



**PLAZMA NİTRÜRLEME, DLC KAPLAMA VE
DUBLEKS YÜZEY İŞLEMLERİNİN AISI 4140
ÇELİĞİNİN ÇEKİ VE BASI AŞIRI YÜKLERİ
ALTINDAKİ YORULMA ÇATLAK İLERLEME
DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Halim KOVACI

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı
Prof. Dr. Ayhan ÇELİK
2016
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**PLAZMA NİTRÜRLEME, DLC KAPLAMA VE DUBLEKS YÜZEY
İŞLEMLERİNİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN ÇEKİ VE BASI AŞIRI
YÜKLERİ ALTINDAKİ YORULMA ÇATLAK İLERLEME
DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Halim KOVACI

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı**

**ERZURUM
2016**

Her hakkı saklıdır



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



TEZ ONAY FORMU

**PLAZMA NİTRÜLEME, DLC KAPLAMA VE DUBLEKS YÜZEY
İŞLEMLERİNİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN ÇEKİ VE BASI AŞIRI YÜKLERİ
ALTINDAKİ YORULMA ÇATLAK İLERLEME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ**

Prof. Dr. Ayhan ÇELİK danışmanlığında, Halim KOVACI tarafından hazırlanan bu çalışma 20/05/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak ~~oybirliğiyle~~ ~~çokluğu (.../...)~~ ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

İmza :

Üye : Prof. Dr. Gürel ÇAM

İmza :

Üye : Prof. Dr. Akgün ALSARAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ali Fatih YETİM

İmza :

Üye : Doç. Dr. Fatih YILDIZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 02.../06.../2016. tarih ve 23.../...27..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 213M605

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

PLAZMA NİTRÜRLEME, DLC KAPLAMA VE DUBLEKS YÜZEY İŞLEMLERİNİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN ÇEKİ VE BASI AŞIRI YÜKLERİ ALTINDAKİ YORULMA ÇATLAK İLERLEME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Halim KOVACI

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Tekrarlı yükler altında çalışan malzemeler, yorulma dayanımlarının yetersiz olması durumunda hasara uğramaktadır ve bu sebeple malzemelerin yorulma dayanımlarını artırmak için plazma destekli yüzey işlemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu işlemler malzemelerin sabit genlikli yükler altındaki yorulma ömürleri artırmalarına karşın, malzemelerin değişken genlikli yükler altındaki yorulma davranışları büyük farklılıklar göstermektedir. Ayrıca, malzeme herhangi bir çatlak içeriyorsa, malzemenin yararlı çalışma ömrünü belirlemek için; yorulma ömründen ziyade, malzemenin yorulma çatlak ilerlemesi davranışının incelenmesi gerekir.

Bu sebeplerle, bu çalışmada, plazma nitrürleme, Elmas Benzeri Karbon (DLC) kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin (plazma nitrürleme+DLC kaplama), sabit ve değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu inceleme için, AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğinden üretilen yorulma çatlak ilerleme numunelerine plazma nitrürleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemleri uygulanmıştır. Numunelerin yapısal, morfolojik ve mekanik özellikleri; XRD, SEM, optik mikroskop, üç boyutlu profilometre, çizme testi ve mikro sertlik cihazları ile incelenmiştir. Yorulma çatlak ilerleme özelliklerinin belirlenmesi için numuneler, sabit ve değişken genlikli yorulma yüklerine maruz bırakılmışlardır. Değişken genlikli yükleme deneylerinde numunelere çeki ve bası aşırı yükleri uygulanmıştır. Malzemelerin yorulma çatlak ilerlemesi esnasındaki çatlak boyu değişimleri, dijital kameralar yardımıyla dijital görüntü alma/işleme yöntemi (DIC) kullanılarak belirlenmiştir. Uygulanan yüzey işlemleri, malzemenin yüzey sertliğini artırarak ve malzeme yüzeyinde bası artık gerilmelerinin oluşumunu sağlayarak malzemenin sabit genlikli yorulma çatlak ilerleme ömrünü artırmıştır. Çeki aşırı yüklemesi durumunda, yüzey işlemleri çatlak ucu plastik bölge büyüklüğünü işlemsiz numuneye göre azaltarak çatlak gecikme periyodunun azalmasına sebep olmuşlardır. Bası aşırı yüklemesi durumunda ise çatlak hızlanması olayını engelleyici yönde etki etmişlerdir. Plazma nitrürlenmiş ve dubleks işlem uygulanmış numunelerde, nitrür tabaka kalınlıklarının artışı ve yapıda kırılgan nitrür fazlarının bulunması, yükleme tipine bakılmaksızın yorulma çatlak ilerleme ömründe azalmaya sebep olmuştur. Bu sebeplerle, her bir yüzey işlemi malzemenin yorulma ömrü üzerinde farklı etkiler oluşturduğundan, uygun yüzey işlemi veya yüzey işlemi parametrelerinin, malzemenin maruz kaldığı yorulma yükünün tipine göre seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

2016, 210 sayfa

Anahtar Kelimeler: Plazma Nitrürleme, DLC, Dubleks İşlem, Yorulma Çatlak İlerlemesi, Değişken Genlikli Yükleme, Çeki Aşırı Yükleme, Bası Aşırı Yükleme

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EFFECTS OF PLASMA NITRIDING, DLC COATING AND DUPLEX SURFACE TREATMENTS ON FATIGUE CRACK GROWTH BEHAVIOR OF AISI 4140 STEEL UNDER OVERLOAD AND UNDERLOAD

Halim KOVACI

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Construction and Manufacturing Department

Supervisor: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Materials working under cyclic loads fail if they have not necessary fatigue strength and therefore plasma assisted surface treatments are frequently used to increase fatigue strength of materials. Although these treatments increase the fatigue life of materials under constant amplitude loads, fatigue behaviors of materials under variable amplitude loading differ greatly. Also, if a material has a crack, its fatigue crack growth behavior should be investigated rather than its fatigue life to determine the useful service life.

For these reasons, effects of plasma nitriding, diamond-like carbon (DLC) coating and duplex surface treatments (plasma nitriding+DLC) on constant and variable amplitude fatigue crack growth were investigated in this study. For this investigation, plasma nitriding, DLC coating and duplex surface treatment were applied to fatigue crack growth specimens, which were made of AISI 4140 low-alloy steel. The structural, morphological and mechanical properties of specimens were studied by XRD, SEM, optical microscope, 3D profilometer, scratch and microhardness tester. In order to determine the fatigue crack growth properties, the specimens were subjected to constant and variable amplitude fatigue loads. Overload and underload were applied to the specimens in variable amplitude loading tests. Crack sizes of the specimens were determined using digital image correlation/monitoring method (DIC) via digital cameras. The applied surface treatments increased the constant amplitude fatigue crack growth life of the material by increasing the surface hardness and establishing compressive residual stresses. In the case of overload, the surface treatments led to the decrease in crack retardation period by restricting the crack tip plastic zone size in comparison to untreated material. In the case of underload, they prevented the crack acceleration. The increasing thickness of nitride layers and brittle nitride phases decreased the fatigue crack growth life of specimens regardless of loading type. Therefore, it was concluded that the appropriate surface treatment or treatment parameters should be selected considering the type of fatigue load, which the material is subjected, since each surface treatments have different effects on the material.

2016, 210 pages

Keywords: Plasma Nitriding, DLC, Duplex Treatment, Fatigue Crack Growth, Variable Amplitude Loading, Overload, Underload

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımını, anlayışını, hoşgörüsünü, bilgisini, desteğini ve zamanını esirgemeyen, akademik anlamda gelişmemi sağlayan ve her anlamda desteğini hissettiğim değerli tez yöneticim Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bana daima yol gösteren, benden desteklerini, ilgilerini ve bilgilerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Akgün ALSARAN ve Sayın Prof. Dr. İrfan KAYMAZ'a teşekkür ederim.

Gerek tez çalışmam gerekse akademik çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübelerini büyük bir özveri ile paylaşan ve bana her zaman destek olan hocam ve ağabeyim Sayın Doç. Dr. A. Fatih YETİM başta olmak üzere, oluşturdukları bilimsel çalışma ortamı ve bana vermiş oldukları destekler dolayısı ile; Sayın Doç. Dr. Fatih YILDIZ'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Özgü BAYRAK'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Tuba YETİM'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Özlem BARAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. S. Yenal VANGÖLÜ'ne, Sayın Yrd. Doç. Dr. Selim ŞENGÜL'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Tolga YURTCAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Rıza KALELİ'ye, Sayın Arş. Gör. Dr. İ. Hakkı KORKMAZ'a, Sayın Dr. Hojjat GHAHRAMANZADEH ASL'ye, Sayın Öğr. Gör. Çiğdem ALBAYRAK'a, Sayın Arş. Gör. İlyas HACISALİHOĞLU'na, Sayın Arş. Gör. Özkan BAYRAM'a, Sayın Arş. Gör. Mevra ASLAN'a, Sayın Arş. Gör. Onur ÇOMAKLI'ya, Sayın Öğr. Gör. Yakup UZUN'a, Sayın Öğr. Gör. Fatih MEDETALİBEYOĞLU'na, Sayın Uzman Mustafa YAZICI'ya, Sayın Arş. Gör. Muharrem TAŞDEMİR'e, Sayın Mak. Yük. Müh. Y. Burak BOZKURT'a ve ismini sayamadığım bütün hocalarım ve arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Yapılan bu çalışmayı 213M605 nolu proje kapsamında destekleyen ve doktora öğrenimim sırasında BİDEB-2211 Yurtiçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında bursiyer olarak maddi destek aldığım Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca benden desteklerini, sabırlarını, hoşgörülerini ve anlayışlarını esirgemeyen sevgili annem Şahin KOVACI ve sevgili babam Mehmet KOVACI başta olmak üzere; sevgili kardeşlerim Hayrettin KOVACI, Mesut KOVACI ve Servet KOVACI'ya sonsuz teşekkür ederim.

Halim KOVACI
Mayıs, 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Yorulma.....	9
2.1.1. Yorulma çatlak oluşumu ve ilerlemesi.....	12
2.1.2. Yorulma analizinde kullanılan yaklaşımlar.....	16
2.2. Kırılma Mekanikliği	18
2.2.1. Lineer elastik kırılma mekanikliği.....	25
2.2.1.a. Çatlak ucu elastik gerilme alanı ve gerilme şiddet faktörü yaklaşımı.....	25
2.2.2. Çatlak ucu plastisitesi	29
2.2.2.a. Irwin yaklaşımı	29
2.2.2.b. Strip-yield model.....	32
2.3. Yorulma Analizlerinde Kırılma Mekanikliği Yaklaşımının Kullanımı:	
Yorulma Çatlak İlerlemesi	32
2.3.1. Sabit genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi.....	32
2.3.2. Çatlak kapanması	36
2.3.3. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi ve yük etkileşim modelleri.....	39
2.4. Değişken Genlikli Yükler Altında Yorulma Çatlak İlerlemesi Tahmin Metotları ve Modelleri	43
2.4.1. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi tahmin metotları	43
2.4.2. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi tahmin modelleri	47

2.4.2.a. Wheeler modeli.....	48
2.4.2.b. Willenborg modeli.....	51
2.4.2.c. Elber modeli	54
2.4.2.d. Barsom modeli	55
2.5. Yüzey İşlemleri	56
2.5.1. Plazma durumu ve elde edilmesi.....	59
2.5.2. Plazma ile nitrürleme.....	61
2.5.2.a. Plazma ile nitrürleme işleminin mekanizması.....	62
2.5.2.b. Plazma ile nitrürleme sonrası oluşan içyapılar.....	63
2.5.3. Yüzey kaplamalar.....	64
2.5.3.a. Buhar fazı prosesleri ve fiziksel buhar kaplama.....	65
2.5.4. Elmas benzeri karbon (Diamond Like Carbon-DLC)	68
2.5.5. Dupleks yüzey işlemi	69
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	71
3.1. Materyal.....	71
3.2. Yorulma Çatlak İlerlemesi Testleri İçin Numunelerin Hazırlanması	71
3.3. Plazma İle Nitrürleme, DLC Kaplama ve Dupleks Yüzey İşlemleri	75
3.4. Yüzey İşlemi Uygulanmış Malzemelerde Yapısal ve Mekanik Özelliklerin Tayini	77
3.5. Yorulma Çatlak İlerlemesi Testleri	79
3.6. Yorulma Çatlak İlerlemesi Testleri Sonrasında Numunelerin İncelenmesi.....	86
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	87
4.1. Yapısal İncelemeler	87
4.1.1. XRD ve artık gerilme analizleri	87
4.1.2. Mikroyapı ve mikrosertlik analizleri	92
4.1.3. Çizme testi.....	98
4.2. Yorulma Çatlak İlerlemesi Analizleri	98
4.2.1. Sabit genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri	99
4.2.1.a. Plazma nitrürleme.....	99
4.2.1.b. DLC kaplama	109

4.2.1.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması	113
4.2.2. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Çeki aşırı yüklemesi (Overload-OL)	124
4.2.2.a. Plazma nitrüleme	124
4.2.2.b. DLC kaplama	133
4.2.2.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması	137
4.2.3. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Bası aşırı yüklemesi (Underload-UL)	145
4.2.3.a. Plazma nitrüleme	145
4.2.3.b. DLC kaplama	151
4.2.3.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması	154
4.2.4. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Çeki-Bası aşırı yüklemesi (Overload+Underload/OL+UL).....	161
4.2.4.a. Plazma nitrüleme	161
4.2.4.b. DLC kaplama	166
4.2.4.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması	170
4.2.5. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Bası-Çeki aşırı yüklemesi (Underload+Overload/UL+OL).....	176
4.2.5.a. Plazma nitrüleme	176
4.2.5.b. DLC kaplama	181
4.2.5.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması	185
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	192
5.1. Yapısal Analiz Sonuçları	192
5.2. Yorulma Çatlak İlerlemesi Sonuçları	193
5.2.1. Plazma nitrüleme.....	193
5.2.2. DLC kaplama	195
5.2.3. Dupleks işlem	196

5.3. Genel Değerlendirme ve Öneriler	197
KAYNAKLAR	201
EKLER.....	210
ÖZGEÇMİŞ	211



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
ω	Geliş/ Incident Açısı
ΔK_{eff}	Efektif Gerilme Şiddet Faktörü Aralığı
A_B	Barson Modeli için Malzeme Sabiti
C_0	Elber Modeli için Malzeme Sabiti
C_p	Çatlak Gecikme Parametresi
G_c	Kritik Şekil Değiştirme Enerjisi Salınım Oranı
K_C	Gerilme Şiddet Faktörü Kritik Değeri, Kırılma Tokluğu
K_I	Mod I Gerilme Şiddet Faktörü
K_{IC}	Kırılma Tokluğu (Mod I)
K_{II}	Mod II Gerilme Şiddet Faktörü
K_{III}	Mod III Gerilme Şiddet Faktörü
K_T	Teorik Gerilme Yığılması Faktörü
K_{max}	Maksimum Gerilme Şiddet Faktörü
K_{min}	Minimum Gerilme Şiddet Faktörü
K_{op}	Çatlak Ucunun Açık Olması Durumunda Gerilme Şiddet Faktörü
R_a	Yüzey Pürüzlülüğü
a_0	Ön çatlak Boyu
r_p	Elasto-plastik Davranış için Plastik Bölge Büyüklüğü
r_y	Plastik Bölge Büyüklüğü
γ_p	Plastik Şekil Değiştirme Enerjisi
γ_s	Yüzey Enerjisi
ρ_t	Plastik Bölge Uzunluğu
σ_a	Gerilme Genliği
σ_0	Akma Gerilmesi
σ_{max}	Maksimum Normal Gerilme
σ_{mean}	Ortalama Gerilme
σ_{min}	Minimum Normal Gerilme

$^{\circ}$	Derece
μm	Mikronmetre
∞	Sonsuz
Ar	Argon
GPa	Gigapascal
h	Çentik Yüksekliği
H_2	Hidrojen
HV	Vickers Sertlik Birimi
Hz	Hertz
Lc	Çizme Testi için Kritik Yük Değeri
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
N_2	Azot
R	Gerilme Oranı, Kuvvet Oranı
sccm	Gaz Akış Oranı
W	Watt
ΔK	Gerilme Şiddet Faktörü Aralığı
$\Delta\sigma$	Gerilme Aralığı
ε	Birim Şekil Değiştirme
B	Kalınlık
C	Paris-Erdoğan Eşitliği için Malzeme Sabiti
E	Elastisite Modülü
G	Şekil Değiştirme Enerjisi Salınım Oranı
K	Gerilme Şiddet Faktörü
Pa	Pascal
U	Potansiyel Enerji
W	Genişlik
a	Çatlak Boyu
b	Çentik Boyunun Yarısı
da/dN	Çatlak İlerleme Oranı/Hızı

$f(g)$	Geometrik Faktör, Düzeltme Faktörü
m	Paris-Erdoğan Eşitliği için Malzeme Sabiti
mB	Barson Modeli için Malzeme Sabiti
r	Çatlak Ucundan Uzaklık
β	Willenborg Modeli için Düzenleme Katsayısı
θ	Çatlak Ucunun x Eksenine ile Yaptığı Açısı
ρ	Eğrilik Yarıçapı
σ	Normal Gerilme
τ	Kayma Gerilmesi
ν	Poisson Oranı

Kısaltmalar

α	HMK Yapılı Demir Fazı
ϵ	HSP Yapılı Demir Nitrür Fazı
γ'	YMK Yapılı Demir Nitrür Fazı
3D	Üç Boyutlu
CT	Kompakt Çekme Numunesi
CVD	Kimyasal Buhar Kaplama (Chemical Vapor Deposition)
DGY	Değişken Genlikli Yükleme
DIC	Dijital Görüntü İşleme
DIM	Dijital Görüntüleme/Görüntü Alma
DLC	Elmas Benzeri Karbon (Diamond-like Carbon)
E	Enerji
EPKM	Elasto-plastik Kırılma Mekaniği
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
MT	Orta Boyutlu Çekme Numunesi
N	Çevrim Sayısı (Number of Cycles)
OL	Çeki Aşırı Yükleme (Overload)

PVD	Fiziksel Buhar Kaplama (Physical Vapor Deposition)
S	Gerilme
s	Saat
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SGY	Sabit Genlikli Yükleme
UL	Bası Aşırı Yüklemesi (Underload)
XRD	X-Işını Difraktometresi
YÇİ	Yorulma Çatlak İlerlemesi
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yorulma ile ilgili temel büyüklükler ve farklı yükleme tipleri	10
Şekil 2.2. Yorulma olayının gerçekleşme aşamaları ve ilgili büyüklükler	12
Şekil 2.3. Tekrarlı yükleme esnasında intrüzyon ve ekstrüzyon oluşumu	13
Şekil 2.4. Mikro çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesinin şematik gösterimi	14
Şekil 2.5. Yorulma çizgilerinin oluşumu	15
Şekil 2.6. Yorulma çizgilerine ait örnek gösterim	15
Şekil 2.7. HMK yapıya sahip bir malzemede S-N eğrisinin şematik gösterimi	16
Şekil 2.8. ϵ -N eğrisinin şematik gösterimi	17
Şekil 2.9. Yorulma çatlak ilerlemesi eğrilerinin şematik gösterimi (a) a-N eğrisi ve (b) $da/dN-\Delta K$ eğrisi	18
Şekil 2.10. Klasik yaklaşım ve kırılma mekaniği yaklaşımı	20
Şekil 2.11. Eliptik delik içeren sonsuz bir levhada gerilme yığılması	21
Şekil 2.12. Düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme	24
Şekil 2.13. Yükleme tipleri	25
Şekil 2.14. Çatlak ucundan belirli bir mesafe uzaklıkta bulunan herhangi bir noktada gerilme bileşenleri	25
Şekil 2.15. Malzeme kalınlığının kırılma tokluğuna etkisi	28
Şekil 2.16. Plastik bölge boyutunun elastik ve elasto-plastik davranış için gösterimi	30
Şekil 2.17. Plastik bölge büyüklüğünün kalınlık boyunca değişimi	31
Şekil 2.18. Strip-yield modeli	32
Şekil 2.19. Çatlak içeren bir parçada çalışma ömrü	33
Şekil 2.20. Yorulma çatlak ilerleme eğrisi	34
Şekil 2.21. Çatlak kapanması olayı.....	38
Şekil 2.22. DGY altında temel çatlak ilerleme modelleri.....	40
Şekil 2.23. DGY altında çatlak ilerleme davranışının analizinde kullanılan temel büyüklükler.....	40
Şekil 2.24. Aşırı yükleme durumunda çatlak ilerleme davranışı	42

Şekil 2.25. UL durumunda çatlak ucu çeki artık gerilmesi oluşumunun gösterimi.....	43
Şekil 2.26. Çatlak kapanma mekanizmaları.....	45
Şekil 2.27. Yorulma çatlak ilerlemesi analizinde kullanılan bazı temel tahmin modelleri.....	48
Şekil 2.28. Wheeler and Willenborg modellerinde tanımlanan plastik bölge büyüklükleri	50
Şekil 2.29. Farklı boşalma tiplerinin gerilim-akım karakteristiği	60
Şekil 2.30. Plazma ile nitrüleme işleminin mekanizması	63
Şekil 2.31. Farklı magnetronlar kullanılarak elde edilen plazma bölgeleri	68
Şekil 3.1. Çentik geometrileri ve yorulma ön çatlağı için gerekli boyutlar	72
Şekil 3.2. Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan CT numunesi	73
Şekil 3.3. CT numunesi bağlantı aparatı; (a) Çene ve (b) pim	74
Şekil 3.4. Plazma nitrüleme ünitesinin şematik gösterimi	76
Şekil 3.5. PVD-MT/2M 2T magnetron sıçratma sistemi.	77
Şekil 3.6. Çizme testinin şematik gösterimi.	79
Şekil 3.7. Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde uygulanan yükleme tiplerinin şematik gösterimi.....	82
Şekil 3.8. Çatlak ucu dallanması (crack branching).	83
Şekil 3.9. Yorulma çatlak ilerlemesi deney düzeneği.....	84
Şekil 3.10. Çatlak ilerleme açısı ile ilgili büyüklükler	85
Şekil 4.1. 1 saatlik plazma ile nitrüleme süresinde, 400, 500 ve 600°C işlem sıcaklıklarında nitrülenmiş AISI 4140 çeliğine ait XRD sonuçları	89
Şekil 4.2. 4 saatlik plazma ile nitrüleme süresinde, 400, 500 ve 600°C işlem sıcaklıklarında nitrülenmiş AISI 4140 çeliğine ait XRD sonuçları.....	89
Şekil 4.3. DLC filmin XRD grafiği	90
Şekil 4.4. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında farklı incident açılarında elde edilen artık gerilme değerleri.....	92
Şekil 4.5. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında numunelerden elde edilen kesitler	94
Şekil 4.6. DLC ince filmin kesit SEM resmi	95

Şekil 4.7. Sertlik-mesafe değişimi grafiği.....	96
Şekil 4.8. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrileri,.....	100
Şekil 4.9. Plazma nitrüleme işleminin yorulma çatlak ilerleme ömrü üzerindeki etkisi	100
Şekil 4.10. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde çatlak ilerleme görüntüleri	101
Şekil 4.11. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları	103
Şekil 4.12. Yorulma çatlak ilerlemesi testleri sonrasında kırılma yüzeylerinden elde edilen görüntüler;.....	109
Şekil 4.13. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrileri	110
Şekil 4.14. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları	110
Şekil 4.15. DLC kaplanmış numunenin yorulma çatlak ilerleme görüntüsü	111
Şekil 4.16. DLC kaplanmış numunede yorulma çatlak ilerlemesi sonrasında kırılma yüzeyinden elde edilen görüntüler.....	112
Şekil 4.17. DLC filmin kararlı çatlak ilerleme bölgesindeki SEM görüntüsü.....	113
Şekil 4.18. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrileri	114
Şekil 4.19. Dubleks yüzey işlemi uygulanmış numunenin yorulma çatlak ilerleme görüntüsü (400°C-1s+DLC).....	115
Şekil 4.20. Dubleks yüzey işlemi sonrasında oluşan yapıların şematik gösterimi ve dubleks işlem uygulanmış (600°C-1s + DLC) numunenin kırılma kesiti.....	116
Şekil 4.21. İşlemsiz, plazma nitrülenmiş ve dubleks işlem görmüş numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları	118
Şekil 4.22. Plazma nitrüleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerleme ömrü üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 4.23. Yorulma çatlak ilerlemesi testleri sonrasında kırılma yüzeylerinden elde edilen görüntüler.....	124

Şekil 4.24. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	125
Şekil 4.25. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerde SGY ve OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömrünün değişimi	126
Şekil 4.26. OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi.....	127
Şekil 4.27. OL durumunda işlemsiz malzemenin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü.....	128
Şekil 4.28. OL öncesi ve sonrasında plastik bölge büyüklükleri	129
Şekil 4.29. Çatlak ucu plastik bölge büyüklüklerinin artık gerilmeler ile değişimi	130
Şekil 4.30. Kırılma yüzey görüntüleri.....	132
Şekil 4.31. OL bölgesinde 600°C-4s numunesinin SEM görüntüsü.....	132
Şekil 4.32. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri.....	133
Şekil 4.33. DLC kaplanmış numunenin OL durumunda çatlak ilerleme görüntüsü.....	134
Şekil 4.34. DLC kaplanmış malzemenin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	134
Şekil 4.35. OL sonrasında DLC kaplanmış malzemede oluşan plastik bölge	135
Şekil 4.36. DLC kaplanmış numunenin kırılma yüzey görüntüsü.....	136
Şekil 4.37. DLC filmin OL bölgesinden alınan SEM görüntüsü	137
Şekil 4.38. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri.....	139
Şekil 4.39. OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi.....	142
Şekil 4.40. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve OL durumunda işlemsiz numuneye göre ömür artışları	143
Şekil 4.41. OL bölgesinde 500°C-1s+DLC numunesinin SEM görüntüsü	143
Şekil 4.42. 500°C-1s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü	144
Şekil 4.43. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerin UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	146
Şekil 4.44. UL durumunda işlemsiz malzemenin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü.....	146

Şekil 4.45. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde SGY ve UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim.....	147
Şekil 4.46. UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	148
Şekil 4.47. Kırılma yüzey görüntüleri.....	150
Şekil 4.48. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri.....	151
Şekil 4.49. UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi.....	152
Şekil 4.50. DLC kaplanmış numunenin UL durumunda kırılma yüzey görüntüsü	153
Şekil 4.51. UL durumunda DLC filmin detay görüntüsü	153
Şekil 4.52. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri.....	156
Şekil 4.53. UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi.....	159
Şekil 4.54. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve UL durumunda işlemsiz numuneye göre ömür değişimi	160
Şekil 4.55. 500°C-4s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü	161
Şekil 4.56. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	162
Şekil 4.57. OL+UL durumunda 400°C-1s numunesinin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü.....	163
Şekil 4.58. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde SGY, OL ve OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim.....	163
Şekil 4.59. OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	164
Şekil 4.60. Kırılma yüzey görüntüleri.....	166
Şekil 4.61. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	167
Şekil 4.62. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemede SGY, OL ve OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim.....	168
Şekil 4.63. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	168

Şekil 4.64. DLC kaplanmış numunenin OL+UL durumunda kırılma yüzey görüntüsü.....	169
Şekil 4.65. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri.....	172
Şekil 4.66. OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	174
Şekil 4.67. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemede SGY, OL ve OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim	175
Şekil 4.68. 500°C-4s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü	176
Şekil 4.69. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	177
Şekil 4.70. UL+OL durumunda 500°C-1s numunesinin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü.....	178
Şekil 4.71. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde SGY, OL, OL+UL ve UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim.....	178
Şekil 4.72. UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	179
Şekil 4.73. Kırılma yüzey görüntüleri.....	181
Şekil 4.74. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	182
Şekil 4.75. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemede SGY, OL, OL+UL ve UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim.....	183
Şekil 4.76. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	183
Şekil 4.77. DLC kaplanmış numunenin UL+OL durumunda kırılma yüzey görüntüsü.....	184
Şekil 4.78. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri	187
Şekil 4.79. UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi	189

Şekil 4.80. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemede SGY, OL, OL+UL ve UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim.....	190
Şekil 4.81. 600°C-4s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü	191



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yüzey mühendisliğinde uygulanan metotlar	58
Çizelge 3.1. AISI 4140 çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu	71
Çizelge 3.2. AISI 4140 çelik malzemenin mekanik özellikleri	71
Çizelge 4.1. Uygulanan yüzey işlemleri sonrası elde edilen tabaka kalınlıkları, sertlik ve artık gerilme değerleri	97
Çizelge 4.2. Sabit genlikli yükleme durumunda işlemsiz ve yüzey işlemi uygulanmış numunelerden elde edilen çatlak ilerleme oranları	119
Çizelge 4.3. Plazma nitrüleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerleme ömründe sebep olduğu yüzde değişimler.....	120

1. GİRİŞ

Makine parçaları ve yapı elemanları kullanımları sırasında, tekrarlanan gerilmeler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen; belirli bir tekrarlama sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama, çatlağın ilerlemesi ve bunu takip eden kopma/kırılma olayına neden olurlar. “Yorulma” adı verilen bu olay ilk defa 1850’li yıllarda Wöhler tarafından incelenmiştir. Yorulma olayına sadece parçaya dışarıdan uygulanan kuvvetler değil, ısı genleşme ve büzülmeyle doğan ısı gerilmeleri de neden olmaktadır. Yorulma olayında çatlak genelde yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerlerde başlamaktadır. Yorulma olayı özellikle makine elemanlarında oluşan hasarların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu yüzden, malzemelerin yorulma özelliklerinin araştırılması açısından, özellikle incelenecek yorulma özelliğine göre üç temel yaklaşım kullanılmaktadır:

- **Gerilme Ömrü (Stress Life) Yaklaşımı:** Bu yaklaşımda, bir elemanın yorulmaya maruz kaldığı andan kırılıncaya kadarki toplam süreç ele alınır,
- **Şekil Değiştirme (Strain Life) Ömrü Yaklaşımı:** Bu yaklaşımda, malzemede oluşan şekil değiştirmeler esas alınarak özellikle oluşan bir yorulma çatlağının şekil değişimi ele alınır,
- **Kırılma Mekanikliği (Fracture Mechanics) Yaklaşımı:** Bu yaklaşımda, çatlaklı malzemelerde çatlak ilerleme miktarı ile ömür tahmini yapılır (Bannantine 1990).

