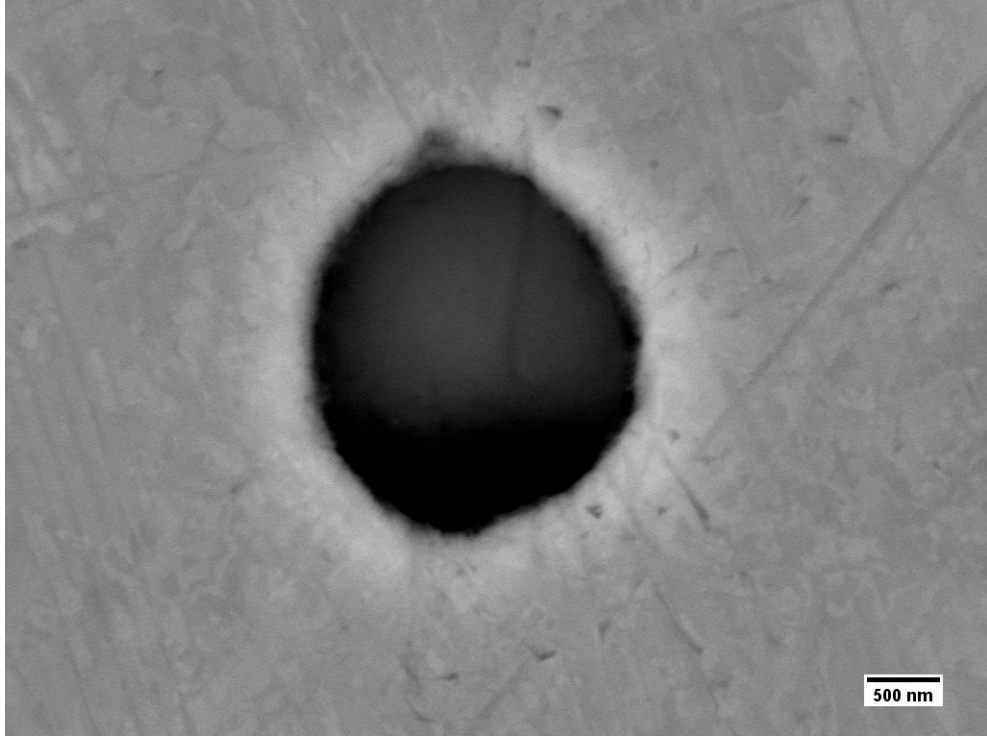


Şekil 5.7. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) numunelerin 304 X büyütmedeki SEM görüntüleri

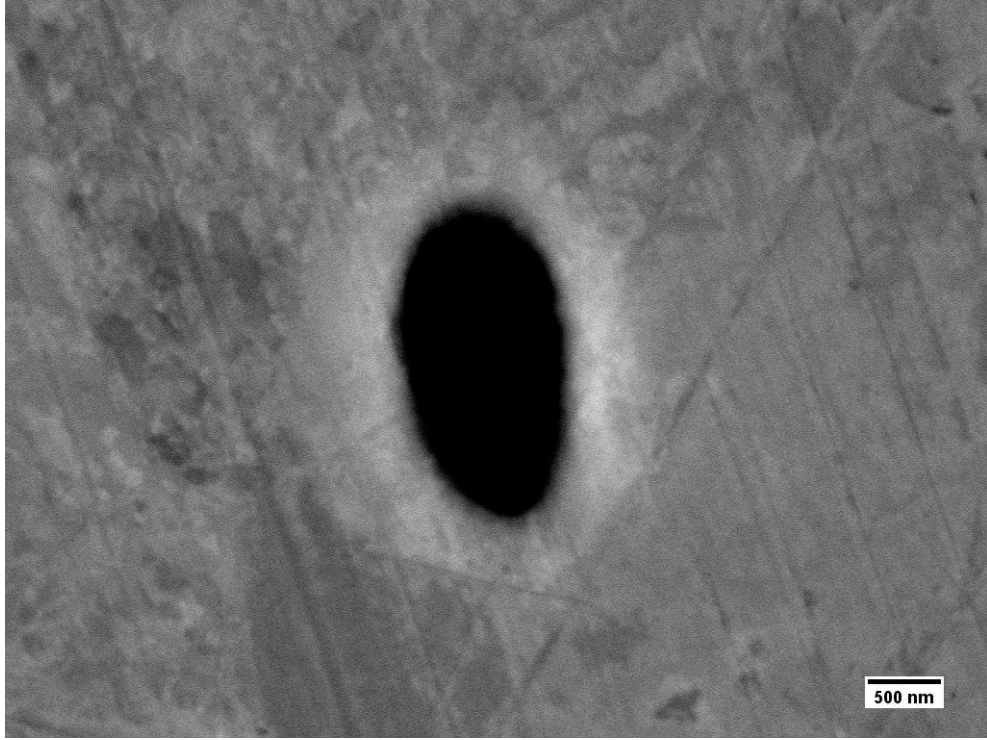
Temiz elik elde edebilmek için yapıdaki kalıntıların azaltılması ve modifiye edilerek zararsız kalıntılara dönüştürölmesi gerekmektedir. Malzemedenden giderilemeyen kalıntıların ise mekanik dayanımı en az etkileyen küresel biçimde olmaları tercih edilmektedir. İşlemsiz numunelerde görölen düzgün formda olmayan kalıntılar (Şekil 5.8) elik temizliğı işleminde küresel forma sahip kalıntılara dönüşmüştür (Şekil 5.9). elik temizliğı yapılan numunelerin içyapısında küresel biçimde kalıntılar gözlemlendiğı gibi düzgün formda olmayan kalıntılara da rastlanmıştır (Şekil 5.10). elik temizliğı sonrasında içyapıda küresel biçimde olmayan, keskin kenar ve köşelere sahip kalıntıların varlığı elik malzemenin yorulma dayanımını düşürücü bir etki yapacaktır.



Şekil 5.8. elik temizliğı yapılmayan numunede yer alan küresel biçimde olmayan bir kalıntının SEM görüntüsü



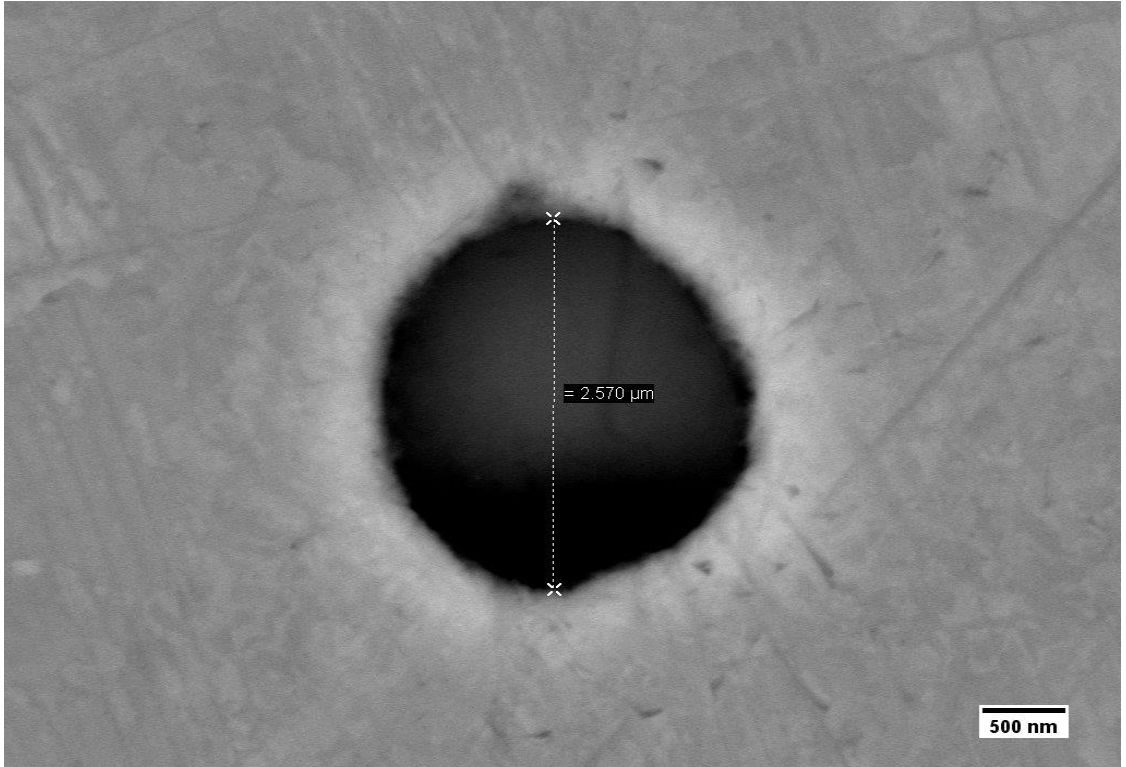
Şekil 5.9. Çelik temizliği yapılan numunede yer alan küresel biçimde olan bir kalıntının SEM görüntüsü



Şekil 5.10. Çelik temizliği yapılan numunede yer alan küresel biçimde olmayan bir kalıntının SEM görüntüsü

Temiz çelik elde etme sürecinde her kalıntının yapıdan uzaklaştırılması gerekmez. Eğer çelik malzemelerin içyapısındaki kalıntıların boyutu 100 mikrometre ve üzerinde ise bu kalıntılar oldukça zararlıdır ve yapıdan uzaklaştırılmaları gereklidir. Öte yandan 100 mikrometreden daha düşük bir boyuta sahip olan kalıntılar tane büyümesini sınırlayıp akma mukavemetini yükselttikleri için faydalıdır (Ghosh, 2001, s. 256). İşlemsiz ve çelik temizliği yapılan numuneler için kalıntı boyutları ölçülmüş olup alınan sonuçların 5 mikrometre altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.11). Dolayısı ile yapılan çelik temizliği işleminde bu kalıntıların yapıdan tamamen giderilmesi zaruri olmayıp, kalıntı şekillerinin mekanik dayanımı etkilemeyecek bir biçime sokulması amaçlanmıştır.

Çelik malzemelerin yorulma dayanımlarına içyapıda bulunan kalıntıların boyutları etki edecektir (Zhang vd., 2005, s. 130). Bu çalışmada işlemsiz numunelerde bazı kalıntı boyutlarının çelik temizliği yapılan numunelere kıyasla daha büyük olduğu bulunmuştur. Buna göre işlemsiz numunelerde tane büyümesini zorlaştıran ve akma mukavemetini arttıran bu kalıntılar, çelik malzemenin yorulma dayanımını da arttıracaktır.