Tasarımları gereği birçok makine/yapı elemanı çentik veya çatlak biçimindeki geometrik düzensizliklere sahip olabilmektedirler ve bu elemanların yorulma ömürlerinin tayin edilebilmesi için, kırılma mekanikliği ve yorulmanın ortak konusu olan yorulma çatlak ilerleme analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yorulma yükleri altında çalışan ve yapısında çatlak bulunduran malzemelerin ve makine elemanlarının, çatlak boyları sürekli kontrol edilerek bu elemanların çalışma ömürleri hakkında bilgi

edinilebilir. Çatlaklı bir malzemede, sabit genlikli yorulma yükleri altında çatlak ilerlemesine karşılık devir sayısı eğrisi logaritmik ölçekte çizilirse bir malzemenin yorulma çatlak ilerleme eğrisi elde edilmiş olur. Sabit genlikli yükleme altında yorulma çatlak ilerleme davranışının modellenmesi 1950'li yıllara dayanmaktadır (Head 1953; Frost and Dugdale 1958) ve 1960'lı yıllarda Paris-Erdoğan Eşitliği olarak bilinen kararlı çatlak ilerleme davranışının formüle edilmesi bu alanda büyük önem taşımaktadır (Paris and Erdogan 1963). Paris-Erdoğan Eşitliği ile yalnızca sabit genlikli yükleme şartları altında çalışan metalik malzemelerin yorulma çatlak ilerleme ömür tahmini yapılabilmektedir. Ancak malzemelerin yorulma özelliklerinin veya yorulma çatlak ilerleme davranışlarının incelenmesinde her ne kadar standart testlerde sabit genlikli yükleme durumları ele alınsa dahi, birçok makine elemanı değişken yükler altında çalışmaktadır (Karcı and Turan 2009). Bu bakımdan da malzemelerin/elemanların değişken genlikli yükler altında çatlak ilerleme davranışlarının incelenmesi gerekmektedir (Skorupa 1998). Literatürdeki birçok çalışmadan çatlak ilerlemesinin değişken genlikli yükler altında gerçekleşmesi esnasında; çatlak ilerleme davranışının sabit genlikli yükleme durumuna göre büyük farklılık gösterdiği bilinmektedir.

Değişken genlikli yükleme, sabit bir yükleme periyoduna maruz makine elemanında yükün ani olarak azalmasını ve artmasını kapsar. Bu bağlamda, malzemeye/elemanına en büyük yükten daha büyük bir çeki yükü uygulanırsa bu yüke çeki aşırı yüklemesi (overload-OL), en düşük yükten daha düşük bir bası yükü uygulanırsa da, bu yüke bası aşırı yüklemesi (underload-UL) denir. Metalik malzemelerde genel olarak; sabit genlikli çatlak ilerlemesi esnasında eğer bir çeki aşırı yükü uygulanırsa malzemenin çatlak ilerleme ömründe artış ve eğer bir bası aşırı yükü uygulanırsa da malzemenin çatlak ilerleme ömründe azalış meydana gelmektedir (Beden *et al.* 2009). Bu bakımdan malzemelerde sabit ve değişken genlikli çatlak ilerleme davranışları farklılık göstermektedir. Yorulma çatlak ilerleme ömrünün değişmesine sebep olan bu yükleme durumları ile ilgili olarak; çatlak ucunda körleşme, çatlak ucu keskinleşmesi, çatlak ucunda deformasyon sertleşmesi, çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluşması ve çatlak kapanma etkileri başta olmak üzere birçok bilim insanı tarafından farklı pek çok teori ortaya konmuştur. Ayrıca, değişken genlikli yükleme durumunda meydana gelen

çatlak ilerleme ömründeki artış veya azalış birçok araştırmacı tarafından modellenmeye ve formüle edilmeye çalışılmıştır (Wolf 1970; Willenborg *et al.* 1971; Wheeler 1972; McEvily 1973; Barsom 1976; Chang and Hudson 1981; Chang *et al.* 1981; Johnson 1981; Newman Jr 1981). Halen teori aşamasında olan bu araştırmaların birçoğu yorulma çatlak ilerleme ömründeki artış veya azalışları tam anlamıyla açıklayamamaktadır. Bu bakımdan malzemelerin sabit ve değişken genlikli yorulma çatlak ilerleme davranışlarının incelenmesi, hem teorik yaklaşımlar hem de mühendislik uygulamaları açısından önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır (Beden *et al.* 2009).

Bunlarla birlikte, birçok yorulma hasar mekanizmasında malzeme yüzeyinde maksimum gerilmeler olduğu için, yorulma çatlağı genellikle yüzeyden başlayıp malzemenin iç kısımlarına doğru ilerlediğinden; malzemelerin yüzey özellikleri yorulma üzerinde önemli parametrelerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan yüzey işlemleri mühendislik disiplini içerisinde yüzey mühendisliği olarak adlandırılan özel bir alanı oluşturmaktadır. Yüzey mühendisliği, bir malzemenin yüzeyine ait özelliklerin değiştirilmesine yönelik her türlü faaliyeti kapsar. Yüzey işlemleri ile malzemelerin yüzey görünümü, yüzey sertliği, yorulma dayanımı, aşınma ve korozyon direnci gibi estetik, mekanik ve tribolojik özelliklerinin yanı sıra optik, elektriksel, manyetik, pasifleşme ve difüzyon gibi özellikleri de iyileştirilebilir (Bayrak 2007). Malzeme yüzeyinde yeni yüzey morfolojileri oluşturmak üzere kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Burakowski and Wierzchon 1999):

- Termal yöntemler (temperleme, tavlama, perdahlama, sıcak daldırma, kaynak veya eriyik kaplama vb.).
- Termokimyasal yöntemler (toz, gaz veya tuz banyosunda difüzyon, plazma yardımı ile difüzyon vb.).
- Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler (kimyasal buhar kaplamalar, elektrolitik kaplamalar, anodizasyon, kimyasal ve elektrokimyasal parlatma ve dağlamalar, sol-gel teknikleri vb.).
- Fiziksel yöntemler (fiziksel buhar kaplamalar, iyon aşılama, iyon alaşımlama vb.).

- Mekanik yöntemler (cılalama, bilye püskürtme, kumlama, taşlama, soğuk plastik deformasyon vb.).

Bu yöntemler içerisinde yüzeyle bütünleşik bir yapı oluşturan ve termokimyasal bir yüzey işlemi olan plazma nitrüleme, özellikle çelik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek ve yorulma dayanımlarını artırmak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Plazma nitrüleme işleminde, malzeme yüzeyine plazma ortamında azot difüzyonu sağlanarak yüzeyde ve hemen yüzey altında sert tabakaların ve demir nitrür fazlarının oluşması sağlanır (Edenhofer 1974a; Edenhofer 1974b). Bu durum sonucunda, malzemelerin yüzey sertliği artar ve malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşur. Artan yüzey sertliği, bası artık gerilmeleri ve sert demir nitrür fazlarının, yorulma olayının gerçekleşmesi esnasında tekrarlı kayma sebebiyle oluşan dislokasyon hareketini engellemesi sebebiyle malzemelerin yorulma dayanımları artırılır (Alsaran *et al.* 2004).

Yüzeyde ilave tabaka oluşturan kaplama yöntemleri de, metalik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır ve kaplama yöntemleri içerisinde Elmas benzeri karbon (Diamond-like carbon/DLC) kaplamalar; optik ürünlerden manyetik kayıt disklerine, otomobil parçalarından, mikro-elektromekanik (MEMs) sistemlere kadar oldukça kapsamlı bir kullanım alanına sahiptir. DLC filmler sahip oldukları düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik ve aşınma direnci, kimyasal ve termal kararlılık ve mükemmel korozyon özellikleri ile birçok mühendislik uygulaması için vazgeçilmez bir film türü haline gelmiştir (Ronkainen *et al.* 1998; Erdemir *et al.* 2000; Ronkainen *et al.* 2001; Robertson 2002; Hauert 2004; Erdemir and Donnet 2006; Dalibon *et al.* 2013; Dalibon *et al.* 2014; Dalibón *et al.* 2015; Holmberg *et al.* 2015). Elmas benzeri fazların sertlik ve kimyasal asallık gibi özellikleri sp^2/sp^3 oranından kaynaklanmaktadır. Farklı koordinasyonlardaki karbon atomlarının birbirlerine oranı, çökeltme (deposition) yöntemine ve amorf hidrokarbonlarda hidrojen miktarına bağlıdır. Bu farklı bağ yapılarını bir arada bulundurması nedeniyle DLC filmler elmas, grafit ve hidrokarbon polimerlerin geniş özelliklerini taşıyabilmektedirler (Yetim 2009). Ayrıca DLC kaplamalar, işlem sonrasında yüzeyde oluşan bası artık gerilmeleri sebebiyle, çeliklerde yorulma ömrünü artırıcı bir proses olarak da kullanılmaktadır

(Morita *et al.* 2008a; Morita *et al.* 2008b; Morita *et al.* 2012; Morita *et al.* 2013; Morita *et al.* 2016).

Ürünlerin kullanım ömürlerinin artırılması ve enerji sarfiyatının azaltılması amacıyla son yıllarda yüzey mühendisliğinde çok büyük ilerlemeler kaydedilmiş ve özgün bir yöntem olarak dubleks yüzey işlemi uygulamaları ortaya çıkmıştır. Dubleks yüzey işlemi, iki farklı yüzey işleminin ardı ardına uygulanması işlemidir. Dubleks yüzey işlemi ile her bir yüzey işleminin tekil olarak yüzeye kazandıramadığı özellikler elde edilebilir (Ebrahimzadeh and Ashrafizadeh 2014; Rousseau *et al.* 2015). Dubleks yüzey işlemleri iki kategoride incelenebilir. Birinci gruba, yüzeye bir difüzyon işlemi sonrası ince film büyütülmesi işlemi girmektedir. Bu tür bir dubleks işlem sonucunda malzemelerin yüzeyine, her bir metodun bileşik etkisi kazandırılmaktadır. İkinci gruba ise yüzeyi lazerle alaşımlandırılmış malzemelerin daha sonra nitrülenmesi işleminde olduğu gibi, bir işlemin diğerine ilave edilmesi veya onu desteklemesi amacıyla yapılan işlemler girmektedir (Bell *et al.* 1998; Yetim 2009). Bir dubleks yüzey işlemi olan plazma nitrülenmiş malzemeler üzerine DLC kaplama işlemi, malzemelerin yüzey özelliklerini ve buna bağlı olarakta sürtünme-aşınma davranışlarını iyileştirmek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Meletis *et al.* 1995; Podgornik *et al.* 2000; Podgornik and Vižintin 2001; Avelar-Batista *et al.* 2006; Snyders *et al.* 2007; Jia *et al.* 2009; Jia *et al.* 2010; Yetim *et al.* 2010). Bununla birlikte, DLC kaplama içeren dubleks yüzey işlemleri de malzemelerin yorulma özelliklerini artırmak için kullanılmaktadır (Baragetti *et al.* 2009; Puchi-Cabrera *et al.* 2010; Morita *et al.* 2012; Morita *et al.* 2013).

Plazma nitrüleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemi (plazma nitrüleme+DLC kaplama) işlemlerinin, malzemelerin yorulma özellikleri üzerindeki etkileri literatürde pek çok farklı çalışmada incelenmiştir. Plazma nitrüleme işleminin, malzemelerin gerilme ömrü ve şekil değiştirme ömrü üzerinde birçok çalışma bulunmaktadır (Çelik and Karadeniz 1995; De la Cruz *et al.* 1998; Genel *et al.* 2000a; Genel *et al.* 2000b; Alsaran *et al.* 2004; Sirin *et al.* 2008; Bayrak *et al.* 2010; Terres *et al.* 2010; Soleimani *et al.* 2012; Terres *et al.* 2012; Terres and Sidhom 2012; Farokhzadeh *et al.* 2014; Farokhzadeh and Edrissy 2015). Benzer şekilde DLC kaplamaların (Morita *et al.* 2008a;

Morita *et al.* 2008b; Baragetti *et al.* 2009; Puchi-Cabrera *et al.* 2010; Uematsu *et al.* 2010; Costa *et al.* 2011; Uematsu *et al.* 2011; Schaufler *et al.* 2012) ve dubleks yüzey işlemlerinin (Baragetti *et al.* 2009; Morita *et al.* 2012; Morita *et al.* 2013), malzemelerin yorulma özellikleri üzerindeki etkileri gerilme ve şekil değiştirme ömrü yaklaşımları ile farklı çalışmalarda incelenmiştir. Ancak, yüzey işlemlerinin malzemelerin yorulma çatlak ilerlemesi özellikleri üzerindeki etkileri literatürde sınırlı sayıda çalışmada incelenmiştir.

Şengül ve Çelik (Şengül and Çelik 2011), plazma nitrürleme işleminin malzemelerin değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi davranışına etkilerini inceledikleri çalışmada AISI 4140 çelik malzemeyi öncelikle 500°C sıcaklık ve 2 saat süreyle plazma nitrürleme işlemine tabi tutmuşlardır. Daha sonra, plazma nitrürleme işleminin sabit genlikli yükleme ve blok aşırı yükleme durumundaki çatlak ilerleme davranışına etkilerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda; plazma nitrürleme işleminin, malzemenin sabit genlikli yükler altındaki yorulma çatlak ilerleme ömrünü, yüzeyde oluşan sertlik artışı ve bası artık gerilmeleri sebebiyle artırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca plazma nitrürleme işleminin, yüzeyde oluşan sert nitrür tabakaları sebebiyle çatlak ucu plastik bölgesini sınırlandırmasından dolayı, blok aşırı yükleme şartları altında işlemsiz numuneden elde edilen yorulma çatlak ilerleme ömür artışının plazma nitrürlenmiş numuneden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Şengül ve Çelik gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada (Şengül and Çelik 2012), bir önceki çalışmalarında kullandıkları malzeme ve plazma nitrürleme parametrelerini kullanarak (Şengül and Çelik 2011) aşırı yükleme çevrim sayısının yorulma çatlak ilerleme ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu incelemede, plazma nitrürleme işleminin; belirli bir aşırı yükleme çevrim sayısına kadar (3000 çevrim) çatlak gecikmesini işlemsiz numuneye göre azalttığı ve 3000 çevrimde ise çatlak gecikmesini işlemsiz numunedeki yükleme durumuna göre artırdığı sonucuna varmışlardır.

Plazma nitrürlenmiş malzemelerde aşırı yükleme oranının etkilerinin incelendiği bir diğer çalışmada ise; Şengül ve Çelik (Şengül and Çelik 2014), önceki çalışmalarındaki

(Şengül and Çelik 2011; Şengül and Çelik 2012) plazma nitrürleme parametrelerini kullanarak işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelere farklı oranlarda çeki aşırı yükleri uygulamışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda; 2 ve 2.5 aşırı yükleme oranlarında işlemsiz numunelerde, plazma nitrürlenmiş numunelere göre daha fazla ömür artışı elde etmişlerdir.

Ayrıca literatür çalışmaları göstermiştir ki, malzemelerin yorulma özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerle ilgili olarak; gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğu ya yorulma ömrünü bir bütün olarak ele alarak gerilme ömrü analizi gerçekleştirmiş ya da yorulma çatlak başlangıcını ele alarak şekil değiştirme ömrü analizi gerçekleştirmişlerdir. Ancak, çalışmaları sırasında yapılarında çatlak oluşabilecek olan veya doğrudan yapılarında çatlak bulunduran mühendislik malzemelerinin kırılma mekaniği yaklaşımına göre analiz edilmesi yani yorulma çatlak ilerlemesi analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, literatür çalışmaları göstermiştir ki DLC kaplanmış malzemelerin ve dubleks yüzey işlemi uygulanmış malzemelerin yorulma çatlak ilerlemesi davranışları kırılma mekaniği yaklaşımı ile incelenmemiştir. Ayrıca, plazma nitrürleme işlemi ile ilgili olarak; işlem sıcaklık ve süresindeki değişimlerin malzemelerin yorulma çatlak ilerleme davranışına etkileri halen tam anlamıyla bilinmemektedir.

Bunlarla birlikte, metalik malzemelerin yorulma çatlak ilerleme davranışları ASTM E 647 (ASTM-E647-13ae1 2013) test standardına göre belirlenmektedir. Bu standart uyarınca gerçekleştirilen deneylerde, çatlak boyunun belirlenmesi amacıyla; elektriksel potansiyel düşüm metodu ve gezici mikroskop ile inceleme (Şengül and Çelik 2011; ASTM-E647-13ae1 2013) yöntemleri kullanılmaktadır. Her iki yöntemin de farklı dezavantajları vardır. Potansiyel düşüm metodu, test yapılan ortamın özelliklerinden (sıcaklık, nem, vs.) oldukça fazla etkilenmektedir ve bu durum test sonuçlarını büyük ölçüde etkilemektedir. Gezici mikroskop yönteminde ise oldukça fazla zaman kaybı olmaktadır (Şengül and Çelik 2011). Bu sebeplerden dolayı, son yıllarda çatlak boyunun tespiti için dijital görüntü alma yöntemi (digital image monitoring/digital image correlation-DIM/DIC) önerilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (Carvalho and Voorwald

2009; Şengül and Çelik 2011; Şengül and Çelik 2012; Şengül and Çelik 2014). Dijital görüntü alma yöntemi, test esnasında aralıksız işlem yapılabilmesi, ölçümlerin dış ortamdan etkilenmemesi ve alınan görüntülerin tekrar kullanılabilmesi açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Şengül and Çelik 2011; Şengül and Çelik 2012; Şengül and Çelik 2014).

Bu çalışmada amaç, yüzey işlemlerinin malzemelerin sabit ve değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerleme davranışları üzerindeki etkilerini belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için, havacılık ve otomotiv sektöründe makine elemanlarının imalatında yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çelik malzemeden üretilen kompakt çekme (compact tension-CT) numuneleri üzerine plazma nitrüleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemi (plazma nitrüleme+DLC kaplama) uygulanmış ve elde edilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme ömürleri ve davranışları hem işlemsiz numune ile hem de birbirleri ile kıyaslanmıştır. Plazma nitrüleme işlemleri, %50 H₂+%50 N₂ gaz karışımında; 400, 500 ve 600°C sıcaklıklarda 1 ve 4 saatlik işlem sürelerinde gerçekleştirilmiştir. İşlemsiz numuneler üzerine DLC kaplama işlemleri ve dubleks yüzey işlemleri için plazma nitrülenmiş numuneler üzerine DLC kaplama işlemleri, fiziksel buhar kaplama (PVD) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nitrülenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks yüzey işlemi uygulanmış numunelerin; SEM, XRD, optik mikroskop ve üç boyutlu profilometre ile yapısal, yorulma cihazı, sertlik cihazı ve çizme testi ile mekanik özellikleri belirlenmiştir. Malzemelerin yorulma çatlak ilerleme davranışlarının belirlenmesi amacıyla işlemsiz ve yüzey işlemi uygulanmış numuneler, sabit ve değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi esnasındaki çatlak boyu değişimleri, dijital görüntü alma/işleme yöntemi ile belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yorulma

Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan makine ve yapı elemanlarında oluşan gerilmelerin, parçanın statik dayanımından düşük olmalarına rağmen belirli bir tekrarlama sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlak oluşumu ve bunu takip eden kırılma olayına yorulma denir (Bannantine 1990; Çelik 2014). Bir malzemede yorulma olayının gözlemlenebilmesi için:

- Yeterli derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesinin olması,
- Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması,
- Uygulanan gerilmenin yeterli sayıda tekrarlanması gerekmektedir (Campbell 2012).

Bununla birlikte bir malzemede yorulma ile ilgili temel kavramlar ve büyüklükler Şekil 2.1’de gösterilmiştir ve şu şekilde tanımlanmaktadır:

Maksimum Gerilme (σ_{max}) : Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir. Çekme gerilmeleri (+) ve basma gerilmeleri (-) işaretler ile gösterilmektedir.

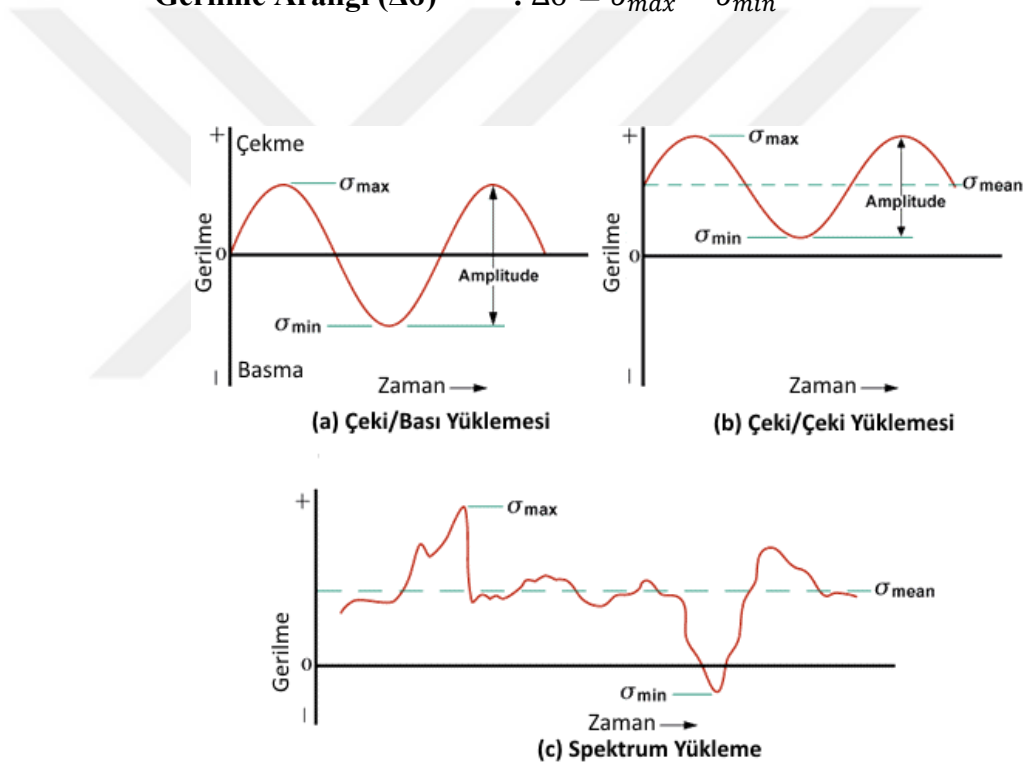
Minimum Gerilme (σ_{min}) : Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.

$$\text{Ortalama Gerilme } (\sigma_{mean}) : \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

$$\text{Gerilme Genliği } (\sigma_a) : \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\text{Gerilme Oranı (R)} : R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.3)$$

$$\text{Gerilme Aralığı } (\Delta\sigma) : \Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.4)$$



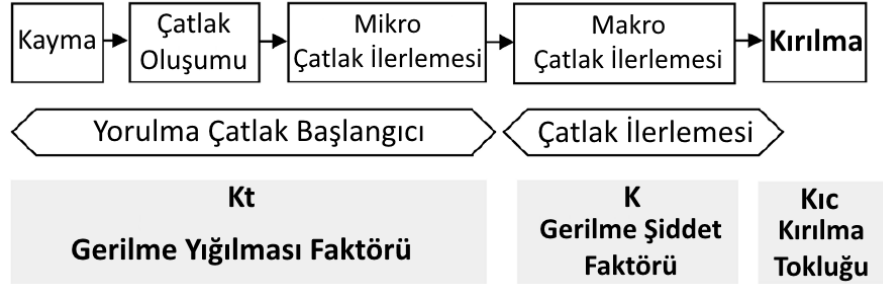
Şekil 2.1. Yorulma ile ilgili temel büyüklükler ve farklı yükleme tipleri
(a) çeki-bası yükleme, (b) çeki-çeki yükleme, (c) spektrum/rasgele yükleme

Şekil 2.1’de malzemelerde karşılaşılan veya karşılaşılabilecek bazı yükleme tipleri gösterilmiştir. Malzemelerin yorulma dayanımlarını belirlemek için gerçekleştirilen yorulma deneyleri genellikle Şekil 2.1’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir. Ancak birçok makine ve yapı elemanı, çalışmaları sırasında (c) şeklinde gösterilene benzer şekilde yüklemelere maruz kalabilmektedir. Değişken genlikli yüklemeye maruz kalan bir elemanda, yorulma olayı üç aşamada meydana gelmektedir:

- Yorulma çatlak oluşumu,
- Yorulma çatlak ilerlemesi,
- Kırılma.

Tekrarlı yüklemeye maruz bir elemanda, mikroskobik boyutta bir çatlak oluşumu, bunu takiben makroskobik boyutta bir çatlak ilerlemesi ve yorulma ömrünün sonunda kırılma ile meydana gelen bu süreç malzemenin toplam yorulma ömrünü oluşturmaktadır (Schijve 2001). Bir malzemenin yorulma özellikleri ve yorulma ömrü; yükleme tipi, geometrik özellikler, sıcaklık, çevresel etkiler, malzemelerin yüzey özellikleri, uygulanan yüzey işlemleri, artık gerilmeler, malzemenin üretim şekli ve uygulanan ısı işlem gibi birçok mekanik, metalürjik ve çevresel etkiden büyük ölçüde etkilenmektedir (Bannantine 1990; Campbell 2012). Yorulma olayının anlaşılabilmesi ve bir malzemenin yorulma ömrünün belirlenebilmesi için, çatlak oluşum ve ilerleme aşamaları üzerinde etkili olan malzeme yüzey özellikleri, artık gerilmeler ve çevresel etkilerin bilinmesi gerekmektedir.