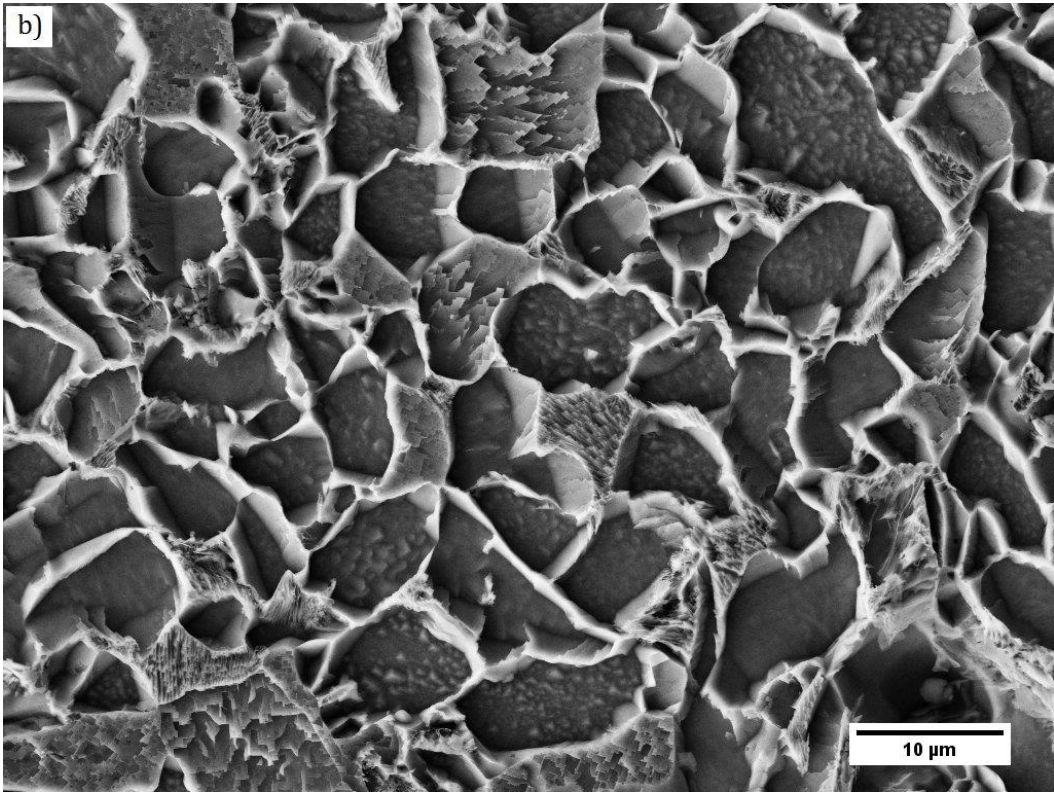
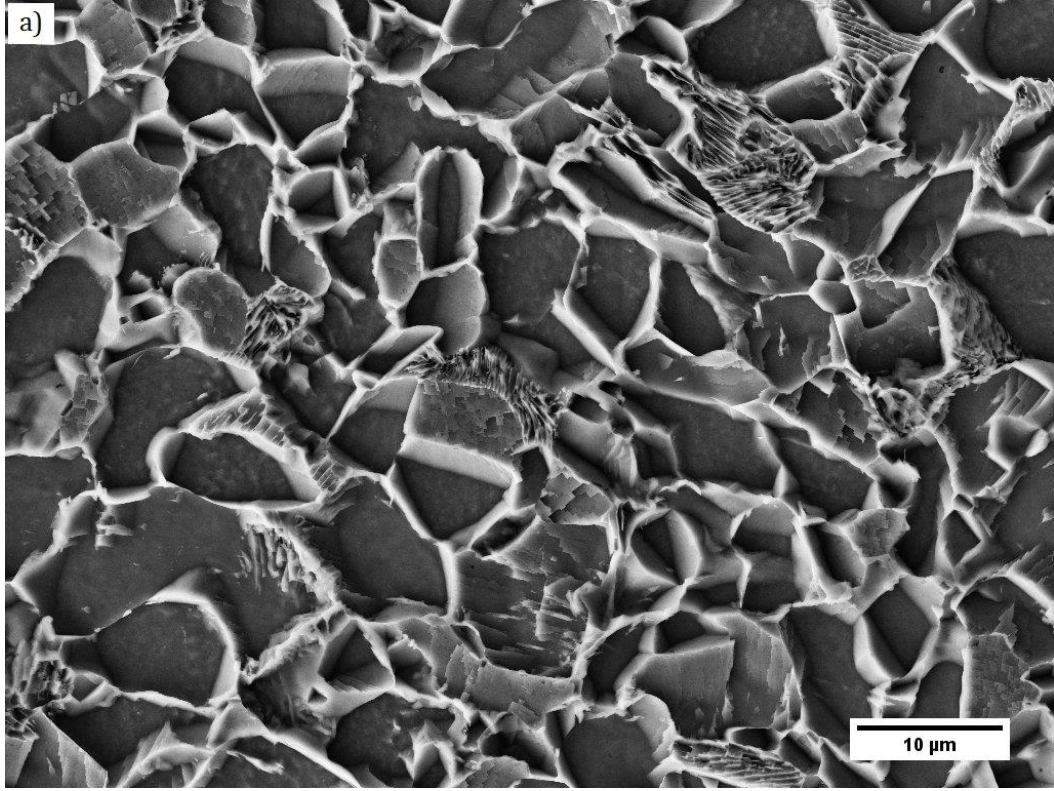


Şekil 5.11. Çelik temizliği yapılan numunede yer alan bir kalıntının boyutu

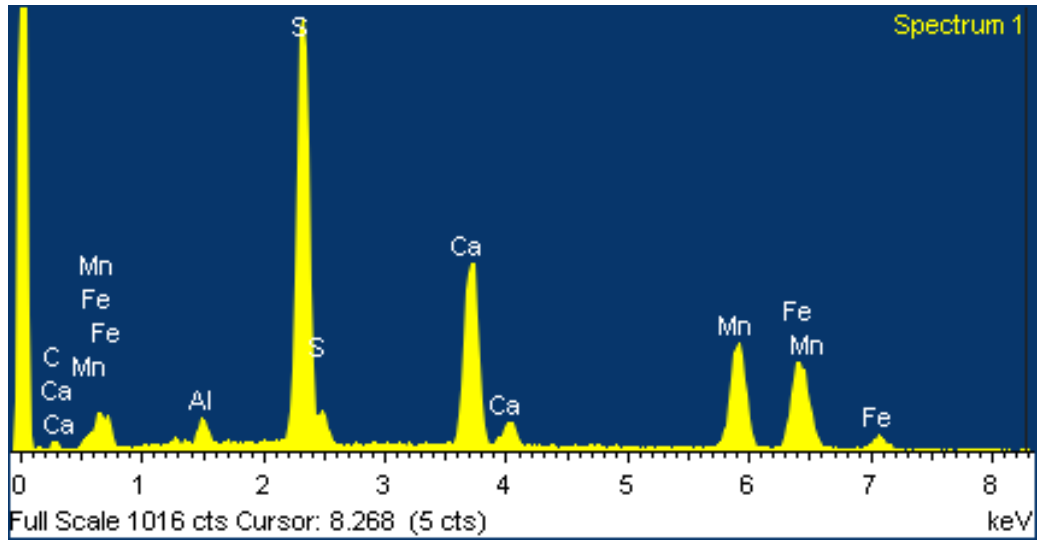
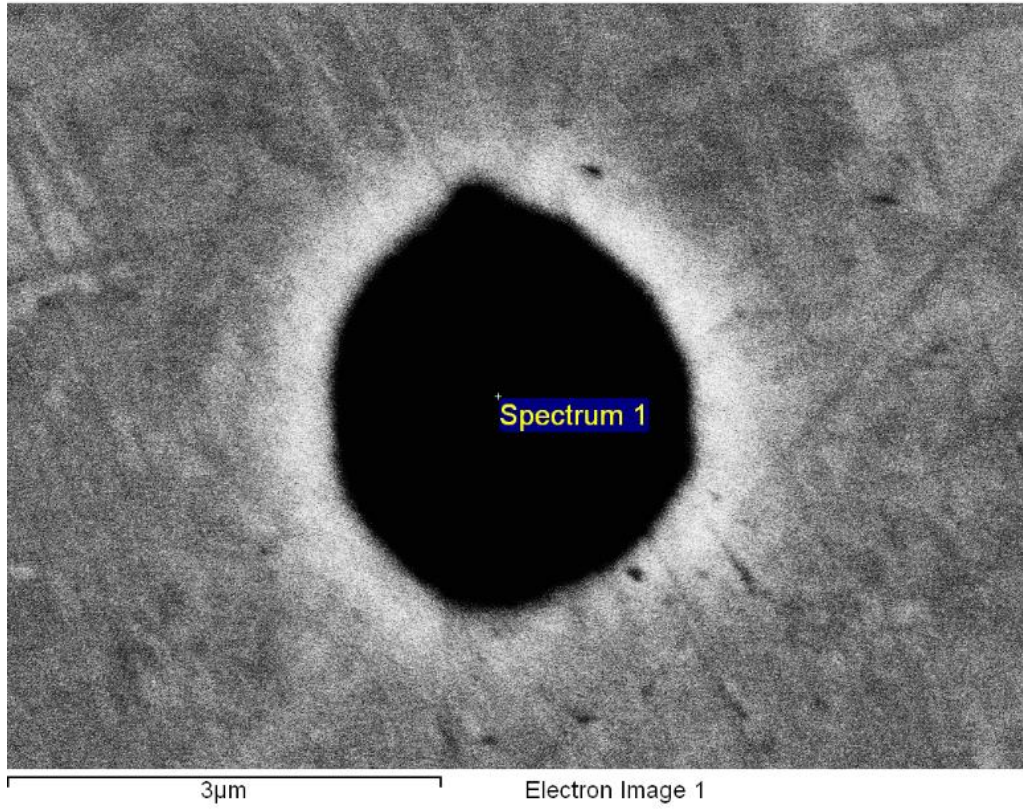
Çelik temizliği esnasında mikro yapıda meydana gelmiş olabilecek tane büyümesi gibi dayanımı düşüren içyapı değişiklikleri yorulma dayanımına etki edecektir. İncelenen çelik malzemelerin tane boyutlarının SEM görüntüleri Şekil 5.12’de verilmiştir. Tane boyutlarında gözlemlenen belirgin bir fark bulunmamaktadır. Yorulma dayanımları açısından değerlendirme yapıldığında çelik temizliği yapılan numuneler için tane büyümesi söz konusu değildir fakat tane boyutlarında yorulma dayanımını artıracak şekilde tane küçülmesi de görülmemektedir.

Mikroyapı çalışmalarında incelenen çelik numunelerin yapılarında bulunan elementler ve oranları EDS analizi ile belirlenmiştir. İşlemsiz ve çelik temizliği yapılan numuneler için Şekil 5.13’de gösterildiği gibi beşer farklı kalıntıdan nokta EDS analizi, Şekil 5.14’de gösterildiği gibi üçer farklı bölgeden genel EDS analizi yapılmıştır. Elde edilen nokta EDS analizine ait nicel sonuçların ortalaması Tablo 5.4’te, genel EDS analizine ait nicel sonuçların ortalaması Tablo 5.5’te gösterilmiştir. Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te ağırlıkça element yüzdeleri verilmiş olup burada yer alan değerler birçok kalıntının ortalaması olduğundan element yüzdelerinin toplamı % 100’ü göstermemektedir.