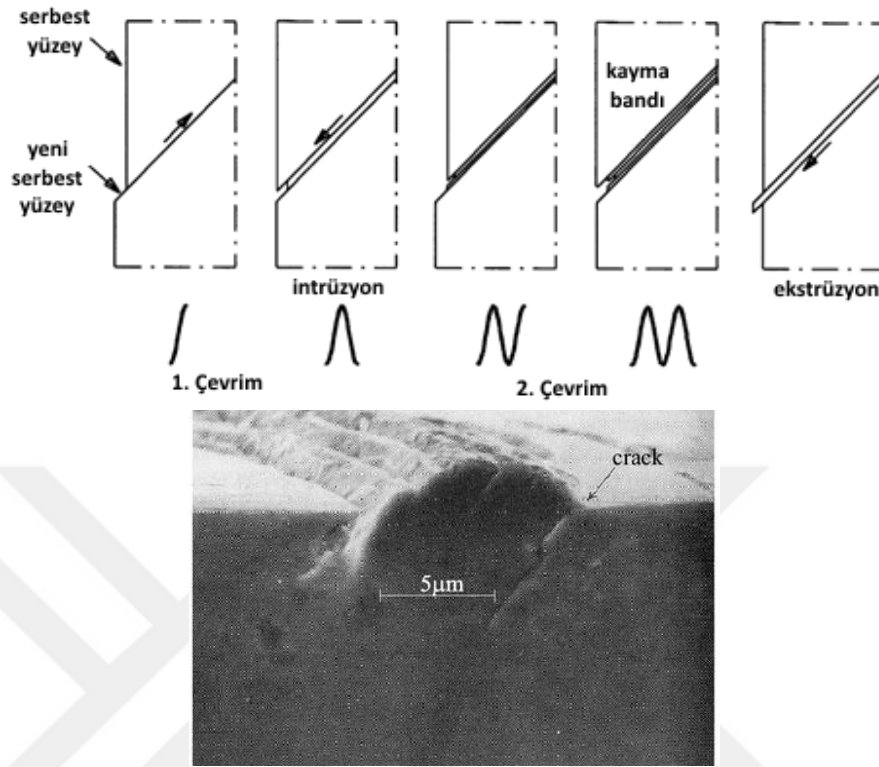
Malzemelerde yorulma, kayma bantlarında mikro çatlakların oluşmasıyla başlar ve çatlak oluşumu toplam ömrün büyük bir kısmını kapsar. Çatlaklar artık gözle görülür olduğunda ise malzemenin hasara uğraması/kırılması için gereken ömür, toplam ömrün çok küçük bir kısmıdır. Ayrıca malzemelerde çatlak oluşum ve ilerleme ömürlerinin birbirinden ayrılmasının, yorulma olayının incelenmesi açısından büyük önemi vardır. İki aşamada da birbirinden farklı tahmin metotları kullanılır (Schijve 2001). Bu yüzden yorulmada çatlak oluşumu ve yorulma çatlak ilerlemesi aşamalarının ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir. Yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesi aşamalarını kontrol eden mekanizmalar ve bu aşamaların incelenmesinde kullanılan büyüklükler Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yorulma olayının gerçekleşme aşamaları ve ilgili büyüklükler (Schijve 2001)

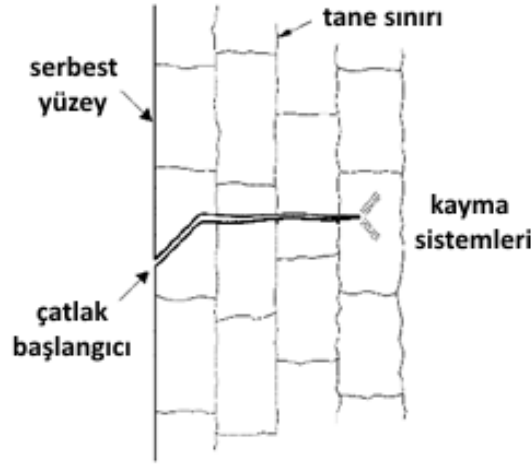
2.1.1. Yorulma çatlak oluşumu ve ilerlemesi

Yorulma olayında, dislokasyonların hareketi sonucunda kayma bantları oluşmaktadır. Tekrarlı yüklemeye maruz bir malzeme, akma dayanımının altında hasara uğrayabilmektedir. Malzemeye yapılan yükleme genel olarak elastik olsa dahi, malzemelerde bazı tanelerde; tanenin yönlenmesi ve mikro yapısına bağlı olarak mikro plastik deformasyonlar gözlemlenir. Bu mikro plastik deformasyonlar malzemenin yüzeyinde oluşur (malzeme yüzeyi serbest olduğundan dolayı). Ayrıca kayma olayı, kayma gerilmeleri gerektirdiğinden, kristalografik düzlemlerin hareketi malzemede yüzeyden belirli bir açı (45°) ile gerçekleşmektedir. Malzemede yüklemenin bir çevrim tekrar etmesi sonucunda intrüzyon (girinti) ve ekstrüzyonlar (çıkıntı) oluşur (Şekil 2.3). Bu şekilde yüklemenin tekrarlanması ile malzemede çatlak oluşumu gerçekleşir. Buradan, malzemelerde yorulma çatlak başlangıcının yüzey ile alakalı olduğu sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, bir diğer önemli nokta yorulmanın tersinmez bir olay olmasıdır. Malzemede yorulma olayı gerçekleşirken, yeni açılan yüzeylerde oksitlenme meydana gelmektedir. Bunun yanında uygulanan yük sonucu oluşan hareket ile deformasyon sertleşmesi meydana gelmektedir. Yani, bir tam çevrim yüklemekten sonra malzemenin tamamen eski haline dönmesi söz konusu değildir (Suresh 1998; Schijve 2001).



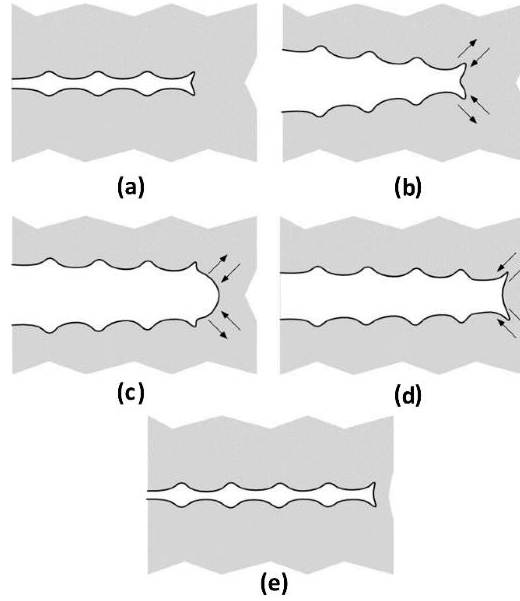
Şekil 2.3. Tekrarlı yükleme esnasında intrüzyon ve ekstrüzyon oluşumu (Suresh 1998; Schijve 2001).

Bir malzemede mikro çatlak oluşuktan sonra, çatlak yük eksenine ile 45° oluşturacak şekilde belirli bir miktar ilerler ve sonrasında yük eksenine ile 90° oluşturacak şekilde ilerlemeye devam eder. Bu esnada çatlak ucunda gerilme yığılması oluşur ve bunun sonucunda birden fazla kayma sistemi devreye girer (Şekil 2.4). Yorulma olayının sonunda ise, yorulmaya maruz kalan malzemenin kesiti artık yükü taşıyamadığından kırılma olayı gerçekleşir (Suresh 1998; Schijve 2001).



Şekil 2.4. Mikro çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesinin şematik gösterimi (Schijve 2001)

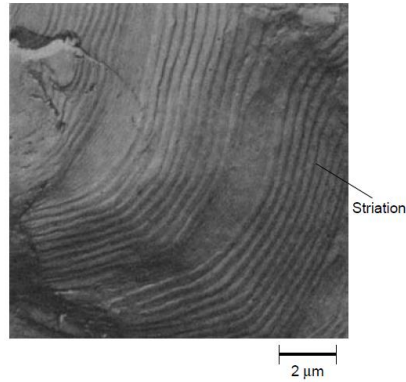
Kayma sistemlerinin devreye girmesiyle, mikro çatlak ilerlemeye başladıktan sonra malzemede tane sınırları engel oluşturarak çatlak ilerleme oranının (çevrim başına çatlak uzunluğundaki artış) azalmasına sebep olur. Fakat bu durum belirli sayıda taneden sonra normalleşmeye başlar ve çatlak ilerleme oranı artar. Ayrıca, çatlak ilerlemesi kararlı hal aldıktan sonra, yorulma çatlak başlangıcı ile ilgili yüzey özelliklerinin çatlak ilerlemesi üzerinde etkisi kalmaz. Malzemelerde tekrarlı yüklemenin etkisi ile çatlak açılma ve kapanma olayları gerçekleşmektedir. Bu olay sonucunda, malzemede her bir tekrar (açılma-kapanma) için yorulma çizgileri (striation) oluşur (Şekil 2.5). Yorulma çizgilerinin oluşumu, literatürde farklı pek çok teori ile açıklanmaya çalışılmıştır (McMillan and Pelloux 1966; Laird 1967; Pook 2007). Laird teorisinde; bir malzemeye uygulanan yük arttığında çatlak ucunun körleşeceği, bu körleşme neticesinde çatlak ucunda gerilmiş bir bölgenin oluşacağı ve bu bölgenin çatlak ucunu genişleterek çatlak ilerlemesine sebep olacağı öne sürülmüştür. Bu yük artışı sırasında çatlak ucundaki lokal kayma bölgesi, çatlak düzlemi ile 45° ’lik bir açı oluşturmaktadır. Malzemeye uygulanan yük azaltıldığında ise kayma ters doğrultuda gerçekleşmekte ve bu durum çatlak büyümesine/ilerlemesine sebep olmaktadır (Şekil 2.5). Bu olayın tekrarlı yükleme sebebiyle sürekli devam etmesi ile de malzemede yorulma çizgileri oluşmaktadır. Oluşan yorulma çizgileri arasındaki mesafe ise birim çevrim başına çatlak ilerleme oranına eşittir (Laird 1967; Anderson 2005).



Şekil 2.5. Yorulma çizgilerinin oluşumu

(a) yüklem yapılmamış çatlak, (b) çekme kuvveti uygulanması, (c) çatlak ucu körleşmesi ve kayma, (d) bası kuvveti uygulanması ve ters yönde kayma, (e) çatlak büyümesi (Laird 1967; Anderson 2005)

Oluşan bu yorulma çizgileri ile özellikle malzemelerde hasar analizi yapılırken, yorulma hasarının olup olmadığına karar verilir. Şekil 2.6'da gösterilen bu çizgilerin bulunması, malzemede yorulma hasarının oluştuğunun veya gözlemlendiğinin en büyük kanıtıdır. Bazı durumlarda bu çizgilerin oluşmadığı da görülebilir. Fakat bu durum yorulma gerçekleşmemiş anlamına gelmemektedir (Suresh 1998; Schijve 2001).

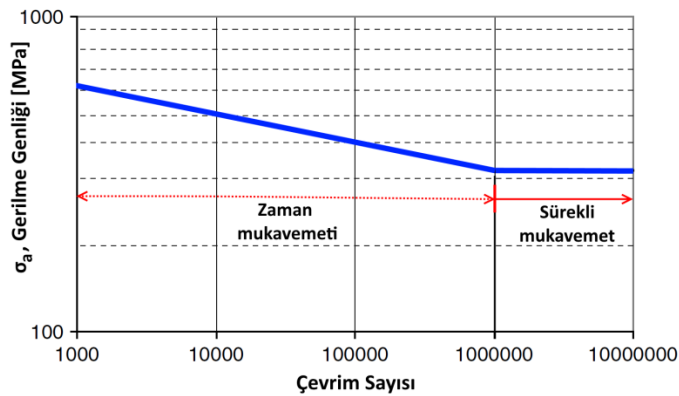


Şekil 2.6. Yorulma çizgilerine ait örnek gösterim (Campbell 2008).

2.1.2. Yorulma analizinde kullanılan yaklaşımlar

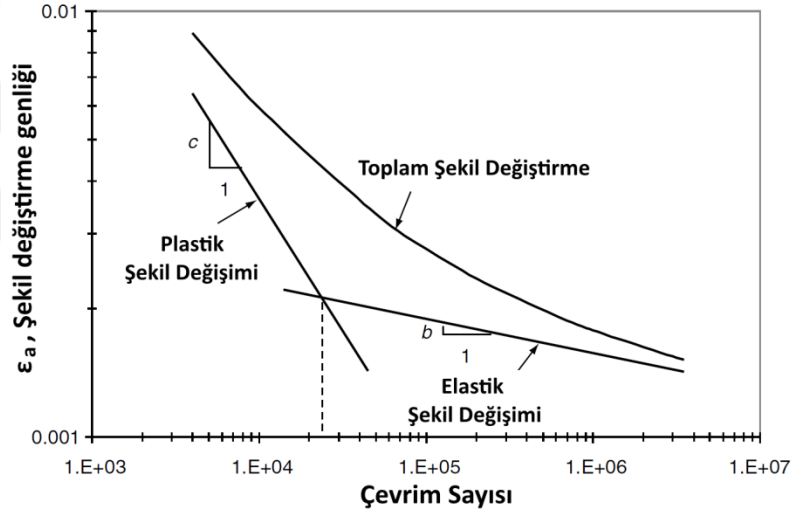
Yorulma olayı, daha önce de bahsedildiği üzere malzemelerin statik dayanımlarının altında hasara uğramalarına sebep olmaktadır. Bu sebeple yorulma yükleri altında çalışan ve/veya yorulmaya maruz kalabilecek yapı ve makine elemanlarının tasarımında, yorulma ile ilgili büyüklüklerin de hesaba katılması gerekir. Bu noktada, yorulma hesaplamalarında kullanılan farklı hesaplama yöntemleri ve yaklaşımlar devreye girer. Bir parçanın veya malzemenin yorulma analizi temel olarak üç farklı yaklaşım ile ele alınır (Bannantine 1990; Stephens *et al.* 2000):

a) Gerilme Ömrü (Stress Life) Yaklaşımı: Yorulma ile ilgili hesaplamalarda kullanılan en temel yaklaşımdır. Gerilme ömrü yaklaşımında bir malzemenin yorulmaya maruz kaldığı andan kırılıncaya kadar geçen süre ele alınır. Bu yaklaşımda; sabit genlikte ve belirli bir frekansta yorulma yüklerine maruz kalan bir malzemenin elastik şekil değişimine uğradığı varsayılarak, hangi yük seviyesinde hasarsız olarak ne kadar süre ile dayanım göstereceği belirlenir. Bu amaçla, deneysel çalışmalardan elde edilen ve her bir malzemeye özgü olan S-N (Gerilme-Ömür/Çevrim Sayısı) grafikleri kullanılır. Bu grafikler Wöhler eğrisi/grafiği olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 2.7’de HMK yapıya sahip bir malzeme için örnek S-N eğrisi gösterilmiştir. Bu eğri sayesinde bir malzemede gerilme genliği hesaplandığı takdirde, bu malzemenin hesaplanan gerilme genliğindeki yorulma ömrü belirlenir.



Şekil 2.7. HMK yapıya sahip bir malzemede S-N eğrisinin şematik gösterimi (Lee 2005)

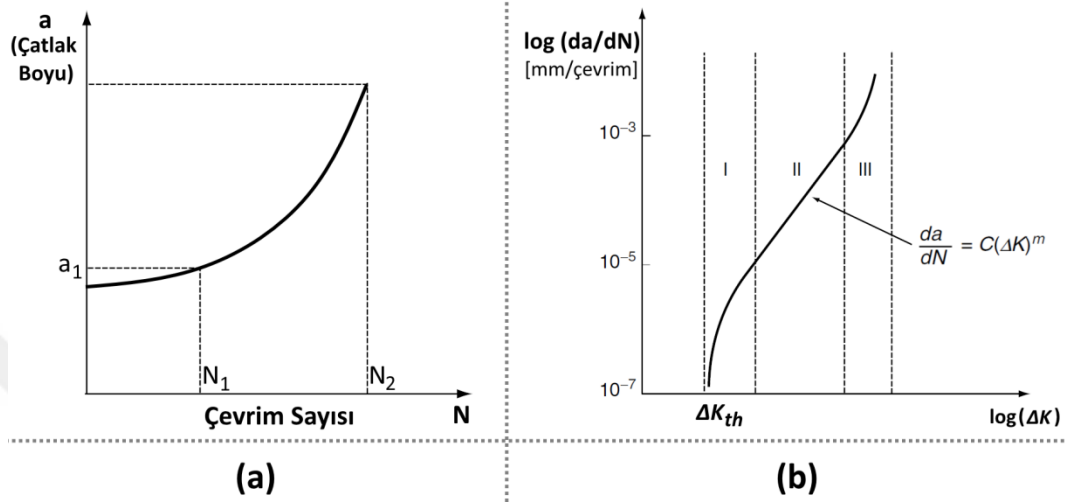
b) Şekil Değiştirme Ömrü (Strain Life) Yaklaşımı: Şekil değiştirme ömrü yaklaşımında yorulmaya maruz kalan bir malzemedeki gerilme-şekil değiştirme durumu dikkate alınarak ömür tahmini yapılmaktadır. Bu yaklaşımda, malzemelerin düşük çevrim sayılarında ($\sim 10^3$ - 10^4 çevrim) dolayısıyla da yüksek şekil değiştirme ve gerilme seviyelerindeki yorulma ömürleri incelenir. Gerilme ömrü yaklaşımının aksine bu yaklaşımda malzemelerin şekil değiştirmeleri hem elastik hem de plastik olarak tanımlanır. Dolayısıyla da bu yaklaşımda ϵ -N grafikleri kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de bu yaklaşımda kullanılan örnek bir ϵ -N grafiği gösterilmiştir. Bu yaklaşım özellikle, malzemelerde yorulma çatlak başlangıcının belirlenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.8. ϵ -N eğrisinin şematik gösterimi (Lee 2005)

c) Kırılma Mekaniği (Fracture Mechanics) Yaklaşımı: Kırılma mekaniği yaklaşımı çatlak içeren malzemelerde, yorulma etkisiyle oluşan çatlakların ilerlemesini inceler. Bu yaklaşımda, malzeme içerisinde yer alan/uygun bir yöntemle belirlenen ilk çatlak uzunluğu dikkate alınarak, bu çatlakların yorulma esnasında ilerlemesi ve kırılma anına kadarki süreç incelenir (safe life/emniyetli ömür). Bu süreçte, **yorulma çatlak ilerlemesi** veya **yorulma çatlak gelişimi (fatigue crack growth/propagation)** adı verilir. Malzeme içerisinde çatlak olduğu için, artık klasik yaklaşımdaki gerilme-şekil değiştirme bağıntıları bu yöntemde direkt olarak kullanılmaz. Bunun yerine, gerilme şiddet faktörü (K) olarak tanımlanan parametre dikkate alınır. Malzemelerde mevcut bir çatlakların kaç çevrim sayısı sonunda kırılmaya sebep olacak final çatlak uzunluğuna

ulaşacağı ise Şekil 2.9'da gösterildiği üzere ya $(a-N)$ ya da $(da/dN-\Delta K)$ eğrileri ile gösterilir.



Şekil 2.9. Yorulma çatlak ilerlemesi eğrilerinin şematik gösterimi (a) $a-N$ eğrisi ve (b) $da/dN-\Delta K$ eğrisi (Lee 2005)

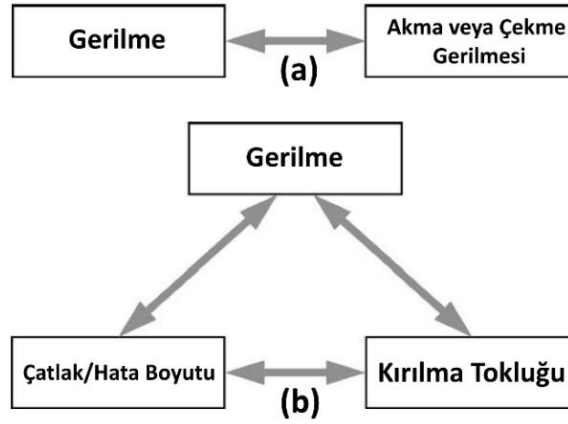
Bir parçada veya malzemede yorulma analizi yapılırken, yorulmanın bütün aşamalarının incelenmesini sağlayan tek bir yaklaşım yoktur. Gerilme ömrü yaklaşımı bir malzemede bütün yorulma ömrünü ele alırken, şekil değiştirme ömrü yaklaşımı özellikle yorulma olayının başlangıcı ve yorulma çatlak başlangıcını ele alır. Bunun yanında, kırılma mekaniği yaklaşımı ise çatlak içeren bir malzemede çatlak ilerlemesi ve kırılmaya kadar olan süreci inceler. Bahsi geçen her yaklaşımın bir birine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bu bakımdan uygun yaklaşımın seçilmesi temel olarak; yorulma olayında hangi safhanın inceleneceğine, malzeme türüne, malzemenin yükleme durumuna, yükleme geçmişine, çalışma ortamına ve incelenecek olan geometriye bağlıdır (Bannantine 1990; Stephens *et al.* 2000).

2.2. Kırılma Mekaniği

Mühendislik tasarımında kullanılan geleneksel yaklaşımda temel prensip, malzemelerin veya yapıların belirli bir kritik değeri aşıp aşmamasıdır. Örnek olarak; tasarımı yapılan bir makine elemanında, bu elemanın statik yükler altında hasarsız bir şekilde çalışıp

çalışmayacağı malzemenin akma gerilmesi (σ_0) ile ilişkilendirilerek belirlenebilir. Bu elemana etki eden kuvvetler ve momentler sonucunda, elemanda oluşan gerilme σ_0 'ın altında ise bu elemanın hasara uğramaksızın bu etkileri karşılayabileceği belirlenmiş olur. Ancak pek çok malzeme, yapı ve makine elemanı gerek üretim proseslerinden kaynaklanan gerekse kullanımları esnasındaki değişimler sonucunda çentik, boşluk, gözenek ve çatlak gibi yapısal hatalara sahiptirler. Bu hataların yapıda olması sonucunda artık klasik mühendislik yaklaşımları gerekli hesaplama ve analiz kriterlerini karşılayamamaktadır. Bu tip hatalar içeren malzemelerde belirli bir yük seviyesinden sonra kırılma olayı gerçekleşecektir. Bu sebeple de bu malzemelerin kırılma mekaniği yaklaşımına göre analiz edilmesi gerekmektedir.

Yapılarında çatlak bulunduran malzemelerin yük taşıma kapasitelerini belirleme bilimi olarak tanımlanan **Kırılma Mekaniği**, kuvvet ve momentlere maruz elemanlarda çatlak ucu civarındaki gerilme alanının matematiksel olarak tanımlanması esasına dayanmaktadır (Campbell 2012). Yukarıda da bahsedildiği üzere, kırılma mekaniği yaklaşımının klasik tasarımından farkı; mühendislik malzemeleri veya yapılarında bulunan çatlakları da hesaba katmasıdır. Klasik yaklaşımda malzemenin akma veya çekme gerilmesi esas alınarak malzemede oluşan gerilmeler karşılaştırılırken; kırılma mekaniği yaklaşımında, bu iki parametrenin yanında malzemede bulunan hata/çatlak boyutu da karşılaştırılmaktadır. Yani klasik yaklaşımda iki parametre (malzeme dayanımı-malzemede oluşan gerilme) dikkate alınırken, kırılma mekaniği yaklaşımında üç parametreye (malzeme dayanımı-malzemede oluşan gerilme-hata boyutu) bağımlılık söz konusudur (Anderson 2005). Kırılma mekaniği yaklaşımının klasik yaklaşımdan farkı Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



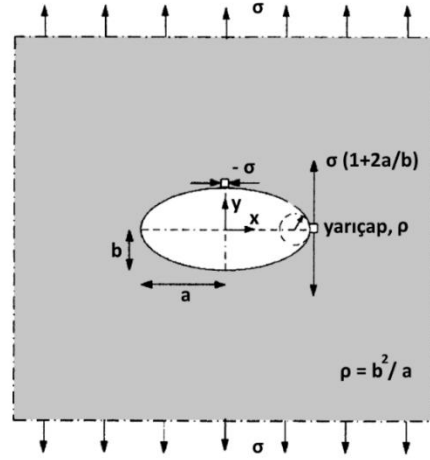
Şekil 2.10. Klasik yaklaşım ve kırılma mekaniği yaklaşımı (Anderson 2005)

Kırılma mekaniği yaklaşımını klasik yaklaşımdan ayıran bir diğer nokta ise çentik ve çatlak kavramlarının ayrımının yapılması ile daha iyi anlaşılmaktadır. Klasik tasarım yaklaşımında merkezinde eliptik delik içeren ve çekmeye zorlanan sonsuz bir levhada (Şekil 2.11), çentik ucunda oluşan maksimum gerilme (σ_{mak}) ve teorik gerilme yığılma faktörü (K_t);

$$\sigma_{mak} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \sigma \left(1 + \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (2.5)$$

$$K_t = 1 + 2 \frac{a}{b} = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Schijve 2001; Campbell 2012). Burada: a çentik uzunluğunun yarısı, b çentik boyunun yarısı ve $\rho = b^2/a$ olmak üzere ρ eğrilik yarıçapıdır.



Şekil 2.11. Eliptik delik içeren sonsuz bir levhada gerilme yığılması (Schijve 2001)

Burada dikkat çeken nokta ρ 'nun alabileceği değerlerdir. Eğer bu analizlerde kullanılan denklemleri kullanmak amacıyla yapıda bir çatlak olduğu kabul edilirse, çatlak uzunluğuna bakılmaksızın, teorik olarak $b = 0$ alınmalıdır. Ancak, bu durumda K_t değeri Denklem 2.6'dan da görüleceği üzere sonsuz değerini almaktadır ($K_t = \infty$). Bu bakımdan çatlak ucunda gerilme analizi yapılırken K_t denklemini kullanmak anlamsız olacaktır. Ancak çatlak içeren bir elemanda, çatlak ucundaki gerilme dağılımı bu elemanın karakteristik bir özelliğidir. Bunun yerine, çatlak ucu civarındaki gerilme dağılımının şiddetini belirleyen K (gerilme şiddet faktörü) değeri dikkate alınmalıdır (Schijve 2001). Bu sebeplerden dolayı Kırılma Mekaniği yaklaşımı, çatlak ucu civarında gerilme dağılımlarının hesaplanabilmesi bakımından da klasik yaklaşımdan ayrılmaktadır.