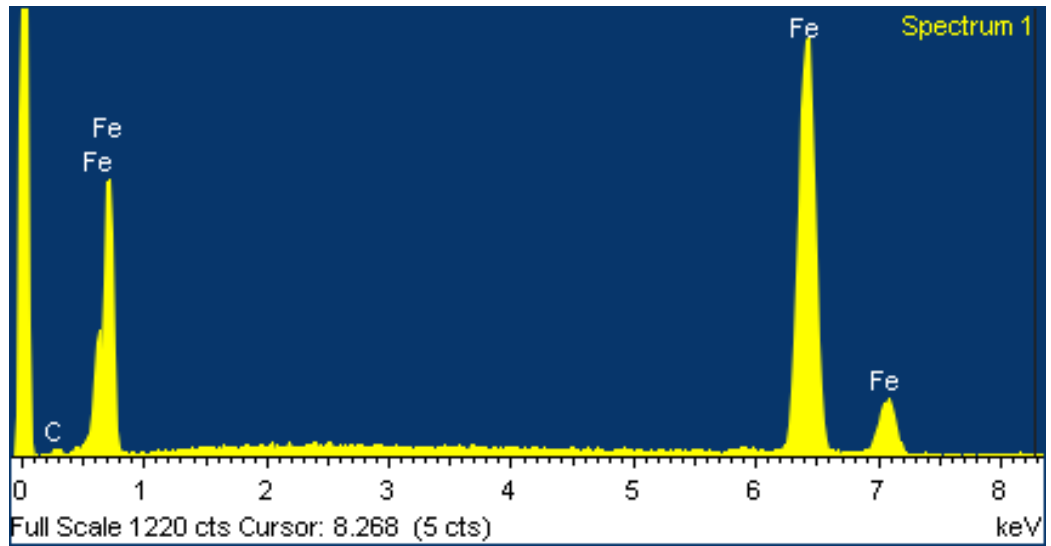
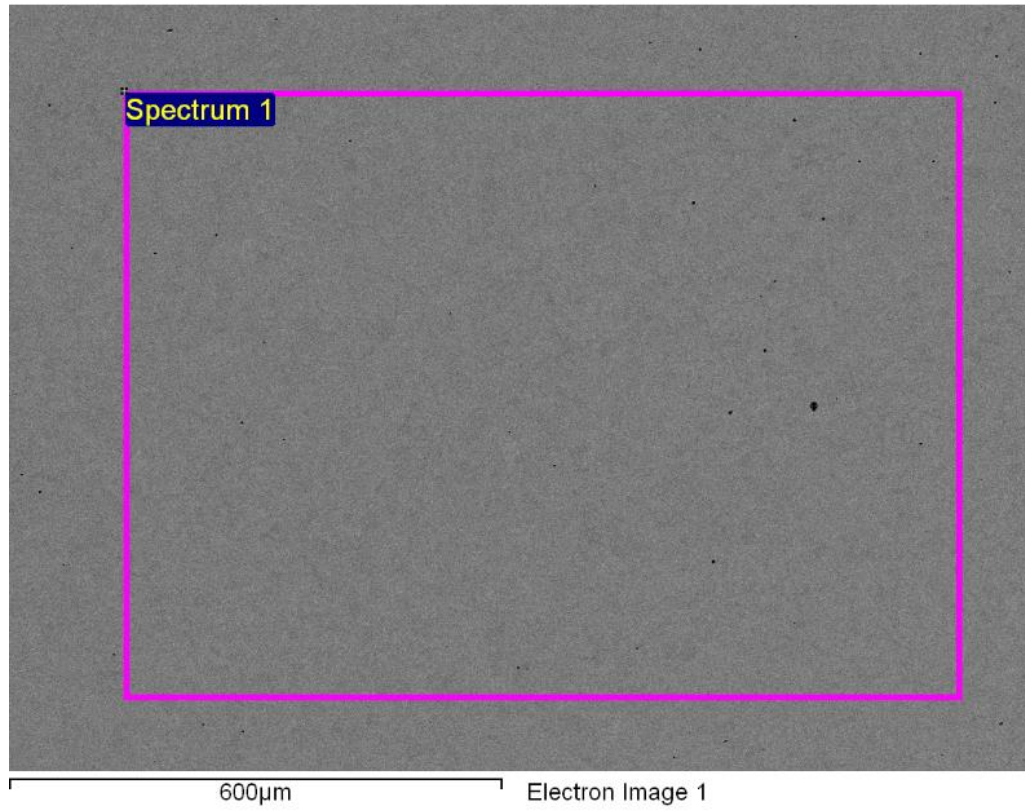
Kalıntılardaki C ve Fe oranlarında ciddi bir değişim gözlenmemekle birlikte işlemsiz numunelerde daha düşük değerlerde belirlenmiştir. Tane inceltici etkiye sahip olan Al miktarı biraz artmıştır. Kimyasal bileşimde yer alan elementlerin ve miktarlarının yorulma dayanımına etki ettiği bilinmektedir. Mn ve S oranları ise biraz azalmakla beraber işlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelerde birbirine yakın seviyededir. Buradan hareketle yapıdaki MnS kalıntılarının tamamen giderilemediği fakat şekil yönünde iyileştirmeler yapıldığını söylemek mümkündür. Ca oranı ise beklenildiği üzere düşmüştür. Ca, çelik temizliği sırasında S ve MnS kalıntıları ile reaksiyona girmektedir (Kaçar, 2011, s. 253).



Şekil 5.12. İşlemsiz (a) ve çelik temizliği yapılan (b) dağlanmış numunelerin tane boyutlarının incelenmesi



Şekil 5.13. Nokta EDS analizlerinin yapılması



Şekil 5.14. Genel EDS analizlerinin yapılması

Tablo 5.4. *Nokta EDS analizine ait nicel sonuçlar (ağırlıkça %)*

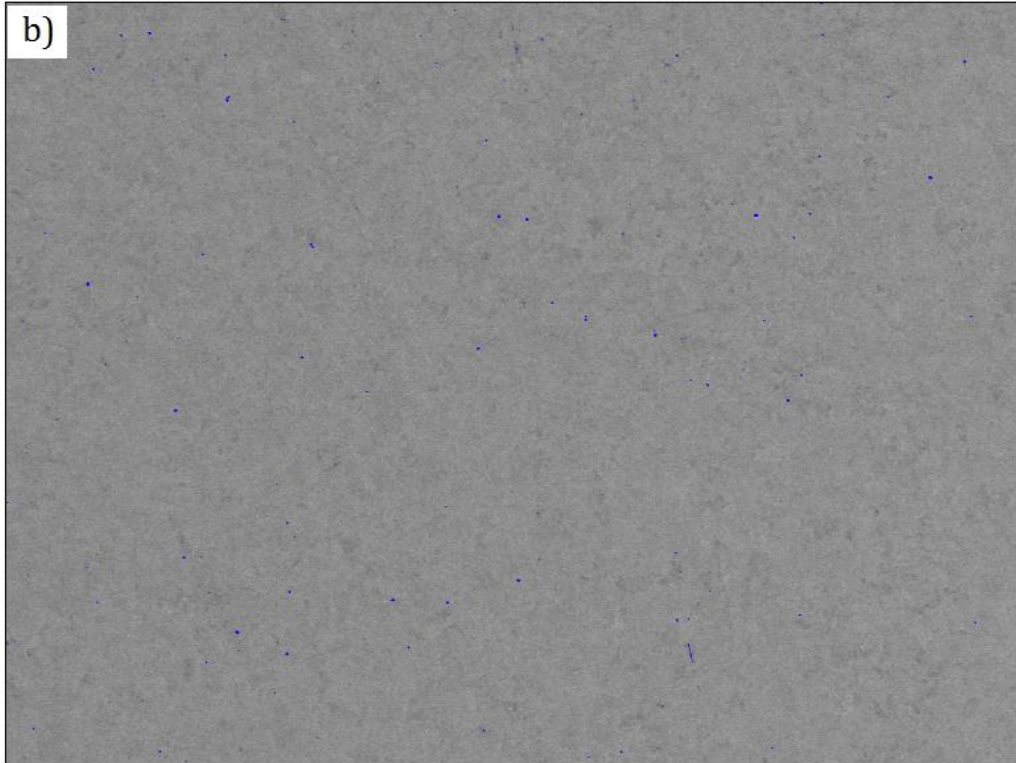
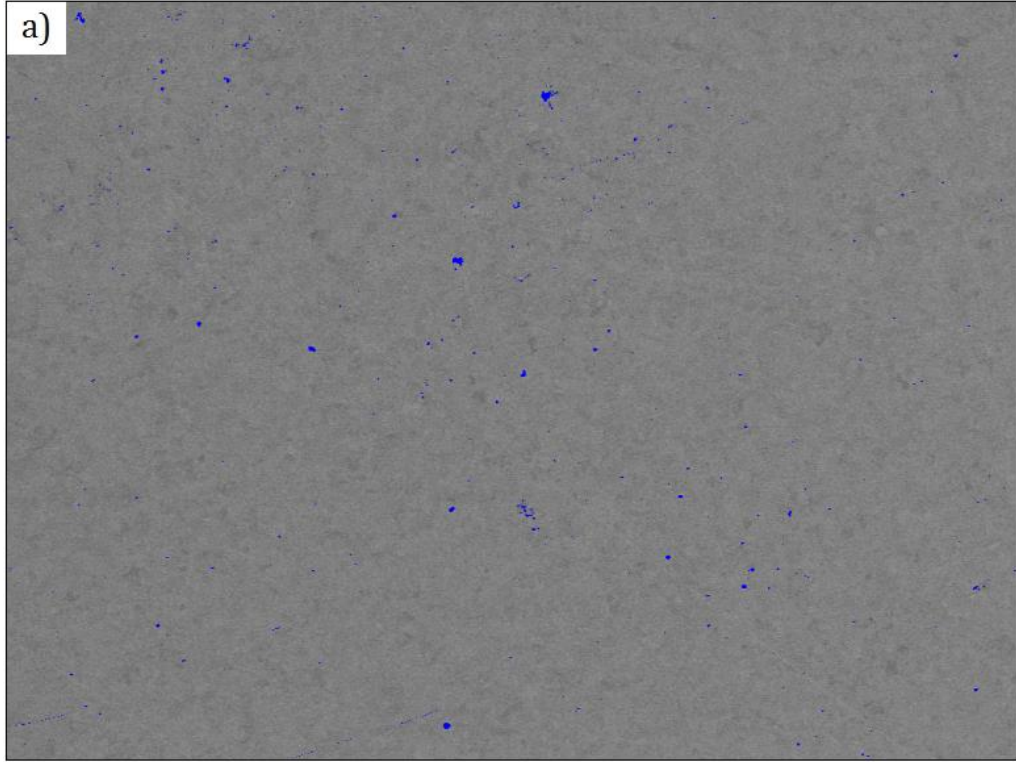
Element	Çelik temizliği yapılmayan numunelerdeki kalıntılar	Çelik temizliği yapılan numunelerdeki kalıntılar
C	3,91	5,86
Al	3,21	4,73
S	26,83	20,65
Ca	16,99	11,28
Mn	22,07	18,80
Fe	26,25	36,48

Tablo 5.5. *Genel EDS analizine ait nicel sonuçlar (ağırlıkça %)*

Element	Çelik temizliği yapılmayan numunelerdeki kalıntılar	Çelik temizliği yapılan numunelerdeki kalıntılar
C	2,13	1,82
Fe	97,87	98,18

Genel EDS analizi için seçilen görüntülerde, kalıntıların görüntü analiz teknikleriyle yüzdeleri hesaplanmıştır. İşlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelerin her biri için 3 farklı bölgeden en küçük büyütmede görüntü alınmıştır. Görüntülerdeki kalıntıların yüzdesi Şekil 5.15'te görüldüğü gibi renk tonu farkından faydalanılarak bilgisayar yardımı ile hesaplanmıştır.