Bir malzemenin kırılma dayanımı, o malzemenin atomlarını bir arada tutan kohezif kuvvetlerin bir fonksiyonudur. Bu kriter dikkate alındığında; gevrek bir malzemenin kırılması için gereken gerilme değeri, o malzemenin elastisite modülü değerinin onda biri civarında olması ($E/10$) gerekmektedir. Ancak gerçekte bu değer $E/1000$ civarında olmaktadır. Griffith (Griffith 1921) cam çubukları test ederken yaptığı gözlemlerde; cam çubuğun boyu uzadıkça ve çapı arttıkça mukavemetinin azaldığını gözlemlemiştir ve bunun sonucunda da cam çubuğun boyutlarının artmasının yapıda daha fazla hata bulunmasına (özellikle yüzey hataları) sebep olacağını öne sürmüştür. Bu gözlem

sonunda da yapısında eliptik bir çatlak bulunan bir plakada **enerji dengesi yaklaşımını** kullanarak malzemenin kırılması için gereken kırılma gerilmesini hesaplamıştır (Campbell 2012). Griffith bir malzemeye kuvvet uygulandığında malzemede depolanan elastik şekil değiştirme enerjisinin iki yeni yüzey oluşturmak için gereken enerjiye eşit olacağını öne sürmüştü ve gevrek bir malzemede çatlak ilerlemesi için gereken kritik gerilme değerini:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (2.7)$$

olarak hesaplamıştır. Burada: E malzemenin elastisite modülü, γ_s yüzey enerjisi ve a çatlak uzunluğunun yarısıdır (Anderson 2005; Campbell 2012). Buna karşın Griffith tarafından öne sürülen yaklaşım sadece cam ve seramik gibi gevrek malzemelerde geçerlidir ve çatlak ucu eğrilik yarıçapını (ρ) dikkate almamaktadır. Hâlbuki mühendislik uygulamalarında kullanılan çoğu metalik malzeme elastik deformasyon yanında plastik deformasyon davranışı da göstermektedir (Campbell 2012). Orowan, Griffith teorisini sünek malzemelere uygulamak için; çatlak büyümesi ile alakalı olan plastik şekil değişimi enerjisini de (γ_p) dikkate alıp Denklem 2.7'yi yeniden düzenlemiştir.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (2.8)$$

Bu aşamadan sonra G.R. Irwin (Irwin 1948), γ_p ve γ_s terimlerini tek bir ifadede birleştirerek **kritik şekil değiştirme enerjisi salınım oranı (G_c)** kavramını ortaya koymuştur.

$$G_c = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (2.9)$$

Şekil değiştirme enerjisi salınım oranı veya çatlak büyüme kuvveti olarak tanımlanan G_c birim çatlak alanı için sistemdeki potansiyel enerji (U) değişimidir ($G = dU/da$). Griffith teorisi bu terim dikkate alınarak yeniden yazılırsa:

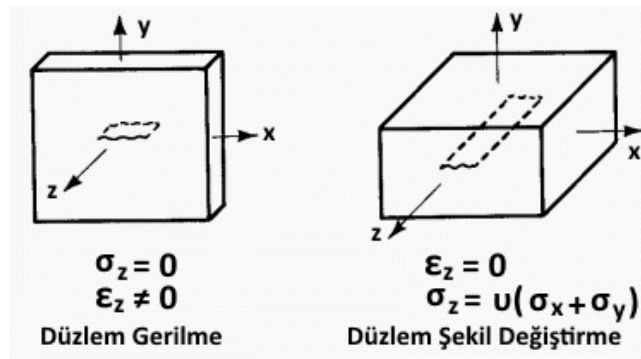
$$G_c = \frac{\sigma \pi^2 a}{E} \quad (2.10)$$

halini alır ve bir malzemede, $\frac{\sigma \pi^2 a}{E}$ değeri kritik G_c değerini aşarsa çatlak ilerlemesi/büyümesi olur (Bannantine 1990; Anderson 2005; Campbell 2012). Bununla birlikte, bir malzemede kırılma analizi gerçekleştirmek için kullanılabilecek iki eşdeğer (belirli şartlar altında) ve alternatif yaklaşım vardır. Bunlar; Enerji Dengesi ve Gerilme Şiddet Faktörü Yaklaşımlarıdır (Anderson 2005). Griffith, Orowan ve Irwin tarafından ortaya atılan teoriler daha öncede belirtildiği üzere enerji dengesi yaklaşımına göre belirlenmiştir. Ancak, özellikle kırılma mekaniği hesaplamalarında direkt olarak kullanılan K değerinin hesaplanması için ise gerilme şiddet faktörü yaklaşımı büyük önem taşımaktadır.

Çatlak içeren malzemelerde, malzemelerin dayanımlarının ve/veya gerilme durumlarının belirlenmesine olanak sağlayan kırılma mekaniği iki temel kategoriye ayrılmaktadır: **Lineer Elastik Kırılma Mekaniği** (LEKM/LEFM) ve **Elasto-plastik Kırılma Mekaniği** (EPKM/EPFM). Çatlak ucunun olabildiğince keskin olması ve çatlak ucunda çok küçük miktarda plastik deformasyon oluşması durumunda Lineer Elastik Kırılma Mekaniği Yaklaşımı kullanılmaktadır. Çatlak ucunun çok keskin olmaması ve çatlak ucunda büyük miktarda plastisite oluşması durumunda ise Elasto-plastik Kırılma Mekaniği Yaklaşımı kullanılmaktadır (Campbell 2012). Mühendislik uygulamalarında her iki yaklaşımda sıklıkla kullanılmasına rağmen kuşkusuz ki gevrek malzemelerde veya gevrek kırılma davranışı gösteren malzemelerde kullanılan Lineer

Elastik Kırılma Mekaniği büyük önem taşımaktadır. Çünkü çatlak içeren sünek bir malzemede çatlak ucundaki gerilmeler ve gerilme yığılmaları lokal olarak akma gerilmesini geçse dahi bu malzeme kırılıncaya kadar plastik şekil değişimi için enerji harcanacağından ani bir kırılma olayı gerçekleşmeyecektir. Ancak gevrek bir malzemede veya gevrek davranış gösteren bir malzemede çatlak uzunluğu belirli bir değere ulaştığında, plastik şekil değişimi de söz konusu olmadığından malzemede ani bir kırılma gözlemlenecektir (Campbell 2012).

Sünek bir malzeme, sahip olduğu geometrik özelliklere ve yükleme durumunda oluşan gerilme durumuna göre gevrek kırılma davranışı gösterebilmektedir. Şekil 2.12’de gösterildiği üzere x ve y eksenlerinde çekmeye veya basmaya zorlanan ince bir malzemede z eksen/kalınlık boyunca gerilme oluşmamaktadır ($\sigma_z = 0$). Ancak bu ekseninde şekil değişimi oluşmaktadır ($\epsilon_z \neq 0$). Gerilmelerin bir düzlemde kaldığı bu duruma **düzlem gerilme** adı verilir. x ve y eksenlerinde yüklenmiş kalın bir malzemede ise z yönündeki şekil değiştirmeler malzemenin kalınlığı sebebiyle sınırlandırılmıştır ($\epsilon_z = 0$). Poisson etkisi sebebiyle z yönünde gerilme oluşmaktadır. Burada şekil değiştirmeler bir düzlemde kaldığından dolayı da bu duruma **düzlem şekil değiştirme** denir (Bannantine 1990). Buradan şu sonuç çıkarılabilir; bir malzeme sünek olsa dahi çok kalın olması durumunda yükleme durumuna göre şekil değişimi kısıtlandığı için gevrekmiş gibi davranabilir.

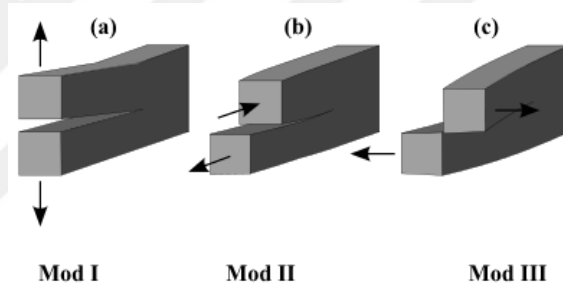


Şekil 2.12. Düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme (Bannantine 1990).

2.2.1. Lineer elastik kırılma mekaniği

2.2.1.a. Çatlak ucu elastik gerilme alanı ve gerilme şiddet faktörü yaklaşımı

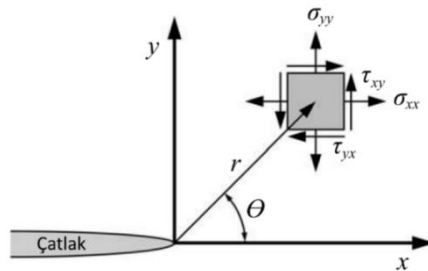
Çatlaklı malzemelerde kırılma olayının incelenmesi için bir diğer yaklaşım ise çatlak ucu civarındaki gerilmelerin incelenmesidir. Mühendislik yapı ve elemanları temel olarak üç farklı yükleme tipine/moduna maruz kalmaktadırlar. Bunlar; Mod I: Çekme (Açılma) Modu, Mod II: Kayma Modu (düzlem içi kayma) ve Mod III: Kesme (Makaslama veya düzlem dışı kayma) Modu'dur (Şekil 2.13). Mühendislik uygulamalarında en çok karşılaşılan yükleme tipi Mod I'dir.



Şekil 2.13. Yükleme tipleri

(a) Mod I: Çekme (Açılma) Modu, (b) Mod II: Kayma Modu ve (c) Mod III: Kesme (Makaslama) Modu

Irwin (Irwin 1957) Mod I yükleme tipini esas alarak yaptığı çalışmada; sonsuz uzunlukta, sonsuzda yüklenmiş ve merkezinde $2a$ uzunluğunda çatlak içeren bir levhayı ele almış ve çatlak ucu civarında gerilme dağılımını (Şekil 2.14) incelemiştir (Stephens *et al.* 2000; Anderson 2005).



Şekil 2.14. Çatlak ucundan belirli bir mesafe uzaklıkta bulunan herhangi bir noktada gerilme bileşenleri

Şekil 2.14'te gösterildiği üzere r ve θ çatlak ucundan olan uzaklıkları tanımlamaktadır. Çatlak ucundan belirli bir mesafe uzaklıktaki bir noktada oluşan gerilmeler Denklem 2.11, 2.12 ve 2.13'de verilmiştir.

$$\sigma_{xx} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.11)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.13)$$

Burada σ_{xx} ve σ_{yy} sırasıyla x ve y yönündeki normal gerilmeleri, τ_{xy} ise kayma gerilmesini tanımlamaktadır. Bu ifadelerden de anlaşılacağı üzere $r = 0$ olduğunda yani tam çatlak ucunda bütün gerilmeler sonsuza gider. Ayrıca oluşan bütün gerilmeler, $\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$ geometrik pozisyon ve $\sigma\sqrt{\pi a}$ ifadesinin çarpımına eşittir. İlk çatlak uzunluğu ve malzemede oluşan gerilmenin bir fonksiyonu olan $\sigma\sqrt{\pi a}$ ifadesine **gerilme şiddet faktörü** veya **gerilme yoğunluk faktörü** denir. Çatlak ucu elastik gerilme alanının büyüklüğünü tanımlayan bu değer K ile gösterilir ve Denklem 2.14'deki şekilde ifade edilir. Bu denklem Mod I için hesaplandığından dolayı I alt indisi kullanılmaktadır. Diğer yükleme modları için yapılan hesaplamalarda ise Mod II ve Mod III gerilme şiddet faktörü değerleri sırasıyla K_{II} ve K_{III} şeklinde ifade edilir.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'te verilen K değeri sonsuz uzunlukta ve merkezinde $2a$ uzunluğunda çatlak bulunan bir levha için elde edilmiştir. Ancak, farklı çatlak geometrileri ve malzeme boyutları dikkate alındığında bu ifade direkt olarak kullanılamayacaktır. Bu sebeple gerilme şiddet faktörü daha genel bir ifadeyle, denklem içerisine farklı

geometrilerinde hesaplanmasını sağlayan $f(g)$ ifadesi yerleştirilerek Denklem 2.15'deki şekilde kullanılır. Geometrik faktör veya düzeltme faktörü olarak tanımlanan $f(g)$ değeri, analiz yapılacak olan elemanın ve bu eleman içerisinde bulunan mevcut çatlakın geometrik özelliklerine bağlı boyutsuz bir parametredir.

$$K_I = f(g). \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.15)$$

Bu ifadeden; çatlak ucundaki gerilmelerin ve gerilme dağılımlarının, K 'nın fonksiyonu olduğu görülmektedir. Gerilme şiddet faktörü (K)'nın bilinmesi halinde çatlak ucundaki gerilme ve şekil değiştirmeler bulunabilir. Çatlak içeren bir malzemede gerilme şiddet faktörü kritik bir değerin üzerine çıkarsa, mevcut çatlak ilerlemeye başlar ve kırılma olayı gerçekleşir ($K = K_{IC}$). Gerilme şiddet faktörünün bu kritik değerine **kırılma tokluğu (K_c)** adı verilir ve mod I yükleme durumu için:

$$K_{IC} = f(g). \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.16)$$

şeklinde hesaplanır. Kırılma tokluğu değeri; akma gerilmesi, elastisite modülü veya çekme gerilmesi gibi her malzemeye özgü olan bir malzeme özelliğidir. Bu sebeple, çatlak içeren veya içerebilecek bir sistemde, kırılma mekanizmasına göre tasarım yapılırken,

$$K_I = f(g). \sigma \sqrt{\pi a} \leq K_{IC} \quad (2.17)$$

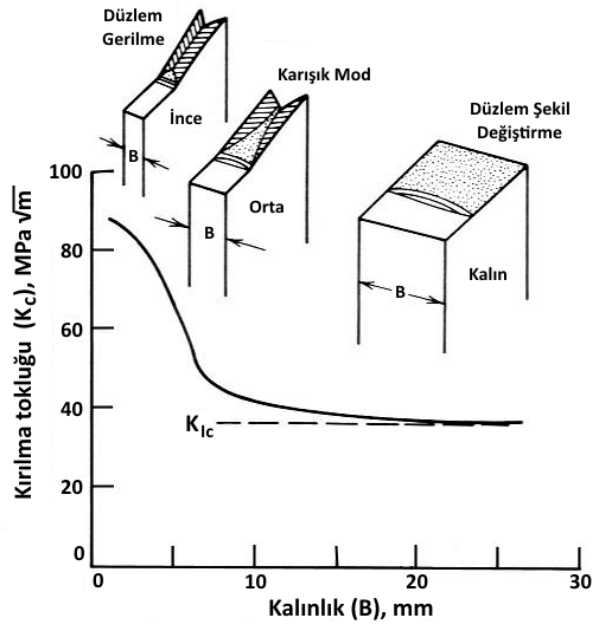
ifadesi dikkate alınmalıdır. Bu ifade ile müsaade edilebilir gerilme veya müsaade edilebilir çatlak boyu belirlenebilir (Bannantine 1990; Anderson 2005; Campbell 2008).

Ayrıca Irwin (Irwin 1957) tarafından gerçekleştirilen analizden, gerilme şiddet faktörü ve şekil değiştirme enerjisi salınım oranının eşdeğer olduğu da anlaşılmaktadır. Düzlem şekil değiştirme durumu için elastisite modülü: $E' = E/(1 - \nu^2)$ ve düzlem gerilme

durumu için elastisite modülü: $E' = E$ olmak üzere K_I ve G arasındaki ilişki Denklem 2.18'deki şekilde tanımlanır.

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2.18)$$

Bununla birlikte kırılma tokluğu değeri bir malzeme özelliği olmasının yanında bir malzemeye uygulanan şekil değiştirme oranına, sıcaklığa, malzeme kalınlığına, mikro yapıya bağlı olarak değişmektedir (Stephens *et al.* 2000). İnce malzemelerde (düzlem gerilme), Şekil 2.15'te gösterildiği üzere kırılma tokluğu (K_c) değeri malzeme kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Belirli bir kalınlıktan sonra ise kırılma tokluğu değeri sabit bir değere ulaşmaktadır ve bu değere **düzlem şekil değiştirme kırılma tokluğu (K_{Ic})** değeri adı verilir. Buradan da anlaşılacağı üzere düzlem gerilme kırılma tokluğu kalınlıkla değiştiğinden dolayı bir malzeme özelliği olmamasına rağmen sabit bir değere sahip olan düzlem şekil değiştirme kırılma tokluğu değeri bir malzeme özelliğidir (Stephens *et al.* 2000; Campbell 2012).



Şekil 2.15. Malzeme kalınlığının kırılma tokluğuna etkisi (Stephens *et al.* 2000)

2.2.2. Çatlak ucu plastisitesi

Lineer elastik gerilme analizinden, keskin bir çatlak ucunda çatlak ucu eğrilik yarıçapı değeri “0” olacağından; gerilmelerin teorik olarak sonsuz değer alacağı bilinmektedir. Ancak, gerçekte çatlak ucu eğrilik yarıçapı sonlu bir değer alır. Yapısında çatlak bulunduran sünek bir malzemede; uygulanan kuvvet veya momentler sonucunda çatlak ucundaki gerilmeler akma gerilmesini geçtiğinde, çatlak ucunda: Çatlak ucu akma bölgesi (crack-tip-yielding zone) adı verilen ve **plastik bölge** olarak da ifade edilen bir bölge oluşur. Çatlak ucundaki bu bölge iki temel yaklaşım ile hesaplanabilir: Irwin Yaklaşımı ve Strip-yield Model.

2.2.2.a. Irwin yaklaşımı

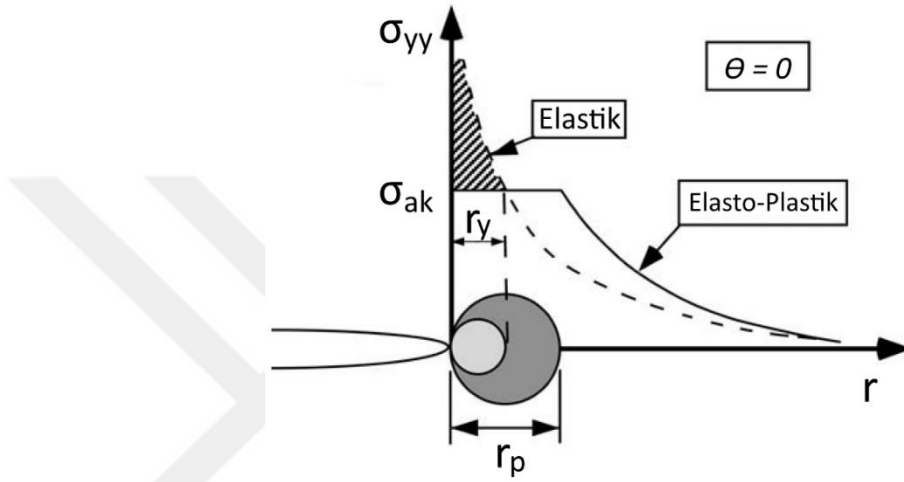
Şekil 2.16. ve Denklem 2.12’de gösterildiği üzere; lineer elastik bir cisimde plastik bölge boyutunun hesaplanması için y yönündeki normal gerilmenin akma gerilmesi değerine eşit olması gerekmektedir ($\sigma_{yy} = \sigma_{ak}$). Bu durumda denklem akma gerilmesi dikkate alınarak birinci dereceden çözülürse, plastik bölge büyüklüğü:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ak}} \right)^2 \quad (2.19)$$

şeklinde hesaplanır. Çatlak ucunda oluşan deformasyon sertleşmesi ihmal edilirse bu değer lineer elastik davranan bir malzemede plastik bölge boyutunu tanımlar. Ancak, Şekil 2.16’da gösterildiği üzere elasto-plastik bir malzemede çatlak ucu plastik bölge büyüklüğünün hesaplanması için elastik davranış yanında plastik davranışında dikkate alınması gerekir. Elasto-plastik bir malzemede akma gerilmesinin geçilmesi durumunda oluşan gerilme dağılımı dikkate alınarak bu bölge yeniden hesaplanırsa, elasto-plastik davranış için plastik bölge büyüklüğü:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ak}} \right)^2 \quad (2.20)$$

olarak bulunur (Anderson 2005).



Şekil 2.16. Plastik bölge boyutunun elastik ve elasto-plastik davranış için gösterimi (Anderson 2005)

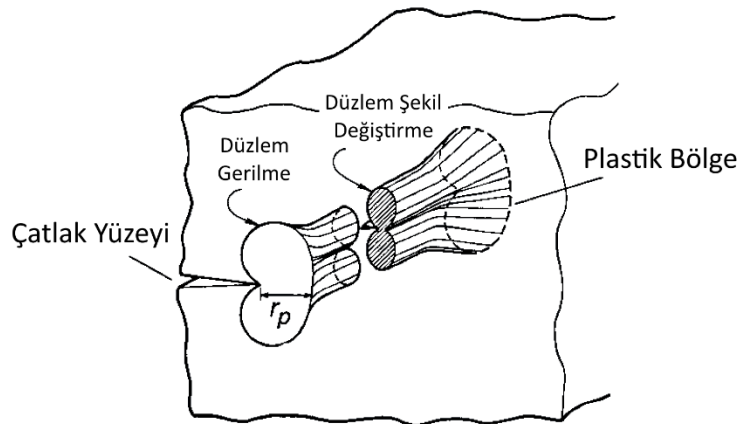
Irwin (Irwin 1997), yapısında çatlak bulunan bir malzemede; çatlak ucunda plastik bölge olması durumunda: çatlağın gerçek boyutundan daha uzunmuş gibi davranacağını öne sürmüştür (Anderson 2005; Campbell 2012). Bu görüşe göre efektif çatlak uzunluğu $a_{ef} = a + r_y$ şeklinde tanımlanır. Bu düzeltme dikkate alınarak düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme için plastik bölge büyüklükleri Denklem 2.21'deki şekilde düzenlenir.

$$r_y = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ak}} \right)^2 & \text{Düzlem Gerilme} \\ \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ak}} \right)^2 & \text{Düzlem Şek. Değ.} \end{cases} \quad (2.21)$$

Buradan görüleceği üzere düzlem şekil değiştirme plastik bölge büyüklüğü, düzlem gerilme plastik bölge büyüklüğünden üç kat daha küçüktür. Ayrıca burada elde edilen plastik bölgeler; statik yükleme şartları altında yapılan analizler sonucunda elde edildiğinden monotonik plastik bölge olarak adlandırılırlar. Bununla birlikte yorulmaya maruz kalan bir elemanda plastik bölge büyüklüğü, tekrarlı yüklemenin etkisi ile monotonik durumdan elde edilen plastik bölge büyüklüğünün $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Yorulma esnasında elde edilen plastik bölge, çevrimsel plastik bölge olarak adlandırılmaktadır ve Denklem 2.22'deki şekilde hesaplanmaktadır.

$$r_y = \begin{cases} \frac{1}{8\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ak}} \right)^2 & \text{Düzlem Gerilme} \\ \frac{1}{24\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ak}} \right)^2 & \text{Düzlem Şek. Değ.} \end{cases} \quad (2.22)$$

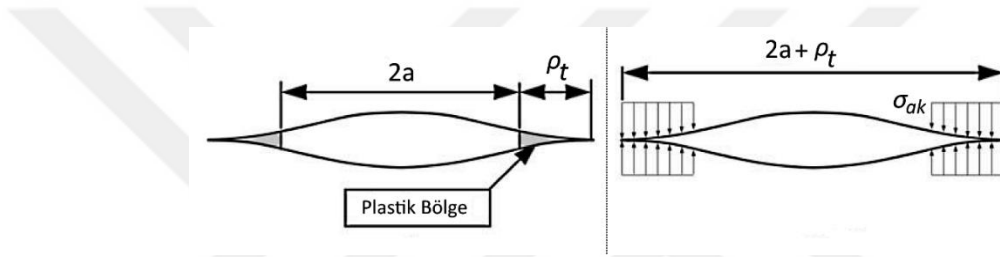
Kalın bir malzeme için plastik bölge şekli, Şekil 2.17'de şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre, malzemenin merkezinde düzlem şekil değişimi hâkimdir ve plastik bölge boyutu küçüktür. Ancak malzemenin yüzeylerine doğru gidildikçe plastik bölge boyutu büyümekte ve malzemenin tam yüzeyine ulaşıldığında, tamamen düzlem gerilme durumu hâkim olduğundan plastik bölge boyutu maksimum değerini almaktadır.



Şekil 2.17. Plastik bölge büyüklüğünün kalınlık boyunca değişimi (Campbell 2012)

2.2.2.b. Strip-yield model

Plastik bölge büyüklüğünün hesaplanması için öne sürülen bir diğer model strip-yield model'dir. Dugdale (Dugdale 1960) ve Barenblatt (Barenblatt 1962), sertleşme özelliği göstermeyen bir malzeme için düzlem gerilme durumunda çatlak ucunda uzun ve ince bir plastik bölge olduğunu, her bir çatlak ucu kapanma gerilmesinin akma gerilmesine eşit olduğunu varsaymışlar ve toplam çatlak uzunluğunu $2a + 2\rho_t$ olarak kabul etmişlerdir (ρ_t , plastik bölge uzunluğu). Şekil 2.18'de strip-yield model gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Strip-yield modeli (Anderson 2005)

Bu model bir çatlağın açılmaya ve kapanmaya çalışması durumları dikkate alınarak, iki elastik çözümün süperpoze edilmesi ile elde edilmiştir. Bu çözüm yapıldığında ise strip-yield modeli için plastik bölge boyutu, Irwin tarafından hesaplanan bölge boyutuna yakın olarak Denklem 2.23'teki şekilde bulunur (Anderson 2005).

$$\rho_t = \frac{\pi^2 \sigma^2 a}{8 \sigma_{ak}^2} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ak}} \right)^2 \quad (2.23)$$

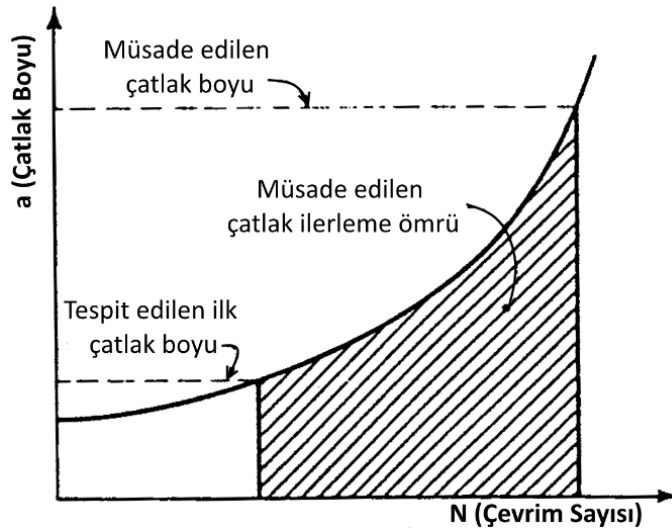
2.3. Yorulma Analizlerinde Kırılma Mekaniği Yaklaşımının Kullanımı: Yorulma Çatlak İlerlemesi

2.3.1. Sabit genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi

Bir malzemenin yorulma ömrü daha öncede belirtildiği üzere çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve kırılma aşamalarından meydana gelmektedir. Bu aşamalarda özellikle

yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin birbirinden ayrılması oldukça zordur. Genel olarak düşük şekil değiştirme genlikli yüklemelerde çatlak başlangıcı için geçen ömür, toplam yorulma ömrünün %90'ını kapsamaktadır. Yüksek şekil değiştirme genlikli yüklemelerde ise, çatlak ilerlemesi aşaması toplam yorulma ömrünün büyük bir kısmını kapsamaktadır. Bu bakımdan kırılma mekaniği yaklaşımı, yorulma hesaplamalarında çatlak ilerleme ömrünün belirlenmesinde kullanılmaktadır (Bannantine 1990).

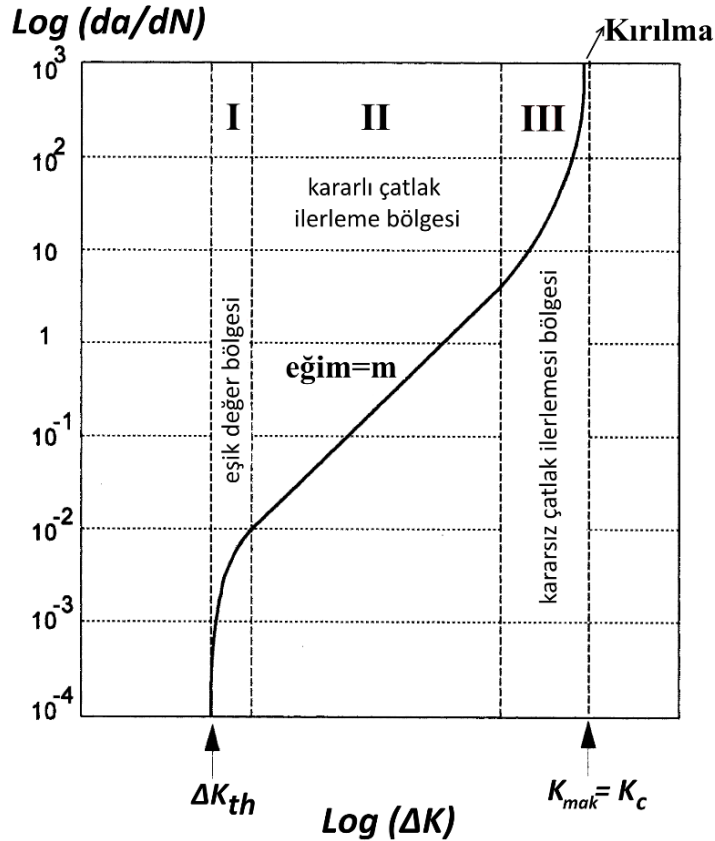
Kırılma mekaniğinin temel prensiplerini kullanarak, belirli bir uzunluktaki çatlağın kırılıncaya kadar olan veya müsaade edilebilir çatlak uzunluğuna ulaşıncaya kadar olan ilerleme oranını ve bu süreç için gerekli olan çevrim sayısını belirlemek mümkündür. Özellikle havacılık endüstrisinde çatlak ilerleme olayını anlamak ve tahmin etmek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu olayı anlamak için; **hasar toleransı yaklaşımı (damage tolerant design concept)** olarak da bilinen; **emniyetli ömür (safe-life)** veya **hasarsız ömür (fail-safe)** yaklaşımları geliştirilmiştir (Shi *et al.* 2015). Bu yaklaşımda; tespit edilen ilk çatlak boyuna göre malzemenin çatlak ilerleme oranı veya özelliklerinin bilinmesi durumunda, malzemenin güvenilir bir şekilde kullanılabileceği görüşü öne sürülmektedir. Şekil 2.19'da bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Çatlak içeren bir parçada çalışma ömrü (Bannantine 1990)

Şekil 2.19’da çatlak uzunluğu a ve çevrim sayısı N ile gösterilmiştir ve şekilden görüleceği üzere yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak büyük boyutlarda iken harcanmaktadır. Bununla birlikte; bir malzemenin yorulma çatlak ilerleme davranışı, **yorulma çatlak büyüme/ilerleme eğrileri (fatigue crack growth/propagation rate curves)** ile gösterilmektedir. Yorulma çatlak ilerleme oranı: $\frac{da}{dN}$ (mm/çevrim sayısı) birim çevrim sayısı başına çatlak uzunluğundaki değişim ve gerilme şiddet faktörü aralığı: ΔK ($MPa\sqrt{mm}$) olmak üzere yorulma çatlak ilerleme eğrisi Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Ayrıca ΔK değeri Denklem 2.24’deki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\Delta K = K_{mak} - K_{min} = f(g)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.24)$$



Şekil 2.20. Yorulma çatlak ilerleme eğrisi (Schijve 2001)

Şekil 2.20, üç bölgeden oluşmaktadır. I. Bölge; gerilme şiddet faktörünün eşik değeri ile ilgilidir, II. Bölge; lineerdir ve III. Bölge ise çatlak ilerleme oranının oldukça yüksek ve yorulma ömrünün oldukça düşük olduğu bölgedir.

- **I. Bölge (Eşik Değer Bölgesi):** Bu bölgede çatlak ilerleme oranı 10^{-6} mm/çevrim seviyesinde veya daha azdır. Bu bölge, malzemenin tane yapısı, malzemede oluşan ortalama gerilme, frekans, gerilme oranı ve sıcaklık gibi mikro yapısal ve çevresel etkilere oldukça duyarlıdır. Bu bölgede en önemli parametre ΔK_{th} 'dir (gerilme şiddet faktörü eşik değeri) (Beden *et al.* 2009). Eğer bir malzemede çatlak ilerleme hızı/oranı bu değerin altında ise çatlak ilerlemesi gerçekleşmez. Ayrıca bu değer üzerinde en etkili parametre gerilme oranıdır (R) (Dowling 1993; Beden *et al.* 2009).
- **II. Bölge (Kararlı Çatlak İlerlemesi Bölgesi):** Çatlak ilerleme oranı lineerdir ve çatlak ilerlemesi karardır. Bu bölgede, çatlak ucu plastik bölge büyüklüğü malzemenin ortalama tane boyutundan büyük fakat çatlak uzunluğundan küçüktür (Wang and Hsu 1994). Çatlak ilerleme oranı 10^{-6} - 10^{-3} mm/çevrim seviyesindedir. Bu bölgede bahsedilen çatlak ilerleme oranı; mikro yapı, ortalama gerilme, süneklik, çevre ve kalınlıktan etkilenmektedir ve bunlar içerisinde en etkili parametre ortalama gerilmedir.

Bu bölge kararlı çatlak ilerleme bölgesi olarak bilinmesi yanında **Paris-Erdoğan Bölgesi** olarak da bilinmektedir. Kırılma mekaniği yaklaşımını yorulma analizine ilk olarak uygulayan Paris ve Erdoğan (Paris and Erdogan 1963), bu bölgeyi:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.25)$$

eşitliği ile tanımlamışlardır ve bu denklem **Paris-Erdoğan Eşitliği** olarak adlandırılmıştır. Burada C ve m (lineer kısmın eğimi) değerleri malzemeye özgü sabitler olup, ΔK değeri ise gerilme şiddet faktörü aralığını ($\Delta K = K_{mak} - K_{min}$) tanımlamaktadır. Bu denklemin bulunmasından sonra farklı araştırmacılar (Walker 1970; Frost *et al.* 1971; Collipriest Jr 1972; Forman 1972; McEvily 1973; Miller and

Gallagher 1981; Xiulin and Hirt 1983; Wang and Hsu 1994) kararlı çatlak ilerleme bölgesini tanımlamak amacıyla birçok eşitlik ve teori öne sürmüşlerdir (Beden *et al.* 2009).

- **III. Bölge (Kararsız Çatlak İlerlemesi Bölgesi):** Bu bölgede çatlak ilerleme hızı oldukça yüksektir ($\frac{da}{dN} > 10^3$ mm/çevrim) ve bu sebeple de hızlı ve kararsız çatlak ilerlemesi olur. $da/dN - \Delta K$ eğrisi asimptotik olarak kırılma tokluğu (K_c) değerine yaklaşır ve bu değere ulaşıncaya kadar kırılma olayı gerçekleşir. Çoğu mühendislik uygulamasında bu bölge göz ardı edilir çünkü bu bölgede gerçekleşen ilerleme ve kırılma olayı toplam yorulma ömrünün çok az bir kısmını kapsamaktadır. Bu bölgede gerilme seviyesinin oldukça yüksek olması çatlak ucu plastik bölge büyüklüğünün, çatlak uzunluğundan daha büyük olmasına sebep olur. Bu bölgede LEFM prensipleri geçersiz olur ve bundan dolayı EPFM prensiplerine göre hesaplama yapılması gerekir. Ortalama gerilme, mikro yapı, malzeme kalınlığı ve çevresel etkiler bu bölgede etkilidir.

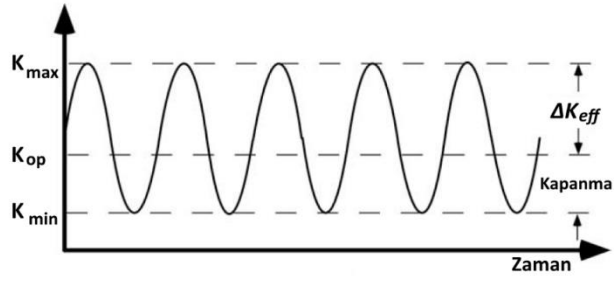
Bunlarla birlikte bir malzemenin yorulma çatlak ilerleme davranışı; gerilme oranı başta olmak üzere frekans, sıcaklık, yükleme dalga formundan oldukça önemli derece etkilenmektedir.

2.3.2. Çatlak kapanması

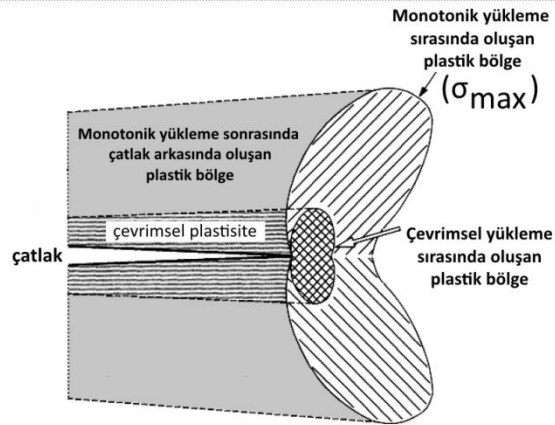
Yorulma çatlak ilerlemesi analizlerinde kuşkusuz ki en önemli teorilerden biri çatlak kapanma teorisidir. Bu teori hem sabit genlikli yükler altında hem de bir sonraki kısımda anlatılacak olan değişken genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi konusundaki yük etkileşim modellerini açıklama noktasında pek çok avantaj sunmaktadır. Wolf Elber (Wolf 1970) yaptığı çalışmada; çeki yükleri altında çalışan bir malzemede çekme gerilmelerinin değeri sıfır olmadan da çatlağın kapalı olduğunu gözlemlemiştir. Bu gözlem, malzeme hala çeki yüklerine maruz iken çatlak ucunun pozitif bir yük değerinde kapalı olduğu anlamına gelmektedir. Bu analiz çatlak ilerleme tahminlerinde büyük önem taşımaktadır. Elber tarafından öne sürülen teori şu şekilde açıklanmaktadır: σ_{max} ve σ_{min} gerilmelerine maruz (Şekil 2.21-a) ve merkezinde çatlak içeren bir

levhada tekrarlı yükleme neticesinde çatlak ucunda plastik deformasyon oluşmaktadır. Bu plastik bölge K_{max} ve K_{min} değerleri arasında oluşturulmuştur. Şekil 2.21-b’de gösterildiği üzere plastik bölge büyüklüğü, σ_{max} değeri ile ilgili olduğundan $(K_{max}/\sigma_{max})^2$ gibi bir değer almaktadır. Bu bölge malzemenin yükleme doğrultusu boyunca plastik olarak uzar ve her çevrim sonrasında bir önceki çevrimden daha uzun hale gelir. Tekrarlı yüklemeye maruz kalan elemanda bahsedilen bu plastik bölgenin yanında, tekrarlı yüklemeden kaynaklanan bir diğer plastik bölge daha oluşmaktadır. Bu bölge şekilde de gösterildiği üzere σ_{max} tarafından oluşturulan plastik bölge tarafından sarılmaktadır ve bu bölgenin büyüklüğü ise σ_{max} tarafından oluşturulan plastik bölgenin $1/4$ ’ü kadardır. Burada K_{max} tarafından oluşan plastik bölge; monotonik plastik bölge ve tekrarlı yüklemeden dolayı oluşan plastik bölge ise çevrimsel plastik bölge olarak adlandırılır.

Çatlak ucu plastik bölgesi her çevrimde bir önceki çevrimden daha büyük olacak şekilde büyür ve uzar. Bunun sonucunda ise çatlak ucu ve arkasında plastik deformasyon meydana gelir. Bu plastik deformasyon bölgesinin büyük bir kısmını monotonik, çok daha küçük bir kısmını ise çevrimsel yüklemekten dolayı oluşan plastisite oluşturur. Bu olaylar sonucunda, çatlak ucu ve arkasında plastik şekil değişimi göstererek uzadığından dolayı olduğundan daha uzun davranır. Bu durum bir çatlağın çeki yüklerinde dahi kapalı davranabileceğini açıklamaktadır. Plastisite ile oluşturulan çatlak kapanması olarak bilinen bu durum çoğu zaman Elber’e ithafen, **Elber Çatlak Kapanma Teorisi** olarak adlandırılmaktadır (Schijve 2001; Anderson 2005).



(a)



(b)

Şekil 2.21. Çatlak kapanması olayı

(a) efektif gerilme aralığı ve (b) plastik bölge büyüklükleri (Schijve 2001; Anderson 2005).

Ayrıca Elbe'in öne sürdüğü teoriye göre; efektif gerilme şiddet faktörü aralığı (ΔK_{eff}) ve çatlak açılması için gerekli gerilme şiddet faktörü (K_{op}) fikirlerini öne sürmüştür.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2.26)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.27)$$

$$K_{op} > K_{min} \quad (2.28)$$

$$\Delta K > \Delta K_{eff} \quad (2.29)$$

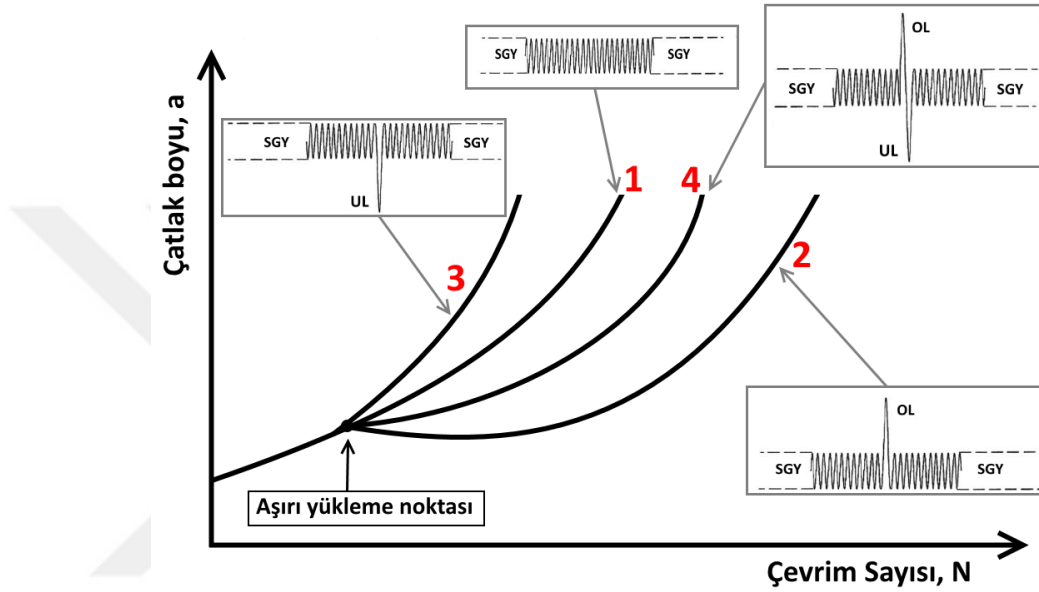
Bu görüşe göre, çatlak ilerlemesi için çatlağın tamamen açık olması gerekmektedir ve bu durumda çatlak ilerlemesinden sorumlu olan efektif gerilme şiddet faktörü aralığı ΔK_{eff} olarak tanımlanmaktadır.

2.3.3. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi ve yük etkileşim modelleri

Yorulma olayında, sabit bir yük genliği ve sabit bir ortalama gerilmede gerçekleşen yükleme tipine **sabit genlikli yükleme (SGY)** adı verilmektedir. Buna karşın, gerilme genliğinin yorulma esnasında bir veya birden fazla değişmesi durumunda gerçekleşen yükleme tipine ise **değişken genlikli yükleme (DGY)** denir (Skorupa 1998). Yorulma çatlak ilerleme testleri veya tahminleri genellikle değişken genlikli yüklerden ziyade sabit genlikli yükler altında gerçekleştirilmektedir. Sabit genlikli yükleme durumunda çatlak ilerleme/gelişim miktarı (Δa) sadece mevcut çatlak boyundaki değişim ve yükleme durumu ilişkilendirilerek hesaplanmaktadır. Ancak, makine ve yapı elemanları çalışmaları esnasında çoğu zaman değişken genlikli yükler altında yorulmaya maruz kalmaktadırlar. Bu noktada, değişken genlikli yorulma şartları altında çalışan elemanlarda sabit genlikli yükleme şartlarında kullanılan eşitlik veya prensipler kullanılamamakta ve geçersiz olabilmektedir. Çünkü değişken genlikli yükleme altında gerçekleşen yorulma olayında; çatlak ilerleme miktarının yanında yükleme geçmişine de bağımlılık söz konusudur (Sander and Richard 2006). **Yük etkileşimi veya sekans etkileri** (*load interactions or sequence effects*) olarak adlandırılan bu durum, yorulma çatlak ilerleme miktarını/oranını ve bunun sonucunda da malzemelerin yorulma ömürlerini etkilemektedir (Bannantine 1990; Sander and Richard 2006).

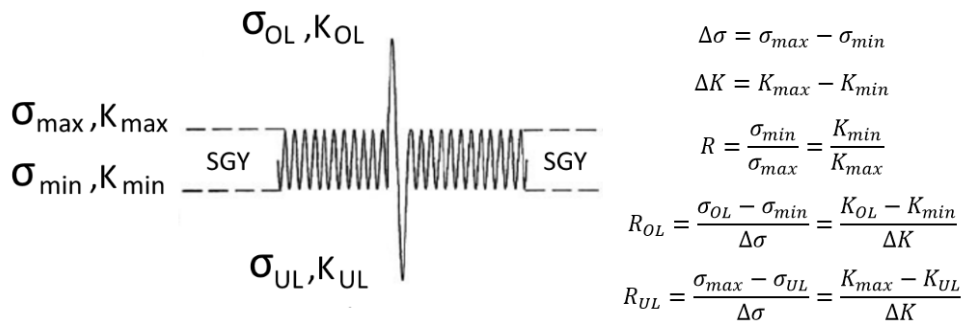
Şekil 2.22’de, yük etkileşimleri sonucunda oluşan bazı temel çatlak ilerleme modelleri gösterilmiştir. SGY altında çatlak ilerleme davranışı 1 numaralı eğri ile gösterilmiştir. Eğer malzemeye tek bir çevrim SGY’nin üzerinde bir yük uygulanırsa (çekme aşırı yükü-OL) çatlak ilerleme ömrü 2’deki gibi artmaktadır. Bu durum bası aşırı yükü için tam tersidir. Eğer malzemeye tek bir çevrim SGY’nin altında bir yük uygulanırsa (bası aşırı yükü-UL) bu seferde malzemenin çatlak ilerleme ömrü 3’teki gibi azalmaktadır.

Bununla birlikte çeki aşırı yükünü takiben bir bası aşırı yükü uygulanırsa malzemenin yorulma çatlak ilerleme ömrü 4 numarada gösterildiği gibi artacaktır. Fakat bu artış tekil çeki aşırı yükünün etkisinden daha az olmaktadır (Fuchs and Stephens 1980; Skorupa 1998; Beden *et al.* 2009).



Şekil 2.22. DGY altında temel çatlak ilerleme modelleri
SGY (1), Tekil OL (2), Tekil UL (3) ve Tekil OL-UL (4)

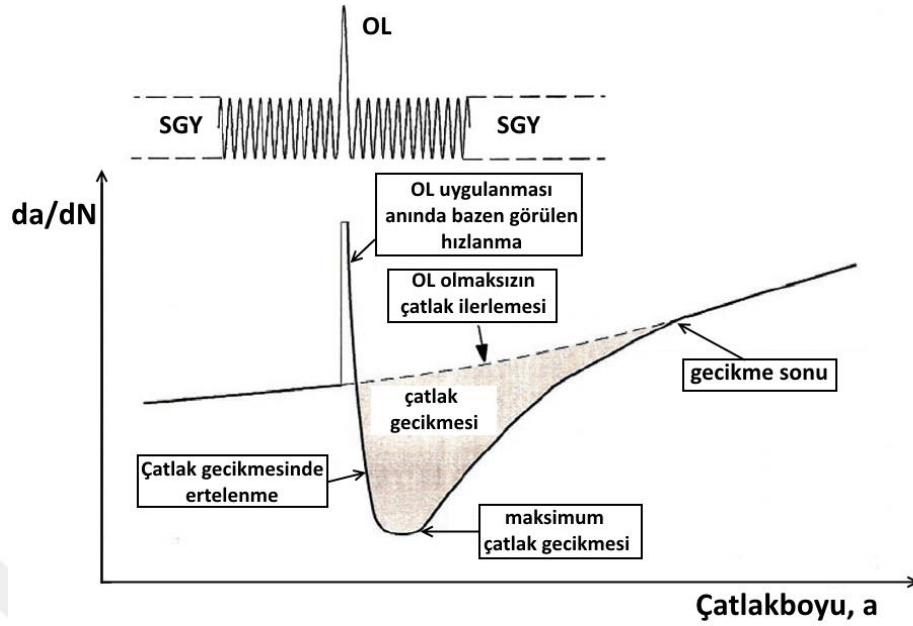
Bununla birlikte değişken genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi analizlerinde kullanılan temel büyüklükler Şekil 2.23'te gösterilmiştir.



Şekil 2.23. DGY altında çatlak ilerleme davranışının analizinde kullanılan temel büyüklükler

Yük etkileşimi davranışı, ilk olarak 1960'lı yılların başlarında yapılan deneysel çalışmalarda (Schijve and Luchtvaartlaboratorium 1960; Hudson and Hardrath 1961; Hudson and Hardrath 1963) gözlemlenmiştir (Nelson 1977). Bu çalışmalarda, sabit genlikli yükler altında yorulmaya maruz kalan bir malzemede; Şekil 2.23'te gösterildiği üzere tek bir çevrim çeki aşırı yükü (**Çeki aşırı yükü [AY]- Tensile Overload [OL]**) uygulanması durumunda çatlak ilerleme oranının azaldığı ve toplam yorulma çatlak ilerleme ömrünün arttığı gözlemlenmiştir. Bu olay, OL yükü uygulandığında çatlak ilerleme oranında ani bir hızlanma (bazı malzemelerde) bunu takiben çatlak gecikmesi ve normal çatlak ilerleme davranışına dönüş ile sonuçlanmaktadır. **Çatlak gecikmesi/yavaşlaması (crack retardation)** olarak adlandırılan bu olay ile ilgili olarak, eğer uygulanan kuvvet yeterince büyük ise **çatlak tutulması (crack arrest)** olur ve hatta çatlak ilerlemesi tamamıyla durabilir (Bannantine 1990; Schijve 2009).

Denklem 2.21 ve Denklem 2.22'de verilen plastik bölge boyutları düşünüldüğünde; ince malzemeler ve düşük akma mukavemetine sahip malzemelerde, aşırı yükleme sonucunda oluşacak plastik bölge büyüklüğü diğer malzemelere göre daha fazla olacağından; çatlak gecikme miktarı da daha yüksek olmaktadır. Şekil 2.24'te gösterildiği üzere, aşırı yükleme yapılması durumunda, çatlak ilerleme oranı/miktarı yük uygulanır uygulanmaz hemen minimum değere ulaşmamaktadır. Bununla birlikte, aşırı yükleme plastik bölgesinde 1/8 ila 1/4 'lük çatlak ilerlemesinden sonra çatlak ilerleme miktarı minimum değere ulaşmaktadır. Bu olaya **ertelenmiş çatlak gecikmesi/yavaşlaması (delayed retardation)** adı verilir (Bannantine 1990; Schijve 2009; Sander and Richard 2006).

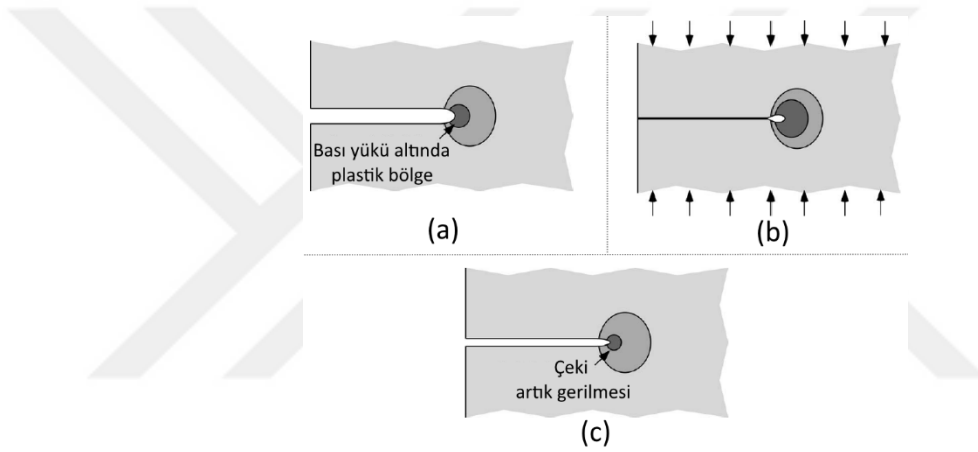


Şekil 2.24. Aşırı yükleme durumunda çatlak ilerleme davranışı (Schijve 2009)

Bununla birlikte, overload neticesinde gerçekleşen çatlak gecikmesi olayı farklı pek çok teori ile açıklanmaya çalışılmıştır (Skorupa 1999). Ancak bu teoriler içerisinde kuşkusuz ki en fazla kabul görenler, sonraki bölümlerde detaylı bir biçimde ele alınacak olan; çatlak ucu körleşmesi, çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluşması ve çatlak kapanma etkileridir (Bannantine 1990; Anderson 2005).

Yük etkileşimleri içerisinde; çeki aşırı yüklemesinin (OL) yanında bir diğer temel yükleme tipi bası aşırı yüklemesidir. Eğer SGY altında yorulmaya maruz kalan bir malzemeye, normal yükleme değerinin minimum değerinden daha düşük bir yük uygulanırsa, malzemenin çatlak ilerleme ömründe azalma meydana gelecektir. **Çatlak hızlanması (crack acceleration)** olarak adlandırılan bu durum Şekil 2.22’de 3 numaralı yükleme durumunda gösterilmiştir. Uygulanan bu yüke **bası aşırı yükü (Compressive Overload)** ya da **Yetersiz yükleme [YY]- Underload [UL]** adı verilmektedir. Ayrıca OL yüklemesini takiben UL yüklemesi yapılırsa, UL etkisi sonucunda çatlak gecikme miktarı da azalmaktadır (Şekil 2.22-4 numaralı yükleme). Ayrıca, yorulma çatlak ilerleme ömrü üzerinde OL durumu, UL durumundan çok daha etkilidir.

Çatlak hızlanmasına sebep olan bu durum, çatlak ucunda çeki artık gerilmelerinin oluşması teorisi ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu teoriye göre, bası aşırı yüklemesine maruz kalan bir malzemede çatlak ucunda çeki artık gerilmeleri oluşmakta ve oluşan bu gerilmeler ise küt şekilde bulunan çatlak ucunun keskinleşmesine (crack tip sharpening) sebep olmaktadır (Şekil 2.25). Bunun sonucunda ise SGY durumuna göre daha hızlı çatlak ilerlemesi olmaktadır (Anderson 2005). Literatürde bu mekanizma çatlak ucu körleşmesi/kütleşmesi ve yeniden keskinleşmesi (blunting and re-sharpening) olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 2.25. UL durumunda çatlak ucu çeki artık gerilmesi oluşumunun gösterimi
(a) UL olmaksızın, (b) UL uygulanması ve (c) çatlak ucu keskinleşmesi (Anderson 2005).