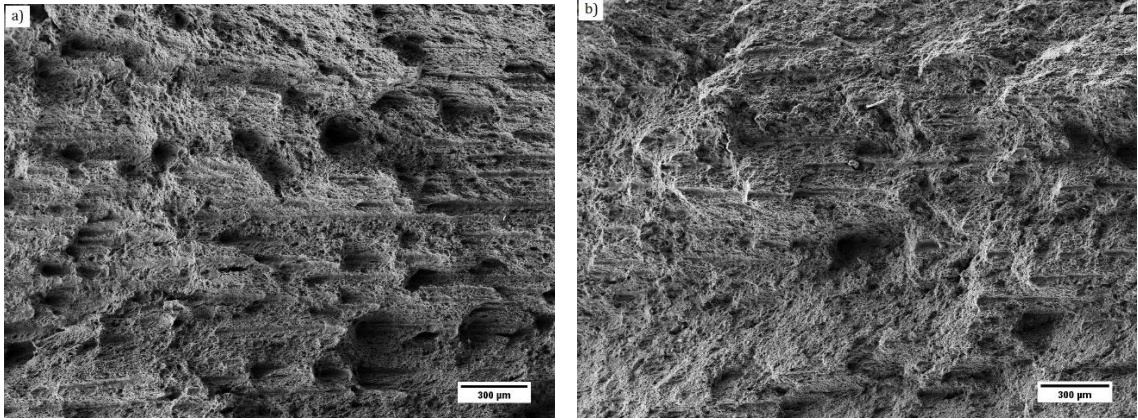
Analiz sonucunda işlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelerde ortalama kalıntı sırasıyla % 0.134(± 0.026) ve % 0.062(± 0.01) olarak hesaplanmıştır. Çelik temizliği sonrasında mikroyapıda yer alan kalıntıların bir miktar azaldığı görüntü analiz teknikleriyle de ispatlanmıştır.



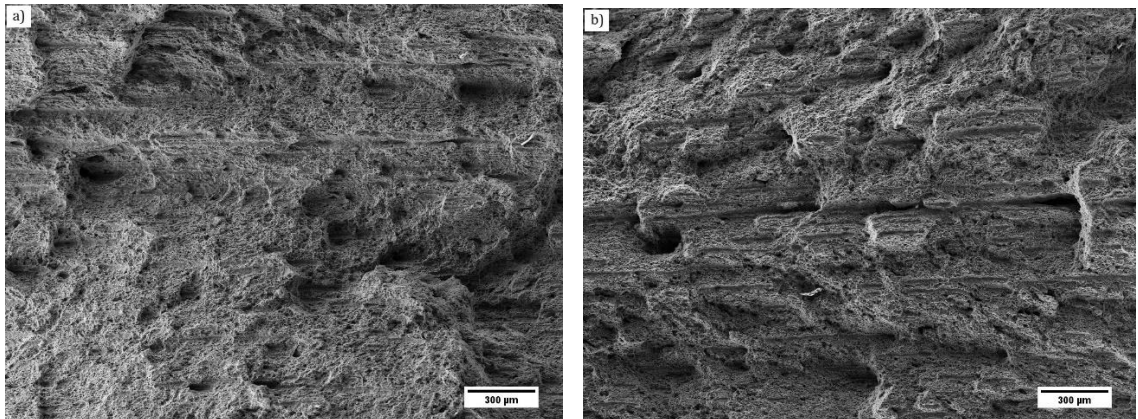
Şekil 5.15. Kalıntıların görüntü analiz teknikleriyle yüzdelерinin hesaplanması (a) işlemsiz numune
(b) çelik temizliği uygulanan numune

5.3. Kırık Yüzey İncelemeleri

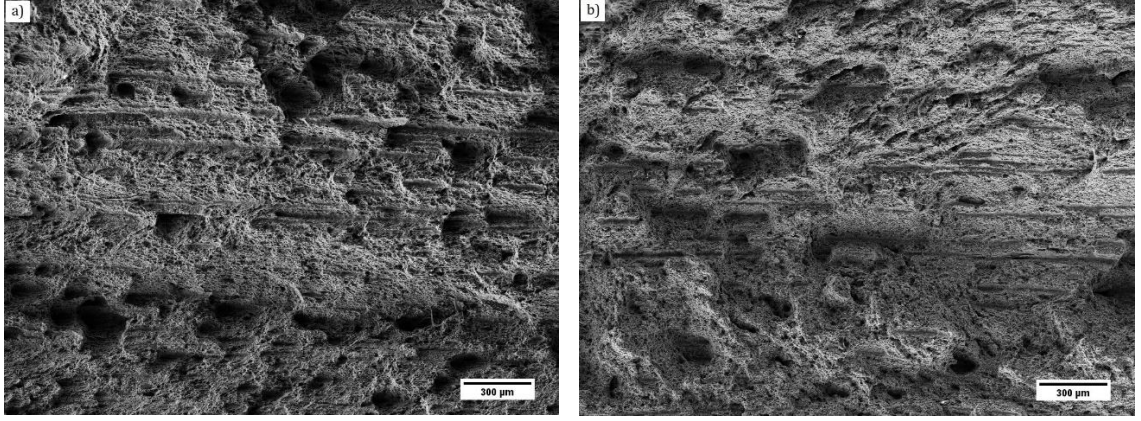
Yorularak kırılan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri SE detektörü ile alınmış olup sonuçlar Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir. İncelenen görüntüler sünek malzemelere ait kırılma özelliği göstermektedir. İşlemsiz ve çelik temizliği yapılmış numuneler için kırık yüzeyler birbirine benzer davranış göstermektedir. Çelik malzemedeki kalıntılar belirgin olarak görülmektedir. Çelik temizliği yapılan numunelerin kırık yüzeylerinde daha az kalıntıya rastlanmıştır. Görüntülerde belirli bölgelerde çukurcukların (dimples) oluştuğu görülmektedir. Bu çukurcuklar numune üzerinde çentik etkisi yapacaktır ve geri kalan kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince kırılma meydana gelecektir (Jiang vd., 2013, s. 48)



Şekil 5.16. Maksimum yükün 18 kN olarak uygulandığı yorulma testi sonrasında kırılan numuneler (a) işlemsiz (b) çelik temizliği yapılmış