2.4. Değişken Genlikli Yükler Altında Yorulma Çatlak İlerlemesi Tahmin Metotları ve Modelleri

2.4.1. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi tahmin metotları

Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi kapsamında ele alınan yükleme tiplerinden olan çeki aşırı yüklemesi (OL), çatlak ilerleme ömrünü en fazla etkileyen yükleme tipidir. Bu sebeple, literatürde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu bu yükleme tipinin sebep olduğu ömür değişimini açıklamaya çalışmaktadır. OL'nin sebep olduğu çatlak gecikmesi olayını açıklamak üç temel teori/mekanizma öne

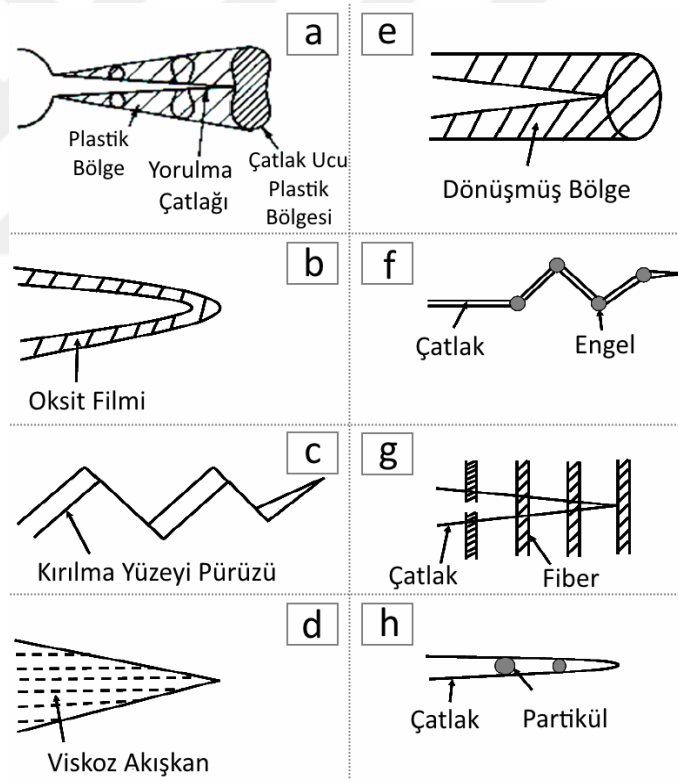
sürülmüştür. Bunlar: çatlak ucu körleşmesi, çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluşması ve çatlak kapanma etkileridir.

Çatlak ucu körleşme teorisinde, OL uygulanması sonucunda çatlak ucunun körleşeceği bu körleşme sonucunda ise çatlak ilerleme oranının azalacağını öne sürülmüştür. Bu teori daha öncede bahsedilen ertelenmiş çatlak gecikmesi (delayed retardation) olayını açıklayamamaktadır. Teoride öne sürülen fikre göre çatlak ucu OL uygulanır uygulanmaz körleşeceğinden, çatlak gecikmesi değeri hemen maksimum değere ulaşmalıdır. Ancak, maksimum çatlak gecikmesi, OL uygulandıktan sonra belirli bir çevrim sayısı sonunda gerçekleşmektedir.

Çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluşması teorisinde, OL uygulandığında çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşacağı ve bunun sonucunda ise çatlak ucundaki efektif gerilme değerinin düşeceği savunulmuştur. Fakat bu teori de çatlak ucu körleşmesi teorisine benzer şekilde ertelenmiş çatlak gecikmesi olayını açıklayamamaktadır.

Sabit genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi konusunda anlatıldığı üzere Elber tarafından ortaya konan çatlak kapanma teorisinde, çatlak gecikmesi ve hızlanması olaylarının çatlak kapanma etkileri sebebiyle oluştuğu görüşü öne sürülmektedir. Bu teoriye göre çatlak kapanma etkileri, efektif gerilme şiddet faktörü aralığı (ΔK_{eff}) ve çatlak açılma gerilmesi (σ_{op}) değerlerinin değişmesine sebep olmaktadır. Çatlak kapanma teorisi yük etkileşimi davranışının incelenmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, diğer teorilerden farklı olarak ertelenmiş çatlak gecikmesini de açıklamaktadır. Bu teoriye göre OL uygulandığında çatlak ucu plastik bölgesi elastik davranış gösteren kısım tarafından çevrelenmektedir ve bunun sonucunda çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan artık gerilmeler ise mevcut çatlağın açılması için gereken gerilme değeri üzerinde etkili değildir. Çatlak ilerlemeye başladığında ise bu artık gerilmeler çatlak yüzeyleri üzerinde etkindirler. Bunun sonucunda, artık gerilmeler sebebiyle çatlak ucunda etkin olan yükler azalır ve çatlak gecikmesi olur. Çatlak OL plastik bölgesi boyunca ilerlerken ise; çatlak ilerleme oranı minimum değerine ulaşınca kadar azalan bir çatlak ilerleme oranı gözlemlenir (Bannantine 1990).

Yukarıda bahsedilen üç temel mekanizma arasında en fazla kullanılan ve üzerinde en fazla çalışma yapılan teori çatlak kapanma etkileridir. Bu teori değişken genlikli yükleme durumunda oluşan yük etkileşimlerini başarılı bir şekilde açıkladığı için diğer teorilere göre daha fazla incelenmiştir. Elber'in plastisite ile oluşan çatlak kapanma teorisini açıklamasından sonra, çatlak kapanması olayında sadece plastisitenin değil farklı mekanizmalarında (mekanik, mikro yapısal, çevresel vs.) etkili olduğu görüşü öne sürülmüştür. Çatlak kapanması olayına sebep olduğu düşünülen bazı temel mekanizmalar Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Bu mekanizmalar özellikle tekil veya blok OL uygulanması sonrasında malzemelerde gözlemlenen çatlak gecikmesi olayını açıklamak için kullanılmaktadır.



Şekil 2.26. Çatlak kapanma mekanizmaları

(a) plastisite, (b) oksitlenme, (c) pürüzlülük, (d) akışkan, (e) faz dönüşümü, (f) çatlak sapması, (g) fiber bağlanması ve (h) partikül bağlanması ile oluşan çatlak kapanması (Lee 2009).

Oksitlenme ile oluşan çatlak kapanması mekanizması genellikle korozyon ortamlardan kaynaklanmaktadır. Bu mekanizmaya göre, oksit ve diğer korozyon ürünleri çatlak yüzeyleri arasına yerleşerek yüzeylerin sıkışmasına sebep olmaktadır. Bu teoriye göre,

oluşan oksit tabakası çatlak ilerlemesi için gerekli olan kuvveti azaltarak çatlak kapanmasına neden olur.

Pürüzlülük ile oluşan çatlak kapanması teorisine göre, çatlak yüzeyleri tekrarlı yükleme esnasında birbirleri ile eşleşemezler ve durumda normalde Mod I yükleri altında çalışan elemanlarda veya malzemelerde Mod II yükleme tipinin de oluşmasına sebep olur. Bunun sonucunda karışık mod'da çatlak ilerlemesi gözlemlenir ve çatlak kapanması olur. Bu olay özellikle çatlak ilerleme olayının başlangıç aşaması olan eşik değer bölgesinde etkilidir. Düşük yükleme oranlarında ve çatlak ilerleme eşik değer bölgesinde, iri taneli malzemelerde çatlak ilerleme oranının arttığı gözlemlenmiştir ve bu duruma sebep olan mekanizmanın pürüzlülük olduğu belirlenmiştir.

Viskoz akışkan ortamlarında gözlemlenen çatlak ilerlemesi olayında, çatlak yüzeyleri arasına giren akışkanın çatlak kapanmasına sebep olduğu öne sürülmüştür. Özellikle yağ gibi sıvılarla yapılan çatlak ilerlemesi deneylerinde akışkanın malzemede; oksitlenme ile çatlak kapanmasına, kırılganlığa ve hidrodinamik kapanma etkisine sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Faz dönüşümü ile oluşan çatlak kapanma olayında ise, deformasyon sebebiyle çatlak ucunda gerçekleşen faz dönüşümünün çatlak kapanmasına sebep olduğu öne sürülmüştür. Bu teoriye göre, dönüşüm neticesinde çatlak kapanması gözlenmekte ve çatlak ilerlemesinde gecikme gözlemlenmektedir. Faz dönüşümü ile gerçekleşen çatlak kapanması olayı test numunesinin ve yorulma çatlağının büyüklüğünden ve geometrik özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Anderson 2005; Lee 2009).

Şekil 2.26'da gösterilen diğer mekanizmalarla ilgili olarak; çatlak sapması, fiber bağlanması ve partikül bağlanma mekanizmaları özellikle kompozit malzemelerde çatlak gecikmesi ve çatlak kapanması olaylarını açıklamak için kullanılmaktadır.

Bu mekanizmaların yanı sıra, çatlak gecikmesi olayını açıklamak için kullanılan bir diğer mekanizma çatlak ucu sapması veya dallanmasıdır. Sünek malzemeler, OL

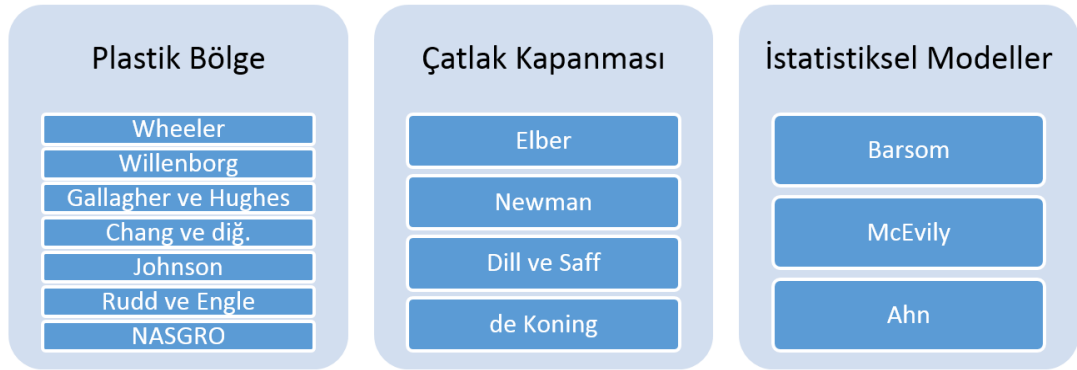
uygulanmasını takiben genellikle çatlak sapması, çatallanması veya dallanması davranışını gösterirler. Bu durum da çatlak gecikmesine sebep olmaktadır (Kelestemur and Chaki 2001).

2.4.2. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi tahmin modelleri

Değişken genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi olayı daha öncede bahsedildiği üzere sabit genlikli yükleme durumundan büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Yorulma çatlak ilerlemesi esnasında meydana gelen çatlak gecikmesi veya hızlanması olayları farklı teorilerle ve metotlarla açıklanmaya çalışılmış ve bu teoriler dikkate alınarak, çatlak ilerleme oranlarının hesaplanması için çeşitli tahmin modelleri ortaya konmuştur. Değişken genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi olayını analiz etmek için kullanılan modeller üç ana başlık altında toplanabilir (Bannantine 1990):

- **Çatlak ucu plastisite modelleri:** Bu modeller yük etkileşimleri sonucunda, çatlak ilerlemesindeki gecikmenin aşırı yükleme sırasında oluşan çatlak ucu plastik bölgesinden kaynaklandığını savunmaktadırlar.
- **Çatlak kapanması modelleri:** Bu modeller çatlak ilerlemesindeki gecikme veya hızlanmanın çatlak kapanma etkisi sonucunda oluştuğunu öne sürmektedirler.
- **İstatistiksel Modeller:** Bu modeller çatlak ilerleme oranının malzemenin yükleme geçmişi ile alakalı olan olasılık yoğunluğunu dikkate alarak çatlak ilerleme oranını gerilme şiddet faktörünün ortalama karekökü ile ilişkilendirmişlerdir.

Bu modellerin yanında plastik bölge ve çatlak kapanma teorilerinin birlikte kullanıldığı (Huang *et al.* 2005a) ve şekil değiştirme enerjisi yoğunluk faktörüne (Huang *et al.* 2005b) dayanan iki farklı model de öne sürülmüştür (Beden *et al.* 2009). Şekil 2.27’de, öne sürülen üç temel kavrama dayanan bazı tahmin modelleri gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Yorulma çatlak ilerlemesi analizinde kullanılan bazı temel tahmin modelleri.

Bir malzemenin değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerleme davranışını belirlemek için kullanılan en pratik yaklaşım; yük etkileşimlerini göz ardı edip çevrim başına çatlak ilerleme oranını dikkate alarak bilinen bir sabit genlikli çatlak ilerleme teorilerinden herhangi birini uygulamaktır. Fakat yükleme geçmişinin (aşırı yükler, rasgele yükler vs.) yorulma çatlak ilerlemesi üstündeki etkisi düşünüldüğünde bu yaklaşım geçerliliğini kaybetmektedir. Şekil 2.27’de hem bu yaklaşımın ele alındığı hem de spesifik özelliklerin ele alındığı çeşitli tahmin modelleri gösterilmiştir. Bu modeller, yorulma çatlak ilerlemesini açıklama noktasında birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajlar taşımaktadır ve günümüzde halen değişken genlikli yükler altında çatlak ilerleme mekanizmasını açıklayabilen veya hesaplayabilen universal bir model bulunmamaktadır (Beden *et al.* 2009). Bununla birlikte çoğu model çatlak gecikmesi ve yavaşlaması olayını açıklama noktasında yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple aşağıda, bu tahmin modellerinden en sık kullanılanlarından birkaçı açıklanmaya çalışılmış ve bu modellerin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

2.4.2.a. Wheeler modeli

Wheeler (Wheeler 1972), SGY verilerinin modifiye edilmesi ile OL etkisinin tahmin edilebileceğini öne sürmüştür. Bu amaçla Paris-Erdoğan (Denklem 2.25) eşitliğini, deneysel bir büyüklük olan gecikme parametresini (C_p) ekleyerek yeniden düzenlemiştir (Denklem 2.30 ve Denklem 2.31).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.30)$$

$$\frac{da}{dN_i} = (C_p)_i \left(\frac{da}{dN} \right)_{SGYi} \quad (2.31)$$

Burada, $(da/dN)_{SGYi}$ SGY durumunda herhangi bir i çevrim sayısındaki çatlak ilerleme oranı ve ΔK_i gerilme şiddet faktörü olmak üzere denklem genişletilirse,

$$\frac{da}{dN_i} = (C_p)_i [C(\Delta K_i)^m] \quad (2.32)$$

halini alır. Burada tanımlanan $(C_p)_i$ gecikme parametresi OL öncesindeki mevcut plastik bölge büyüklüğünün OL sonrasında oluşan plastik bölge büyüklüğüne oranının bir fonksiyonudur. Bu parametre Denklem 2.33’de tanımlanmıştır.

$$(C_p)_i = \left(\frac{r_{pi}}{a_p - a_i} \right)^p \quad (2.33)$$

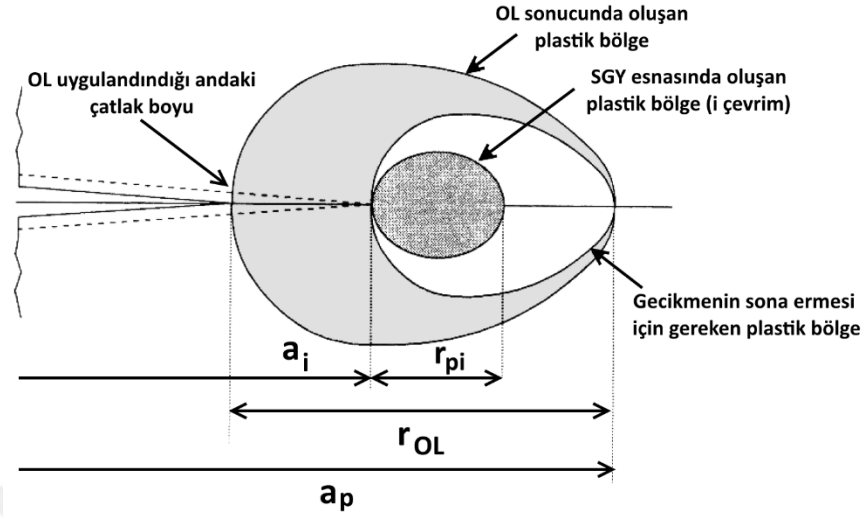
Burada;

r_{pi} = Herhangi bir i çevrim sayısındaki plastik bölge büyüklüğü,

a_p = OL öncesi ve sonrasındaki oluşan plastik bölge büyüklüklerinin toplamı,

a_i = Herhangi bir i çevrim sayısındaki çatlak uzunluğu,

p = Deneysel olarak elde edilen şekil faktörü olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca burada tanımlanan büyüklükler Şekil 2.28’de gösterilmiştir.



Şekil 2.28. Wheeler and Willenborg modellerinde tanımlanan plastik bölge büyüklükleri (Schijve 2001)

Bu modele göre çatlak gecikmesi miktarı; çatlakın OL sonucunda oluşan plastik bölge içerisinde ilerlemesi ile azalacaktır. Wheeler'e göre çatlak gecikmesi olayı; herhangi bir i çevrim sayısı sonucunda oluşan plastik bölge, OL sonucunda oluşan plastik bölgenin sınırları içerisinde kaldığı sürece devam edecektir ve tekrarlı yüklemekten dolayı oluşan plastik bölgenin sınırı OL plastik bölgesinin sınırına temas ettiği anda sona erecektir. Bu durum $(C_p)_i$ ile ilişkilendirilmektedir. Wheeler modelinde tanımlanan $(C_p)_i$ parametresi 0 ile 1 arasında değerler almaktadır ve tam temas anında $(C_p)_i = 1$ olmaktadır. $(C_p)_i = 1$ için denklem yeniden düzenlenirse;

$$a_i + r_{pi} \geq a_p \quad (2.34)$$

$$\frac{r_{pi}}{a_p - a_i} \geq 1 \quad (2.35)$$

olur. Bununla birlikte maksimum gecikme miktarı $(C_p)_i$ değeri 0'a yaklaştığında elde edilmektedir. Bu model kullanılarak çatlak ilerleme miktarı şu şekilde düzenlenebilir:

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r \left(\frac{da}{dN} \right)_i \quad (2.36)$$

Burada;

a_0 = Başlangıç çatlak uzunluğu,

a_i = Herhangi bir r çevrim sayısındaki çatlak uzunluğu,

$\left(\frac{da}{dN} \right)_i$ = Herhangi bir i çevrim sayısındaki çatlak ilerleme oranıdır.

Bu modelin dezavantajı $(C_p)_i$ hesaplamalarında kullanılan p değerinin deneysel belirlenmesidir. Bu değer test esnasında belirlenememektedir. Ayrıca, model ertelenmiş çatlak gecikmesi ve çatlak gecikmesine sebep olan maksimum negatif yükleri açıklayamaz (Bannantine 1990).

2.4.2.b. Willenborg modeli

Willenborg (Willenborg *et al.* 1971) öne sürdüğü teoride, çatlak gecikmesi olayının OL sonrasında çatlak ucunda bası artık gerilmeleri sebebiyle oluştuğunu ileri sürmüştür. Bu teoriye göre OL sonucunda oluşan plastik bölge, yükleme yapılan cismin elastik davranış gösteren kısımları tarafından çevrelendiğinden; çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşacaktır. Willenborg çatlak ucundaki bası artık gerilmelerinin etkisini dikkate alarak modeli oluşturmak için efektif gerilme ve gerilme şiddet faktörü yaklaşımını kullanmıştır. Bu modelin aşamaları şu şekildedir.

a- Toplam çatlak uzunluğunun belirlenmesi, a_p : Wheeler modeline benzer şekilde, toplam çatlak uzunluğu;

$$a_p = a_0 + r_{OL} \quad (2.37)$$

$$r_{OL} = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{K_{OL}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.38)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada; düzlem gerilme durumu için $\beta = 2$ ve düzlem şekil değiştirme durumu için $\beta = 6$ 'dır. Willenborg, Wheeler tarafından öne sürülen modele benzer şekilde çatlak gecikmesi olayının SGY plastik bölgesinin, OL plastik bölgesine temas etmesi halinde sonlanacağını öne sürmüştür.

b- Plastik bölge oluşumu için gereken gerilmenin belirlenmesi, $(\sigma_r)_i$: OL plastik bölgesine temas edecek olan SGY plastik bölgesinin oluşması için gereken gerilme değeri olarak tanımlanan $(\sigma_r)_i$ değeri aşağıdaki biçimde hesaplanmaktadır.

$$a_p = a_i + (r_r)_i \quad (2.39)$$

$$a_p = a_i + \frac{1}{\beta\pi} \left[\frac{(K_r)_i}{\sigma_y} \right]^2 \quad (2.40)$$

$$a_p = a_i + \frac{1}{\beta\pi} \left[\frac{f(g)(\sigma_r)_i \sqrt{\pi a_i}}{\sigma_y} \right]^2 \quad (2.41)$$

$$(\sigma_r)_i = \sqrt{\frac{(a_p - a_i)\beta}{a_i} \frac{\sigma_y}{f(g)}} \quad (2.42)$$

c- Bası artık gerilmelerinin belirlenmesi, $(\sigma_c)_i$: Çatlak ucunda oluşan bası artık gerilmesi: $(\sigma_r)_i$ ve herhangi bir i çevrimindeki maksimum gerilmenin $(\sigma_{max})_i$ farkına eşittir.

$$(\sigma_c)_i = (\sigma_r)_i - (\sigma_{max})_i \quad (2.43)$$

d- Efektif Gerilme değerinin hesaplanması, σ_i^e : Efektif gerilmelerin maksimum ve minimum değeri, bahsedilen bu değerlere $(\sigma_c)_i$ 'nin etkisi eklenerek bulunmaktadır.

$$(\sigma_{max}^e)_i = (\sigma_{max})_i - (\sigma_c)_i \quad (2.44)$$

$$(\sigma_{max}^e)_i = 2(\sigma_{max})_i - (\sigma_r)_i \quad (2.45)$$

$$(\sigma_{min}^e)_i = (\sigma_{max})_i + (\sigma_{max})_i - (\sigma_r)_i \quad (2.46)$$

Ayrıca, efektif gerilme değeri 0'dan küçük ise $\Delta\sigma_i^e$ değeri hesaplanmalıdır.

$$\Delta\sigma_i^e = (\sigma_{max}^e)_i - (\sigma_{min}^e)_i \quad (2.47)$$

e- Efektif gerilme şiddet faktörü ve gerilme oranının hesaplanması $(\Delta K_{eff})_i$ ve $(R_{eff})_i$:

$$(\Delta K_{eff})_i = \Delta\sigma_i^e \sqrt{\pi a_i} f(g) \quad (2.48)$$

$$(R_{eff})_i = \frac{(K_{min})_i^{eff}}{(K_{max})_i^{eff}} \quad (2.49)$$

Bu aşamadan sonra elde edilen efektif gerilme şiddet faktörü değeri; Paris-Erdoğan veya Forman tarafından önerilen eşitliklerde kullanılarak çatlak ilerleme davranışı belirlenebilir. Willenborg tarafından önerilen modelin, Paris-Erdoğan Eşitliği için düzenlenmiş hali Denklem 2.50'de verilmiştir.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})_i^m \quad (2.50)$$

Willenborg modelinin en büyük dezavantajı, Wheeler modeline benzer şekilde ertelenmiş çatlak gecikmesi olayını açıklayamamasıdır. Bu modele göre maksimum çatlak gecikmesi OL uygulanır uygulanmaz gerçekleşmektedir. Ayrıca bu model, OL sonrasında uygulanan UL'nin sebep olduğu çatlak hızlanması davranışını hesaplayamamaktadır. Wheeler ve Willenborg modelleri arasındaki fark; Willenborg modelinin sadece SGY verilerini kullanması ve bu sebeple şekil faktörü olarak adlandırılan sabiti kullanmamasıdır (Bannantine 1990).

2.4.2.c. Elber modeli

Elber çatlak kapanma teorisini temel alan bu modelde, mevcut bir çatlağı tamamen açmak için gerekli efektif gerilme şiddet faktörü değeri daha öncede belirtildiği üzere:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2.51)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Elber, bu kavramın yanında efektif gerilme şiddet faktörü oranı (U) olarak adlandırılan bir parametre tanımlamıştır.

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (2.52)$$

Bu parametreler de dikkate alınarak Paris-Erdoğan Eşitliği yeniden düzenlenirse, Denklem 2.53 elde edilir.

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K_{eff})^m \quad (2.53)$$

Denklemde verilen C_0 değeri efektif gerilme şiddet faktörü değeri ile uyum göstermek zorundadır. Ayrıca C ve m değerleri Paris-Erdoğan Eşitliği için malzeme sabitleri olmak üzere C_0 , Denklem 2.54'deki şekilde hesaplanır.

$$C_0 = \frac{C}{(U)^m} \quad (2.54)$$

2.4.2.d. Barsom modeli

Barsom (Barsom 1976) efektif gerilme şiddet faktörü aralığını, Denklem 2.55'te gösterildiği üzere, gerilme şiddet faktörünün ortalama karekökü (ΔK_{rms}) ile tanımlamıştır.

$$\Delta K_{rms} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \Delta K_i^2\right)} \quad (2.55)$$

Bu model ampiriktir ve yük etkileşim etkilerini hesaba katmaz. Barsom tarafından öne sürülen modelde hedef, hem sabit hem de değişken genlikli yükleri tanımlayabilen tek bir gerilme şiddet faktörü parametresi elde etmektir. Bu yaklaşımla, değişken genlikli yük spektrumu Rayleigh olasılık yoğunluk eğrisi veya lognormal fonksiyon gibi sürekli bir dağılım fonksiyonu olarak tanımlanmalıdır. Bu şartlar sağlandığı takdirde, yorulma çatlak ilerleme oranı:

$$\frac{da}{dN} = A_B (\Delta K_{rms})^{mB} \quad (2.56)$$

şeklinde tanımlanır. Burada A_B ve mB sabitler olmak üzere efektif gerilme şiddet faktörü aralığının ortalama karekökü Denklem 2.57'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\Delta K_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^k \Delta K_2^1}{n}} \quad (2.57)$$

Burada, ΔK_{rms} parametresi, yük spektrumundaki her bir çevrimin kendine özgü ortalama karekökünü ifade eder. Bu metot A_B ve mB sabitleri eğri uydurma yöntemi ile

kolaylıkla hesaplanabildiği için oldukça kullanışlıdır. Ancak, yük etkileşim etkileri dikkate alınmadığından dolayı ortalama çatlak ilerleme oranının hesaplanmasına olanak sağlar. Diğer bir deyişle DGY dağılımından elde edilen verilerle eşdeğer bir sabit yük belirlenir. Bu sebeple, önerilen model kullanıldığında en iyi tahminler ancak birbirine yakın olan rasgele yüklerin seçilmesi ile yapılabilir (Beden *et al.* 2009).

2.5. Yüzey İşlemleri

Gelişen teknolojiye paralel olarak mühendislik malzemelerinden beklenen performansta gün geçtikçe artmaktadır. Ancak, bu performans artışını karşılayacak malzemelerin üretimi ve kullanımı çok yüksek maliyetleri de beraberinde getirmektedir. Mühendislik yapıları ve elemanları; üzerlerine gelen yükleri büyük oranda yapısal özellikleriyle, aşınma, yorulma ve korozyon gibi hasarları ise yüzey özellikleri ile karşılarlar. Dolayısıyla yüzey özelliklerinin önemli olduğu yerlerde sadece yüzeye ait özellikleri iyileştirmek hem maliyet hem de zaman açısından büyük tasarruf sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak yüzey mühendisliği ve yüzey işlemleri terimleri ortaya çıkmıştır.

Son yıllarda yüzey mühendisliğindeki gelişmeler, değişik yüzey modifikasyon metotlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Günümüzde kullanılan yüzey modifikasyon teknikleri, yüzey sertliği, aşınma direnci ve yorulma dayanımını artırmak amacıyla kullanılır. Yüzey sertleştirme işlemleri, ana malzemenin sertliğini değiştirmeksizin parçaların yüzeyden içeriye doğru sertleştirilerek yorulma ve aşınma dirençlerini artırmada kullanılırlar. Birçok makine parçasında yorulma ve aşınmaya karşı çok sert bir yüzey istenirken, aynı zamanda da çalışma esnasında çarpmaya karşı mukavemetli olması zorunludur. Malzemenin merkeze yakın kısmının yumuşak ve tok olması parçanın bütün olarak yüksek darbe direnci göstermesini sağlar. Yüzey sertleştirme esnasında oluşan bası gerilmesi artışı ile malzemelerin yorulma mukavemetleri de artmaktadır. Bu işlemin bir avantajı da, daha ucuz olan düşük ve orta karbonlu çeliklerde kalın kısımların sertleştirilmesi esnasında ortaya çıkan çatlama ve distorsiyon problemi olmamasıdır. Yüzey sertleştirme işlemlerinde yeni bir tabaka ilavesi veya inşasını içeren metotlar ve parça boyutunda herhangi bir değişiklik veya tabaka ilavesi

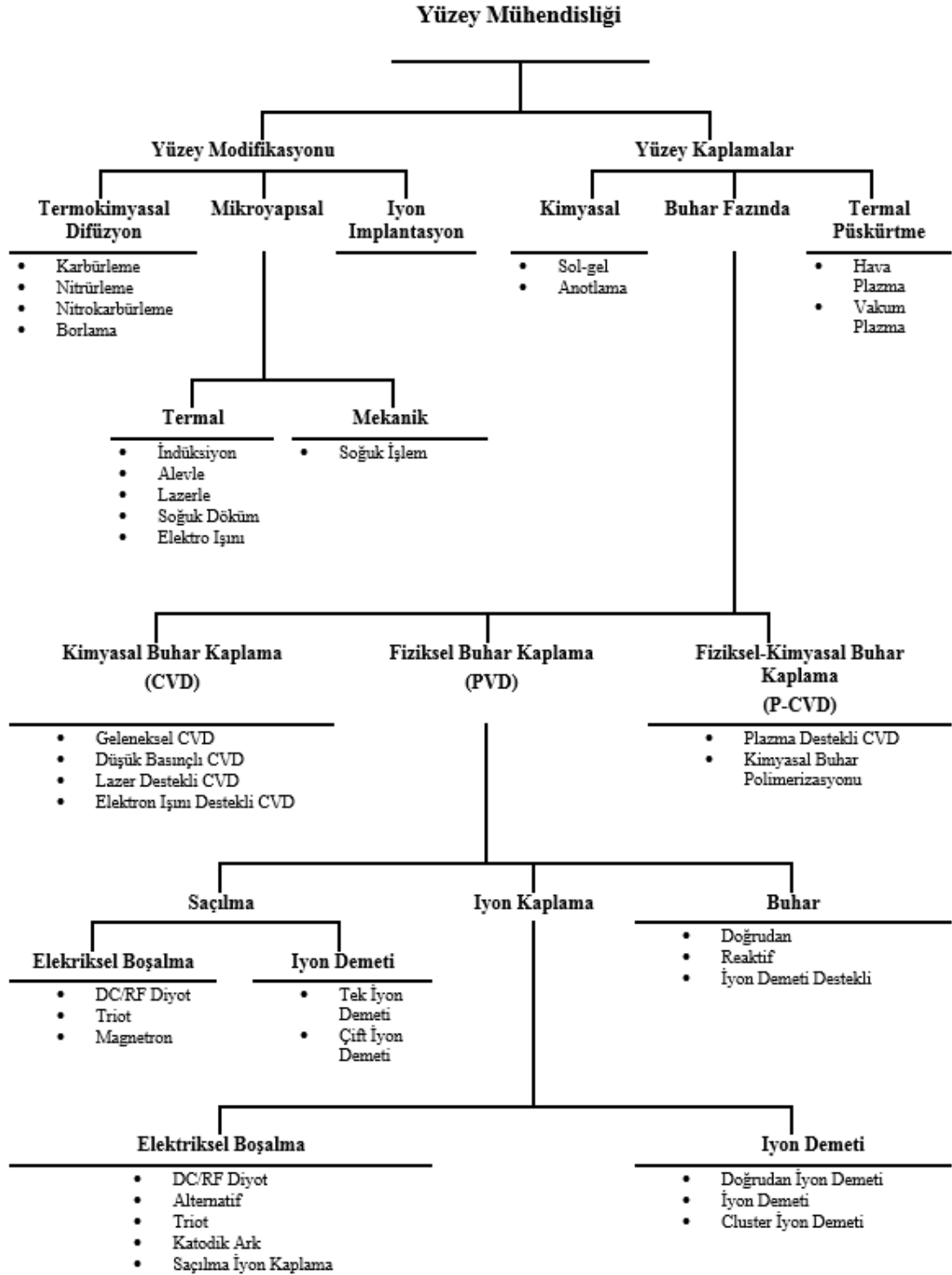
olmaksızın malzemelerin yüzey ve yüzey altı modifikasyonunu içeren metotlar olmak üzere iki farklı yaklaşım vardır (Yetim 2009).

İnce film kaplamalar, kaplamalar ve kaynaklı üst yapılar; birinci grup olan yüzey modifikasyon metotlarını oluşturmaktadır. Bu metotlarda amaç malzeme yüzeyinde tamamen kaplama yapılan malzemeden bağımsız ya da çok az kaplama yapılan malzemeden içeren ve yeterli bağlanma derecesine sahip olan bir tabaka oluşturarak yüzey özelliklerinin iyileştirilmesidir.

Yüzeyde tabaka oluşturmaksızın modifikasyonu içeren difüzyon yöntemleri ve seçimli sertleştirme teknikleri ise yüzey altı modifikasyon tekniklerini oluşturmaktadır. Difüzyon esasına dayanan bu yöntemlerde, malzemelere yüzeylerinden iç kısımlarına doğru azalan yönde istenilen özelliklerin kazandırılması amaçlanmaktadır. Seçimli sertleştirme, genellikle sadece ısıtma ve su vermeyi içeren dönüşüm sertleştirilmesini içine alırken, bazı seçimli sertleştirme metotlarında (seçimli nitrürleme, iyon implantasyon, iyon ışın karışımı) ise bunun aksine yüzeyde kompozisyonel bir modifikasyon söz konusudur. Çizelge 2.1’de yüzey işlemlerinin bir sınıflandırması yapılmıştır.

Malzeme yüzeyinin sert, yorulma ve aşınmaya dayanıklı, alt tabakanın ise sünek ve yeterli mukavemette olması istenildiğinde karbürleme, nitrürleme, alev veya indüksiyonla yüzey sertleştirme, lazerle yüzey sertleştirme, plazma nitrürleme, plazma esaslı fiziksel buhar depolama (PVD) ve kimyasal buhar depolama (CVD) yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel yüzey modifikasyon tekniklerinin büyük bir kısmı katı, sıvı ve gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Ancak son yıllarda genellikle elektriksel boşalma şartları altında gerçekleştirilen plazma destekli yüzey işlemleri endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemler; C, N ve B gibi arayer atomlarının plazma ortamında malzeme yüzeyinden difüze edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede malzemelerin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerindeki özelliklerin değişmesi ile aşınma, yorulma ve korozyon dirençleri artırılmaktadır (Yetim 2009).

Çizelge 2.1. Yüzey mühendisliğinde uygulanan metotlar (Alsaran 2001)

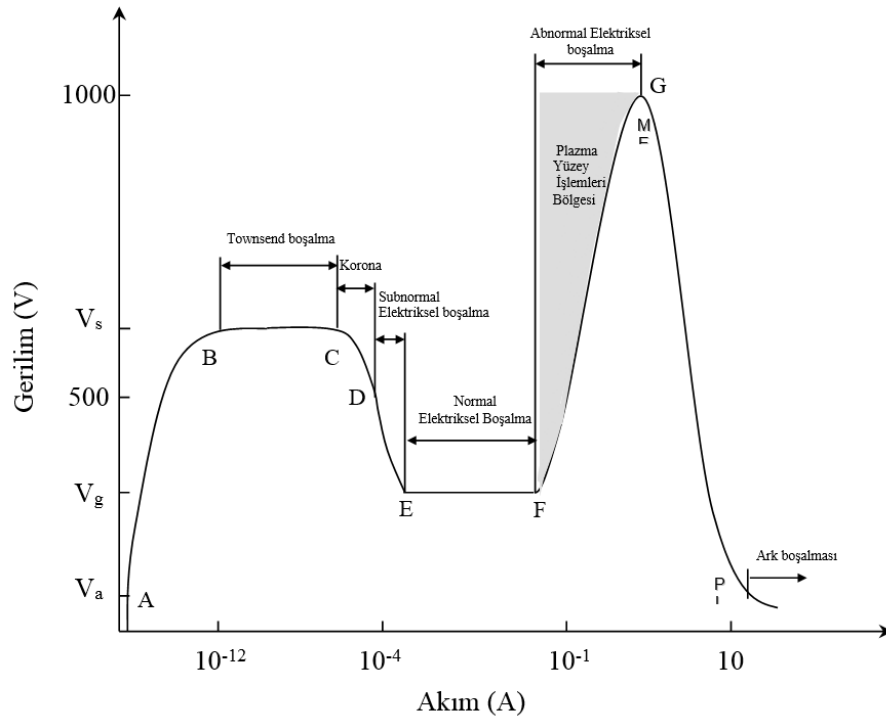


2.5.1. Plazma durumu ve elde edilmesi

Maddenin kendine has özellikleri olan katı, sıvı, gaz ve plazma hali olmak üzere 4 hali vardır. Bu haller arasındaki asıl fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin herhangi bir konumundaki enerjisini değiştirmek sureti ile maddeyi diğer konuma geçirmek mümkündür. Örneğin katı haldeki bir maddeye, bu maddeye ait özel bir enerji vererek sıvı, sıvı hale enerji vererek gaz ve gaz hale de belirli bir enerji vererek plazma haline geçmek mümkündür. Bu işlemin tersi de yapılarak yani verilen bu enerjileri geri alarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçmek mümkündür.

- Katı + $E_1 \Leftrightarrow$ Sıvı (Ergime)
- Sıvı + $E_2 \Leftrightarrow$ Gaz (Buharlaşma)
- Gaz + $E_3 \Leftrightarrow$ Plazma (İyonize olma)

Enerjinin yoğunlaşmış hali olarak tanımlanan plazma; iyon, elektron, foton, nötral atom ve uyarılmış atom gibi yüklü parçacıklardan oluşan bir karışımdır. Bir malzemenin plazma hali, gaz atom ve moleküllerinin iyonizasyonu ile gerçekleştirilir. Plazma elde etme yöntemlerinin en yaygın olanı elektrik boşalması yöntemidir. Şayet termal yöntemle plazma elde edilmek istendiğinde malzemeye verilecek enerji çok yüksek iken, elektriksel boşalma ile plazma elde etmek oldukça kolaydır. Elektriksel boşalma mekanizmasında, bir elektrik gerilim kaynağı, gaz içinde bulunan iki iletken plaka içerisine bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise bu iki plaka arasından bir elektrik akımı akar. Buradan akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan elektrik boşalma sistemleri sınıflandırılır. Şekil 2.29 çeşitli gaz boşalma tiplerinin voltaj-akım karakteristiğini gösterir. Plazma termokimyasal işlemler voltaj-akım ilişkisinin tek değerli fonksiyon olduğu yer olan, abnormal boşalma bölgesinde oluşur (Yetim 2009).



Şekil 2.29. Farklı boşalma tiplerinin gerilim-akım karakteristiği (Edenhofer 1974a; Yetim 2009)

Sisteme potansiyel fark uygulandığı zaman gazın molekül ve atomları uyarılır ve iyonize olur. Böylece elektriksel boşalma denilen parıltılı olay meydana gelir. Bu yöntemin en büyük avantajı, gazın pozitif iyonlarının negatif uca bağlanmış taban malzemeye doğru hızlanarak yüksek bir kinetik enerji ile yüzeye çarpması ve ortaya çıkan enerji ile taban malzemenin ısınmasıdır. Böylelikle ek bir ısıtma tertibatına gerek kalmaz. Şekil 2.29’da akımın çok düşük olduğu bölgeler bizim ilgilimiz dışındadır. Endüstride kullanılan (floresan lambalar) elektriksel boşalma, düşük enerjilerde ve zayıf akımlarda kendilerini idame ettirirler (yani normal, stabil ve düşük akımlı elektriksel boşalma bölgesinde, EF). Bununla birlikte iyon nitrürleme işlemi yüksek güç ve anormal, instabil ve yoğun akımlı elektriksel boşalma bölgesinde olur. Burada dikkat edilmesi gereken şey, uygulanan gücün G noktasını aşmayacak şekilde uygulanmasıdır. G noktası aşıldığında ark boşalması oluşmakta ve malzeme hasar meydana getirmektedir (Edenhofer 1974a; Yetim 2009).

2.5.2. Plazma ile nitrürleme

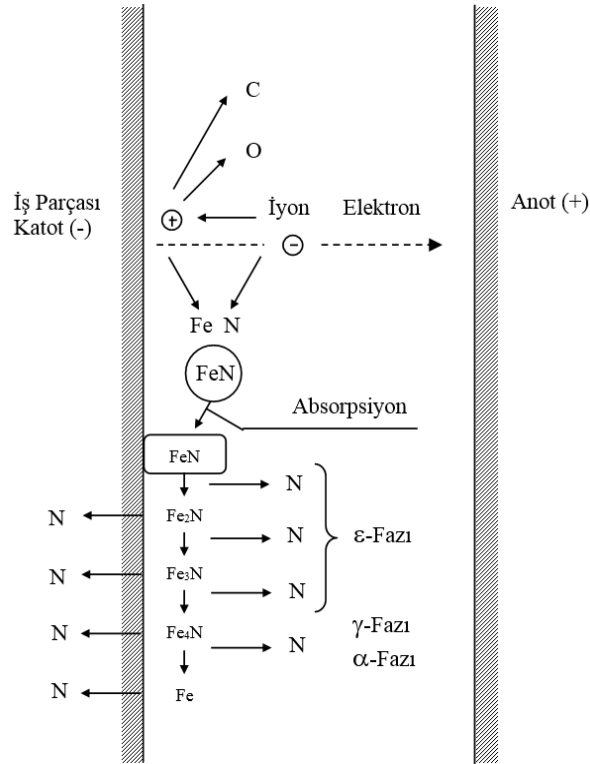
Plazma ile yapılan termokimyasal işlemler; plazma ile nitrürleme, karbürleme, borlama ve nitrokarbürleme işlemleridir. Nitrürleme, malzeme yüzeyine azot girişini içine alan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu nedenle nitrürleme ile yüzey kompozisyonunun değiştirilmesi karbülemeye benzemesine rağmen azot, yüzeye ostenitik sıcaklık yerine ferritik şartlarda ilave olunur. Yüzey sertliği ve sertleşme derinliği öncelikle işlem zamanına, sıcaklığa, gaz karışımına ve demir esaslı malzemenin alaşım içeriğine bağlıdır. Bu işlem düşük sıcaklık nedeniyle minimum distorsiyon ve mükemmel boyutsal kontrolle yapılabilir. Azot demir içinde yayılarak nitrürler oluşturur. Nitrürler, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük parçacıklar halinde yapıya dağılmıştır. Yapıyı sertleştiren bu nitrürlerdir. Nitrürleme, termokimyasal bir işlem olup genellikle atomik azotun ferrit fazına geçişini kapsamakta ve sonuç olarak oda sıcaklığına yapılan soğuma sırasında herhangi bir faz dönüşümünün oluşması söz konusu olmamaktadır.

Temel olarak tuz banyosu, gaz ve toz nitrürleme olmak üzere üç nitrürleme yöntemi vardır. Endüstride gaz nitrürleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlemde 500-590°C arasında ısıtılan taban malzeme üzerine atomik azotun yayılmasını sağlamak için amonyak gazı çözünür. Çözünen amonyak, taban malzeme üzerinde nitrürler oluşturmak için Al, Cr gibi alaşım elemanlarıyla reaksiyona girer. Nitrürleme sonrası ϵ (HSP) ve γ (YMK) fazlarını içeren kırılğan beyaz tabaka oluşma eğilimindedir. Bu iki fazın farklı kafes yapıları içermesi yüksek iç gerilmeler doğurur ve mikro çatlakların bu bölgelerde oluşmasına sebep olur (Edenhofer 1974b). İlk olarak 1930 yılında İsviçreli mühendis Bernard Berghaus tarafından patenti alınmış olan plazma ile nitrürleme yöntemi, bilinen nitrürleme yöntemlerine göre işlem süresinin kısa olması, düşük sıcaklıklarda nitrürleme yapılabilmesi, meydana gelen yapıların kontrolü gibi birçok avantaja sahip olması nedeniyle endüstrinin ilgisini çekmiştir. Plazma ile nitrürleme yöntemi elektriksel boşalma (glow discharge) şartlarında oluşur. Bu yöntemde, malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. İşlem teorik olarak, elektriksel bakımdan iletken malzeme yüzeyine N arayer

atomunun yayınma işlemidir. Plazma ile nitrürleme işlemi N_2 , H_2 , Ar ve NH_3 gaz ortamında gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek malzemenin Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elemanlarını içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. Plazma ile nitrürleme işlemi sonrası en dışta beyaz tabaka ve onun altında da difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşur (Yetim 2009; Yıldız 2009).

2.5.2.a. Plazma ile nitrürleme işleminin mekanizması

Elektriksel boşalma şartları altında azot gazı iyonize olur. Azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenir ve katoda bağlı iş parçasını bombardımana uğratar. Yüzeye çarpan iyonlar, yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açar. Bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elemanları, metalik olmayan element atomları (karbon, oksijen, azot) ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır (saçılma). Yüzeye çarpan iyonların ancak çok az bir kısmı iş parçasına yayınır (doğrudan implantasyon). Bu iyonların büyük bir kısmı saçılma olayını sağlar. Saçılan demir atomları ile yüksek enerjili azot atomları, yüzey dolayında FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikir (yoğunlaşma). FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır ve kararlı diğer nitrürlere (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N) dönüşür (Şekil 2.30). Dönüşme sırasında serbest kalan azot atomları ya metale yayınır ya da plazmaya döner (kimyasal absorpsiyon). Saçılma ve yoğunlaşma işlemleri büyük ölçüde kullanılan gaza bağlıdır. Ayrıca basınç ve gerilim gibi diğer parametrelerin değiştirilmesiyle de etkilenir (Edenhofer 1974a).



Şekil 2.30. Plazma ile nitrürleme işleminin mekanizması (Edenhofer 1974a).

2.5.2.b. Plazma ile nitrürleme sonrası oluşan içyapılar

Sıcaklık, zaman ve gaz karışım oranı gibi parametrelerin değişimiyle iyon nitrürleme sonrası aşağıdaki yapılar meydana gelir (Edenhofer 1974b).

Beyaz Tabaka: En dışta nital çözeltisi ile kimyasal dağlama işleminden etkilenmeyen, çok ince demir nitrürler içeren bir tabakadır. Dağlama işleminden etkilenmediğinden beyaz tabaka olarak adlandırılmıştır. Süneklik, aşınma, sürtünme direnci gibi özellikler için yapılan çalışmalarda, oluşan beyaz tabakanın yararlılığının, nitrit yapısının homojenliğine ve tabakanın kalınlığına bağlı olduğu görülmüştür. Beyaz tabaka olarak, sadece ϵ (HSP) veya γ (YMK) nitritlerinden biri oluşuyorsa mekanik özelliklerin daha iyi olduğu görülmüştür. Çok fazlı beyaz tabaka ϵ ve γ birleşimi olup heterojen bir karışımdır. Farklı kafes yapılarından dolayı geçiş bölgelerinde iç gerilmeler oluşur. Bu durumda çok az bir kuvvet uygulanması halinde bile mikroçatlaklar oluşabilir. Ayrıca

tabaka kalınlığı artıkça sünekliğinin düştüğü bilinmektedir. Bu iki faktöre bağılı olarak optimum özellikler, tek fazlı ve minimum kalınlıklı beyaz tabakada elde edilir.

Difüzyon tabakası: Beyaz tabakanın altında, sertliği ve azot yoğunluğu az olan bölgedir. Yüzeyden malzemenin içine doğru bir geçiş sağlar. Difüzyon bölgesinde, metal nitrürlerin çökmesi, azotla α -fazının doyması, artık gerilmelerin dağılımı, karbonun yeniden dağılımı ve tane sınırı fazının oluşumu gibi birkaç olay meydana gelir. Difüzyon bölgesinde malzemenin yapısında bulunan Cr, Al, Mo, Mn gibi alaşımlı elementleri ile azot birleşerek sertleşme işlemini gerçekleştirir (Karadeniz 1990).

2.5.3. Yüzey kaplamalar

Yüzey özelliklerini iyileştirmek için birçok kaplama tekniğı ve yüzey işlemi ortaya çıkmıştır. Tribolojik kaplamaların geçmiş yıllarda hızlı bir şekilde gelişimi, büyük oranda daha önce elde edilmemiş olan özellikleri sağlayabilen yeni kaplama yöntemlerinin geliştirilmesine bağılıdır. Bu özellikler morfoloji, bileşim, yapı ve adezyonu içerir. Kaplama tekniğı ya da yüzey işleminin seçiminde, taban malzemenin şekli, boyutu ve metalurjisi, kaplama malzemesinin istenen yapıda oluşturulabilmesi, kaplama malzemesinin uygulanan tekniğe uyumu, arzu edilen adezyon seviyesi, kaplama cihazının kullanışlılığı ve maliyet gibi hususlar dikkate alınır.

Yüzey kaplamalar kimyasal kaplamalar, buhar fazında yapılan kaplamalar ve termal püskürtme kaplamalar olarak üç ana gruba ayrılır. Kimyasal kaplama işleminde uygun bir solüsyon içerisinde kaplama işlemi ya anorganik polimer reaksiyonları ile ya da elektrik akımı vasıtasıyla gerçekleştirilir. Buhar fazında yapılan kaplama işlemi ise, kaplama malzemesinin çeşitli kaynaklar kullanılarak buhar fazına getirilmesi ve daha sonra taban malzemesi üzerine biriktirilmesini kapsar. Termal püskürtmede kaplama malzemesi taban malzemesinden uzak bir mesafede eritilir ve çok ince partiküller halinde püskürtülür. Taban malzemesi bir dereceye kadar soğutulur ve kaplama yüzeyine vuran tanelerin katılaşmasıyla kaplama gerçekleştirilir (Yetim 2009).

2.5.3.a. Buhar fazı prosesleri ve fiziksel buhar kaplama

Buhar fazında gerçekleştirilen kaplama proseslerinde, buhar partiküllerinin kinetik enerjisinden faydalanılarak işlem gerçekleştirilir ve bu enerji kaplamanın morfolojisini, adezyonunu ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Temel olarak, kimyasal buhar kaplama (CVD), fiziksel buhar kaplama (PVD) ve plazma destekli kimyasal buhar kaplama (PACVD) teknikleri olmak üzere üç tip buhar fazında kaplama prosesi vardır. Fiziksel buharlaştırma tekniği esas olarak vakum altında bulunan malzemenin buharlaştırma veya saçılma ile atomların yüzeyden koparılması ve kaplanacak taban malzeme yüzeyine atomik veya iyonik olarak çöktürülmesidir. PVD tekniği yüksek vakum altında (10^{-6} -10 Pa) buharın yoğunlaştırılmasıyla meydana getirilir. Kaplama sıcaklığı genellikle 500°C'nin altındadır ve kaplamanın difüzyonu kaplanan malzemenin kinetik enerjisine ve yüzey temizliğine bağlıdır. PVD proseslerinin temel prensipleri şunlardır:

- **Buharlaştırma prosesi**

Vakum kaplama tekniklerinden bilinen en eski ve en yaygın kullanım alanı bulan prostestir. Teorik olarak nemli havada oluşan çığ yoğunlaşmasından farkı yoktur. Buharlaştırma proseslerinde kaplama malzemesi, vakum ortamında (10^{-6} -1 Pa) kaynak malzemeyi belirli bir sıcaklığa (1000-2000°C) getirmekle oluşturulur. Kaplama malzemesi elektrik olarak nötr durumdadır. Kaynak ile taban malzemesi arasında 150-450 mm'lik bir mesafe vardır (Bhushan and Gupta 1991). Buharlaşma için gerekli olan sıcaklık direnç, indüksiyon, elektron demeti gibi birçok yöntemle sağlanır. Yüksek maliyet ve karmaşıklığa rağmen elektron demeti ısıtma günümüzde kullanılan en popüler metottur. Diğer vakum kaplama sistemleri ile karşılaştırıldığında, buharlaştırma işleminin en büyük avantajı, daha ucuz, basit ve yüksek kaplama hızına sahip olmasıdır. Buharlaştırma proseslerinin dezavantajı ise, buhar partiküllerinin düşük kinetik enerjileri nedeniyle kaplama adezyonunun düşük olmasıdır.

- **İyon kaplama prosesi**

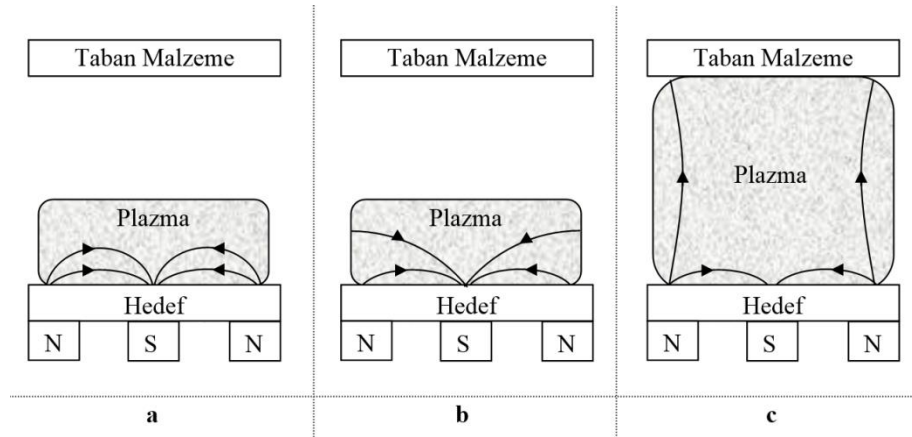
İyon kaplama, bir vakum kaplama işlemi olup kaplama malzemesinin iyon şeklinde taban malzemeye çökmesi sonucu elde edilir. Esasında, buharlaştırma ile sıçratma (sputtering) prosesinin karışımıdır. Yaklaşık olarak 10^{-2} torr'luk basınçta genellikle argon gazı atmosferinde gerçekleştirilir. Bu yöntemde kaplama malzemesi, iyon biçiminde taban malzeme yüzeyine çarpar. Malzeme tutucu katot olarak bağlanır. Anot ise filament ya da rezistans ısıtmalı bir buharlaştırma kaynağıdır. Taban malzemeye 2-5 kV arasında değişen bir gerilim uygulanır. Böylece filament ile taban malzeme arasında bir elektriksel boşalma oluşur. İyon kaplama işleminden önce taban malzeme, yüzeyde bulunabilecek kirlilikleri ve oksitleri gidermek amacıyla bir inert gaz ile iyon bombardımanına tabii tutulur. Bu işlem bittikten sonra, iyon bombardımanını kesmeden kaplama işlemine başlanılır. Kaplamanın oluşabilmesi için kaplama hızının püskürtme hızını geçmesi gerekir.