Şekil 5.17. Maksimum yükün 16,5 kN olarak uygulandığı yorulma testi sonrasında kırılan numuneler (a) işlemsiz (b) çelik temizliği yapılmış



Şekil 5.18. Maksimum yükün 15,5 kN olarak uygulandığı yorulma testi sonrasında kırılan numuneler
(a) işlemsiz (b) çelik temizliği yapılmış

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada çelik temizliği işleminin yorulma dayanımı üzerine etkileri deneysel çalışmalar ile saptanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, işlemsiz ve çelik temizliği yapılmış numunelere yük kontrollü sabit genlikli eksenel yorulma deneyleri uygulanmış, yorulma kırılan numunelerden alınan kesitlerin ve kırık yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiş ve EDS analizleri yapılarak şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- İşlemsiz ve çelik temizliği yapılan numunelerin çekme ve yorulma sonuçları birbirine yakın olmakla birlikte işlemsiz numunelerde bu değerler bir miktar yüksek olarak ölçülmüştür.
- Mikroyapıda yer alan kalıntı miktarlarının çelik temizliği yapılan numunelerde azaldığı görülmüştür.
- Büyük boyutlu kalıntılar zararlı olduklarından çelikten uzaklaştırılmaları gerekirken, küçük boyutlu kalıntıların her zaman yapıdan uzaklaştırılması gerekmemektedir. Keskin kenar ve köşelere sahip kalıntılar modifiye edilerek zararsız kalıntılara dönüştürülebilmektedirler.

KAYNAKÇA

- ASM International Handbook Committee. (1990). *ASM Handbook, Volume 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International.
- ASM International Handbook Committee. (1996). *ASM Handbook, Volume 19 - Fatigue and Fracture*. ASM International.
- ASTM E466-07. (2007). *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA.: ASTM International.
- ASTM E 8/E 8M – 08. (2008). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA.: ASTM International.
- Atkinson, H., and Shi, G. (2003). *Characterization of Inclusions in Clean Steels: A Review Including The Statistics of Extremes Methods*. Progress in Materials Science, 48(5), 457-520.
- Becker, William T. and Shipley, Roch J. (2002). *ASM Handbook, Volume 11 - Failure Analysis and Prevention*. ASM International.
- Bilgiç, M. (2002). *Temiz Çelik Üretiminde Bazik Refrakter Kullanımı*. Kütahya: KÜMAŞ Manyezit Sanayi A. Ş..
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering*. Hoboken, N.J.: J. Wiley & Sons.
- Can, A. Ç. (2006). *Makine Tasarımcıları İçin Malzeme Bilgisi*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Davis, J. (2015). *Metals Handbook, Desk Edition (2nd Edition)*. ASM International.
- Demirci, A. H. (2004). *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi: Seçilmiş Temel Kavramlar ve Endüstriyel Uygulamalar*. İstanbul: Alfa.
- Dikeç, F., Ensari, C., ve Kayalı, E. S. (1983). *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*. İstanbul: T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.

- Dikeç, G. (2010). *Malzeme Bilgisi ve İmal Usulleri*. İstanbul: T.C. Gedik Üniversitesi.
- Ellyin, F. (1997). *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*. London: Chapman & Hall.
- Ewalds, H. L. and Wanhill R. J. H. (1984). *Fracture Mechanics*. Edward Arnold Ltd.
- François, D., Pineau, A., and Zaoui, A. (2013). *Mechanical Behaviour of Materials. Volume II: Fracture Mechanics and Damage*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Ghosh, A. (2001). *Secondary Steelmaking: Principles and Applications*. Florida: CRC Press.
- Ginzburg, V. B. and Ballas, R. (2000). *Flat Rolling Fundamentals*. New York: Marcel Dekker.
- Güngör, Y. (2001). *Malzeme Bilgisi*. İstanbul: Beta.
- ISO 1099:2006(E). (2006). *Metallic materials - Fatigue testing - Axial force-controlled method*. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jiang, X., Chen, X., Song, S., and Shanguan, Y. (2013). Phosphorus-induced hot ductility enhancement of 1Cr-0.5Mo low alloy steel. *Materials Science & Engineering A*, 574, 46-53.
- Kaçar, Y. (2011). *Kalsiyum İşlemi İdeal İnküzyon Modifikasyonu Koşullarının Belirlenmesi ve Proses Optimizasyonu*. Doktora Tezi. İstanbul: T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Koçak, H. (2006). *Takım Çelikleri El Kitabı*. Kocaeli: Sağlam Metal.
- Liu Alan, F. (2016). *Mechanics and Mechanisms of Fracture - An Introduction*. ASM International.
- Milella, P. P. (2013). *Fatigue and Corrosion in Metals*. Milano: Springer Milan.
- Onaran, K. (2009). *Malzeme Bilimi*. İstanbul: Bilim Teknik Yayınevi.
- Pook, L. (2007). *Metal Fatigue: What It Is, Why It Matters*. Dordrecht: Springer Netherlands.

- Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Singh, R. P. (2016). *Applied Welding Engineering (2nd Edition): Processes, Codes, and Standards*. Kidlington, Oxford; Waltham, MA: Butterworth Heinemann, an imprint of Elsevier Ltd.
- Uludağ, A. (2002). *Uçak Jet Motoru Bakımında Yorulma Hasarlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: T.C. Anadolu Üniversitesi.
- Yalçın, H., ve Gürü, M. (2002). *Malzeme Bilgisi*. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Yaşar, H. (2001). *Özellik ve Uygulamalarla Malzeme*. Ankara: KOSGEB.
- Zhang, J, Zhang, J, Yang, Z, Li, G, Yao, G, Li, S, Hui, W, and Weng, Y. (2005). Estimation of maximum inclusion size and fatigue strength in high-strength ADF1 steel. *Materials Science & Engineering A*, 394, 126-131.