- **Saçılma prosesi**

Saçılma, enerjik partiküller tarafından hedef yüzeyin bombardıman edilmesi ile momentum değişimine bağlı olarak, kaplama malzemesinin katı yüzeyden çıkarılıp püskürtüldüğü bir prosestir (Bhushan and Gupta 1991).Yüksek enerjili partiküller, ya yoğun inert veya reaktif gaz ya da kaplama malzemesi türlerinin pozitif iyonlarıdır. Saçılan malzeme, hedef olarak adlandırılan kaplama malzemesi kaynağından atomik halde püskürtülür. Taban malzemesi, püskürtülen atomların akışını engellemek için hedef önüne yerleştirilir. Saçılma momentum değişimi esasen, yüzeyin sadece 1 nm altını kapsayan bölgede meydana gelir. Saçılma prosesleri, dış bir iyon kaynağından elde edilen iyon demeti saçılma ve elektriksel boşalma olmak üzere ikiye ayrılır. İyon demeti saçılma prosesinde, iyon bombardıman kaynağı, hedeften kaplama malzemesini koparıp uzaklaştırmak için kullanılan ve dış kısımda bulunan bir iyonizasyon kaynağıdır. İyon demeti inert veya reaktif gaz iyonları ya da kaplama malzemesinin iyonlaşmış formları olabilir. İyon demeti saçılmasında bombardıman edilen iyonların akımı, yoğunluğu ve kinetik enerjileri bağımsız olarak kontrol edilebilir.

Elektriksel boşalma proseslerinde, hedef adı verilen kaplama malzemesi 10^{-5} - 10^{-3} Pa'a kadar vakum edilmiş ve daha sonra argon gibi bir inert gazla plazma boşalması sağlamak için yeterli basınca ($5 \cdot 10^{-1}$ -10 Pa) yeniden getirilmiş bir vakum odasına yerleştirilir. Daha sonra hedef, plazmadan gelen pozitif iyonlar tarafından bombardıman edilmesi için negatif bir gerilime (bias) tabii tutulur. Bu gerilim tarafından hızlandırılan iyonlar hedefe çarparlar ve hedef malzemeden bir fırlatma saçılmasına sebebiyet verirler. Elektriksel boşalma proseslerinde hedef akım yoğunluğu, gerilim ve çalışma basıncının değiştirilmesi hariç bağımsız olarak kontrol edilemez. Saçılma prosesleri; diyet saçılma, triod saçılma, RF saçılma ve magnetron saçılma prosesi olmak üzere 4 gruba ayrılır.

Magnetron Saçılma: Temel saçılma işlemlerinde, bir hedef (katot) levha, hedefin ön tarafına yerleştirilen elektriksel boşalma oluşturan enerjik iyonlar tarafından bombardıman edilir. Bombardıman işlemi, ince bir film gibi bir taban malzeme üzerine yoğunlaşabilen hedef atomların saçılmasına sebep olur. İkincil elektronlar da iyon bombardımanının bir sonucu olarak hedef yüzeyinden yayılır. Bu elektronlar plazmanın devam etmesinde önemli rol oynarlar. Bu basit saçılma işlemi uzun yıllardır bilinir ve çoğu malzeme bu yöntemle başarılı bir şekilde kaplanır. Fakat düşük çökeltme hızı, plazmada düşük iyonizasyon verimi ve taban malzemede yüksek ısınma nedeniyle bu işlemin kullanımı sınırlanmıştır. Bu sınırlamalar magnetron saçılması gibi yöntemlerle giderilmeye çalışılmaktadır. Hedef yüzeyine paralel olarak yerleştirilen ve bir manyetik alan oluşturan magnetronlar, ikincil elektron hareketinin hedef civarında olmasına zorlar. Magnetronlar, bir kutbu hedef merkez eksenine, diğer kutbu ise hedefin dış kenarına bir bilezik magnet olarak yerleştirilerek düzenlenmişlerdir. Bu yöntemle elektronların odaklanması ve elektron-atom çarpışması ile oluşan iyonizasyon ihtimali artar. Bir magnetronun artan iyonizasyon verimi, hedef bölgesinde yoğun bir plazmanın oluşmasını sağlar. Bu durum hedefte artan iyon bombardımana ve daha yüksek saçılma hızına ve böylece taban malzemeye doğru daha yüksek çökeltme hızına neden olur. Farklı magnetron düzenleri arasında elde edilen plazma kapanmaları arasındaki kıyaslama Şekil 2.31'de verilmiştir.



Şekil 2.31. Farklı magnetronlar kullanılarak elde edilen plazma bölgeleri (a) Geleneksel (b) Unbalance (Tip 1), (c) Unbalance (Tip 2) (Yetim 2009).

2.5.4. Elmas benzeri karbon (Diamond Like Carbon-DLC)

Karbon genellikle kristal yapılı olan grafit, elmas ve florin şeklinde bulunmaktadır ve bu üç yapı karbon atomlarının bağlanma şekillerinin farklı olması sebebiyle birbirinden farklı özellikler sergilemektedir. Yapısında grafitteki baskın bağ olan sp^2 ve aynı zamanda elmastaki baskın bağ olan sp^3 ile bağlı karbon içeren amorf yapıdaki karbon şekline **elmas benzeri karbon-diamond like carbon (DLC)** adı verilmiştir. Farklı bağ yapılarını bir arada bulundurdıklarından dolayı DLC filmler elmas, grafit ve hidrokarbon polimerlerin özelliklerine sahip olabilmektedirler (Erdemir *et al.* 2000; Erdemir and Donnet 2006).

Elmas benzeri yapılar iki sınıfa ayrılır: Elmas Benzeri Hidrokarbonlar ($a-C:H$) ve Elmas Benzeri Karbonlardır ($a-C$). Elmas benzeri hidrokarbonların yapısında H bulunmaktadır ve elmas benzeri özelliklerin elde edilmesinde hidrojen önemli bir rol oynamaktadır. Elmas Benzeri Karbonlar ($a-C$) çok az hidrojen içeren veya içermeyen yapılardır (Venables 1990). DLC yapılar, özellikle yapılarında bulunan yüksek sp^3 oranından dolayı yüksek sertlik (10-30 GPa), düşük sürtünme katsayısı, yüksek termal ve kimyasal kararlılığa sahiptirler. DLC filmler bu özelliklerinden dolayı aşınma, yorulma ve korozyon dayanımının artırılması amacıyla kesici takımlar, makine elemanları, optik ürünler, manyetik kayıt diskleri, otomobil parçaları, mikro-elektromekanik (MEMs)

sistemler ve biyomedikal uygulamalarda vazgeçilmez bir kaplama haline gelmişlerdir (Grill and Patel 1993; Robertson 2002; Hauert 2004; Morita *et al.* 2012). Yarı karalı bir malzeme olan DLC'nin, herhangi bir malzeme yüzeyine kaplanması için yüksek enerjili iyonlarla film yüzeyinin sürekli bombardımanı gerekmektedir. Bu sebepten dolayı da DLC filmlerin oluşturulmasında ve malzeme yüzeyine kaplanmasında Fiziksel Buhar Kaplama (PVD) yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, son yıllarda bir fiziksel buhar kaplama tekniği olan magnetron saçılma tekniği ile DLC filmlerin kaplanması sıklıkla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir.

2.5.5. Dupleks yüzey işlemi

Dupleks yüzey işlemleri, uygulanan tek bir yüzey işleminin tek başına yeterli olmadığı durumlarda ön bir yüzey sertleştirme işlemi ve bunu takiben gerçekleştirilen ince film kaplama işleminin birleşimi olarak tanımlanmaktadır (Alsaran *et al.* 2005; Yetim *et al.* 2010). Dupleks yüzey işlemleri:

- Uygulanan yükün taban malzemenin plastik deformasyon sınırını aştığında,
- Korozyon dayanımı kullanılan malzeme tarafından sağlanamadığında,
- Malzemenin yük taşıma kapasitesi yeterli olamadığında,
- Malzemenin aşınma dayanımı yeterli olmadığında.
- Malzemenin yorulma dayanımının yeterli olmaması durumlarında tercih edilmektedir.

Ön işlem olarak, termokimyasal işlem olarak plazma ile nitrüleme ve bunu takiben uygulanan PVD ile ince film kaplama sıklıkla tercih edilen bir dupleks modifikasyon metottur. Ayrıca, son yıllarda uygulanmaya başlanan dupleks yüzey işlemi incelendiğinde, tek başına uygulanan plazma nitrüleme ve PVD kaplama işlemlerine göre aşağıdaki üstünlükleri görülmüştür (Alsaran *et al.* 2011):

- Dupleks yüzey işlemiyle daha iyi tribolojik özellikler ve yük taşıma kapasitesi elde edilebilir. Bunun sebebi, kaplama sertliğinde görülen artış ile daha az plastik deformasyon oluşmasıdır,
- Dupleks yüzey işlemi ile malzemenin korozyon direnci artar,
- Dupleks yüzey işlemi uygulanan malzemelerde yapışma daha iyidir,
- Bu yöntemle yüzey kaplama işlemlerinin dezavantajı olarak görülen taban malzemesi seçimine büyük bir çeşitlilik sağlanabilir. Böylelikle daha az mukavemetli çeliklere ince, sert kaplamalar yapılabilir.

Bununla birlikte, PVD ile yapılan DLC ince film kaplamalar öncesinde uygulanan plazma nitrürleme işlemi birçok malzeme grubunun yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Meletis *et al.* 1995; Alsaran *et al.* 2005; Yetim *et al.* 2010; Dalibon *et al.* 2013). Bu uygulama ile, DLC öncesinde uygulanan nitrürleme işlemi; DLC'nin adezyon özelliklerini ve taban malzemenin plastik deformasyona karşı direncini artırmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, plazma nitrürleme ile sertleşme kabiliyeti yüksek AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Malzemeye ait kimyasal ve mekanik özellikler, sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 4140 çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %)

C	Mn	Cr	Si	Ni	Mo	V	S	Cu	Fe
0.36	0.80	0.014	0.005	0.30	0.85	0.075	0.07	0.143	Kalan

Çizelge 3.2. AISI 4140 çelik malzemenin mekanik özellikleri

Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
415	655	210

3.2. Yorulma Çatlak İlerlemesi Testleri İçin Numunelerin Hazırlanması

Yorulma çatlak ilerlemesi testleri ASTM E647 (ASTM-E647-13ae1 2013) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İlgili standartta çatlak ilerlemesi testleri için üç farklı numune geometrisi önerilmiştir: C(T)-Compact Tension, M(T)-Middle Tension ve ESE(T)-Excentrically Loaded Single Edge Crack Tension. Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde C(T) ve M(T) numuneleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu iki tip numune ile denemeler yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda ise, değişken genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi testlerinde sıklıkla kullanıldığı (Bacila *et al.* 2007; Lee *et al.* 2009; Lee *et al.* 2010a) ve yüzey işlemi uygulanmış malzemelerde daha kararlı çatlak ilerlemesine olanak sağladığı için tek kenarı çentikli geometriye sahip olan CT numunesinin kullanılmasına karar verilmiştir. ASTM E-647 standardına göre; tasarlanacak olan CT numunelerinin aşağıdaki sınırlamalara uyması gerekmektedir.

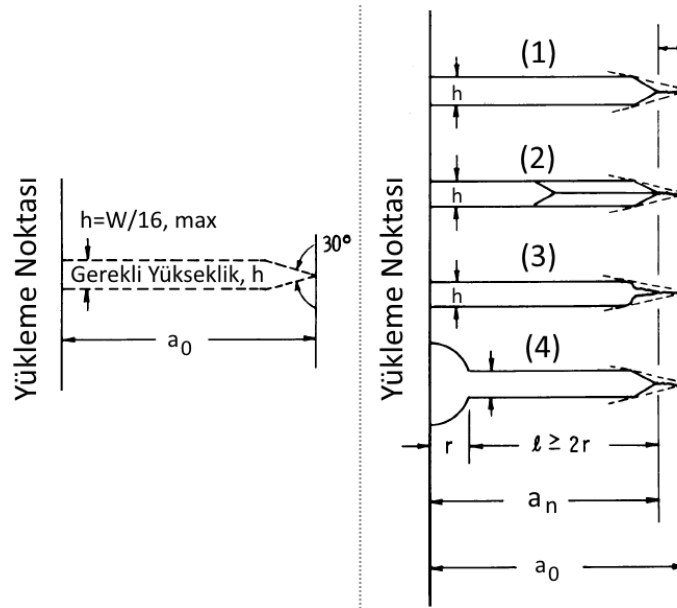
Kalınlık Limiti: Numune kalınlığı B ve yükleme noktasından itibaren genişlik W olmak üzere numune kalınlığı Denklem 3.1’de belirtilen limitler arasında olmalıdır.

$$W/20 \leq B \leq W/4 \quad (3.1)$$

Elastikiyet Limiti: Numunenin, çatlak ucundaki plastik deformasyonlar haricinde uygulanan yükler altında elastik davranış göstermesi gerekmektedir. Bu sebeple, $(W - a)$ numunenin çatlaksız kısmının uzunluğu olmak üzere Denklem 3.2’de verilen eşitsizliğin sağlanması gerekmektedir.

$$(W - a) \geq (4/\pi)(K_{max}/\sigma_{ak})^2 \quad (3.2)$$

Çentik Geometrisi ve Yorulma Ön Çatlağı: Kararlı bir çatlak ilerlemesi elde etmek ve çatlağın belirli bir doğrultuda ilerlemesini sağlamak için ince ve keskin bir çentik ve ön çatlak açılmalıdır. ASTM E-647 standardında dört farklı çentik geometrisi tanımlanmıştır. Bu çentik geometrileri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



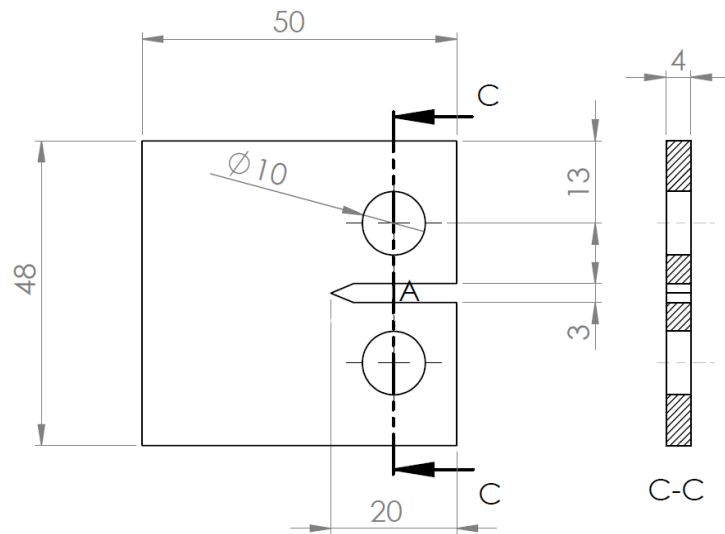
Şekil 3.1. Çentik geometrileri ve yorulma ön çatlağı için gerekli boyutlar (ASTM-E647-13ae1 2013)

Ayrıca, Şekil 3.1’de gösterilen çentiklerden herhangi biri seçildikten sonra numunede açılacak minimum çentik için; a_n yük uygulama noktasının merkezinden çentik ucuna kadar olan uzaklık olmak üzere Denklem 3.3’de verilen şartın sağlanması gerekmektedir.

$$a_n \geq 0.2W \quad (3.3)$$

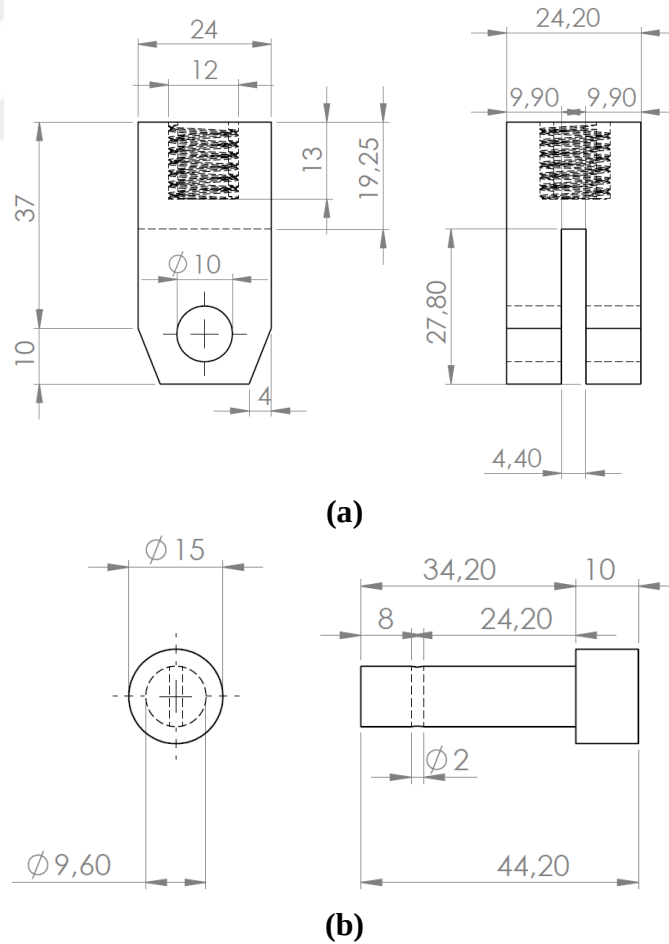
Bunlarla birlikte yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde; çatlak ilerlemesi testlerine başlanmadan önce numunelerde çentik ucundan itibaren belirli bir uzunlukta yorulma ön çatlağı açılmalıdır. Açılacak olan yorulma ön çatlağı; $0.1B$, h veya 1 mm değerlerinden hangisi büyük ise, en az büyük olan değer kadar olmalıdır.

Yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisini belirleyebilmek için kuşkusuz ki numune kalınlığı en büyük kısıtlardan biridir. Bu sebeple çok sayıda denemeden sonra numune kalınlığı $B = 4\text{ mm}$ ve başlangıç çatlak boyu $a_0 = 10\text{ mm}$ seçilerek, ASTM E647-13 (ASTM-E647-13ae1 2013) standardına göre yukarıda verilen kısıtlamalar da dikkate alınarak optimum numune geometrisi elde edilmiştir. Testlerde kullanılan CT numunesine ait teknik resim Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan CT numunesi

Tasarlanan CT geometrisinin üretimi için öncelikle dikdörtgen kesitli AISI 4140 levhalar ASTM E-399 (ASTM-E399-12e3 2012) standardında belirtildiği üzere (L-T) doğrultusunda kesilmiş ve elde edilen numunelerin dairesel geometride olan yükleme noktaları açılmıştır. Bu aşamadan sonra numunelerin yüzeyleri taşlanarak temizlemiştir. Numuneler çentik açılmadan önce 850°C’de 30 dakika süre ile argon atmosferi altında fırında normalize edilmiştir. Normalizasyon işleminden sonra numunelere Şekil 3.1’de gösterilen 1 numaralı çentik açılmıştır. Çentik açma işlemi; 0.2 mm çapında tel kullanılarak erozyon cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise numuneler, yüzey pürüzlülük değerleri $R_a \leq 0.2$ olacak şekilde parlatılmıştır. Bununla birlikte CT numunelerini test cihazına bağlamak için gerekli olan pimli bağlantı aparatları yine ASTM E647 (ASTM-E647-13ae1 2013) standardına göre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bağlantı aparatının teknik resmi Şekil 3.3’te verilmiştir.

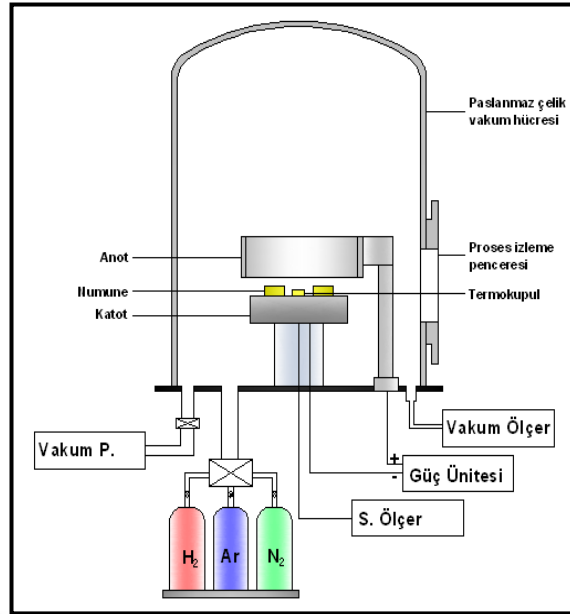


Şekil 3.3. CT numunesi bağlantı aparatı; (a) Çene ve (b) pim

3.3. Plazma İle Nitrürleme, DLC Kaplama ve Dupleks Yüzey İşlemleri

Plazma nitrürleme işlemleri, Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilen plazma nitrürleme deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrürleme ünitesi temel olarak; vakum ünitesi, gaz dağıtım tertibatı ve güç ünitesinden oluşmaktadır. Vakum odası içerisine anot ve katot yerleştirilmiş olup, tam orta noktaya yerleştirilen katot numune tutucu olarak kullanılmıştır. Numune tutucu konumunda olan katot'a negatif kutup ve termokupul bağlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri, 0.5 mm çapında olan Ni-CrNi termokupuldan alınmıştır. Ayrıca sistemde katot'un üst kısmında yer alan ve silindirik geometrisi vasıtasıyla homojen bombardıman sağlayan bir eleman anot olarak yerleştirilmiştir. CT numunelerinin plazma nitrürleme işlemi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

- Numuneler etanol ile temizlendikten sonra her iki yüzeyleri işlem görecektir şekilde katota yerleştirilmiş ve vakum odasının basıncı vakum pompası vasıtasıyla 2.5 Pa değerine düşürülmüştür. Daha sonra numune yüzeylerini temizlemek amacıyla ortama 5×10^2 Pa basınç değerine kadar H_2 gazı verilmiştir ve bunun akabinde numuneler H_2 atmosferinde 500 V gerilim uygulanarak 15 dakika süre ile sputtering (sıçratma) işlemine tabi tutulmuştur.
- Sıçratma işleminden sonra ortam basıncı tekrar 2.5 Pa değerine kadar düşürülmüştür. Bu aşamadan sonra ortama deneyin gerçekleştirileceği basınç değeri olan 5×10^2 Pa basınç değerine kadar, gaz karışım oranı %50 H_2 +%50 N_2 olacak şekilde hidrojen ve azot gazı verilmiş ve ortam basıncı iğne vanalar kullanılarak sabitlenmiştir.
- İstenilen gaz karışımı ve basınç değerine ulaşıldıktan sonra, numuneler sisteme uygulanan elektriksel gerilim değeri artırılarak plazma nitrürleme yapılacak sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Deney süresi bu sıcaklığa ulaşıldıktan sonra başlatılmıştır. Deney bittikten sonra ise numuneler vakum odasından çıkarılmadan oda sıcaklığına kadar soğutulmuşlardır.



Şekil 3.4. Plazma nitrürleme ünitesinin şematik gösterimi (Yetim 2009)

CT numuneleri bu işlem sırası takip edilerek 400, 500 ve 600°C sıcaklık değerlerinde 1 ve 4 saatlik sürelerle plazma nitrürleme işlemine tabii tutulmuşlardır. Plazma ile nitrürlenmiş numuneler isim karışıklığını önlemek amacıyla proses sıcaklığı ve işlem süresi kullanılacak şekilde adlandırılmıştır (400°C-1s, 400°C-4s, 500°C-1s, 500°C-4s, 600°C-1s ve 600°C-4s). Böylelikle 6 farklı plazma nitrürleme deney grubu oluşturulmuştur.

İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş CT numunelerine uygulanan DLC kaplama işlemleri, Şekil 3.5'te gösterilen VAKSIS PVD-MT/2M 2T magnetron sıçratma sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama için 2 inç boyutunda bir karbon hedef kullanılmıştır. Hedef ile taban malzemeler arası mesafe 9 cm'dir. Daha homojen filmler elde edebilmek amacıyla taban malzemeler 5 rpm hızla döndürülmüştür. Vakum odasının (chamber) kaplamadan önceki ön (base) basıncı yaklaşık olarak 2×10^{-3} Pa'dır. DLC filmleri kaplamadan önce taban malzeme yüzeyinde bulunabilecek kirlilikleri gidermek amacıyla iyon temizleme işlemi için 30 sccm argon (%99.999 saflıkta) gaz akışında taban malzeme yüzeyleri 30 dakika temizlenmiştir. DLC filmler 20 sccm argon gaz akışında 0.27 Pa proses basıncı altında ve 150 W dc güç ile büyütülmüştür.



Şekil 3.5. PVD-MT/2M 2T magnetron sıçratma sistemi.

DLC kaplanmış numuneler, isim karışıklığını önlemek amacıyla; sadece DLC kaplanmış numuneler DLC ve plazma nitrülenmiş numunelere gerçekleştirilen DLC kaplama işlemleri: 400°C-1s+DLC, 400°C-4s+DLC, 500°C-1s+DLC, 500°C-4s+DLC, 600°C-1s+DLC ve 600°C-4s+DLC olacak şekilde adlandırılmıştır. Böylelikle işlemsiz numune, plazma nitrülenmiş numuneler, DLC kaplanmış ön işlemsiz numune ve plazma nitrülenmiş+DLC kaplanmış numunelerden oluşan toplam 14 farklı deney grubu oluşturulmuştur.

3.4. Yüzey İşlemi Uygulanmış Malzemelerde Yapısal ve Mekanik Özelliklerin Tayini

İşlem görmüş ve işlemsiz numunelerin yapısal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntem ve cihazlar aşağıda verilmiştir.

XRD Çalışmaları: İşlemsiz ve işlem görmüş numunelerin faz analizleri Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) bünyesinde bulunan GNR-Explorer model X-ışını kırınım

ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Co-K α ışınımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar The International Centre for Diffraction Data (ICDD) standart kartları ile karşılaştırılarak oluşan fazların kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir.

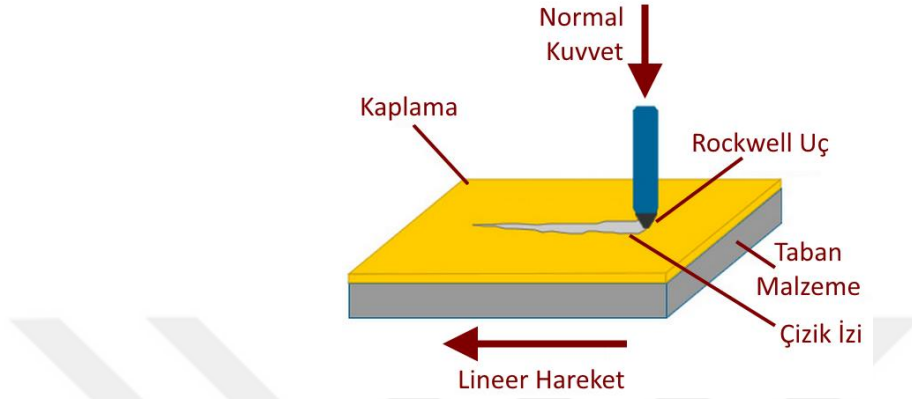
Artık Gerilme Ölçümleri: Artık gerilme ölçümleri, XRD-GNR-Explorer X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Artık gerilme ölçümü yapılırken, XRD cihazında kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu ve yansıma açıları bilindiğinden, Bragg kanunu kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) tespit edilebilir. Düzlemler arası mesafe (d) 'ye karşılık $\sin^2\omega$ grafiği çizildiğinde eğrinin eğiminin gerilme ile orantılı olduğu ifade edilmiştir. Kullanılan XRD cihazının yazılımı bu esasa dayanarak doğrudan artık gerilme değerlerini vermektedir.

SEM Çalışmaları: Numunelerin içyapısı, kesit değişimleri ve kaplama özellikleri ETÜ bünyesinde bulunan ESEM, FEI QUANTA-FEG 250 Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

Mikrosertlik Ölçümleri: Numunelerin yüzey ve kesit sertlikleri Bruker UMT Universal Mechanical Tester-UMT (ETÜ) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme metodu kullanılarak, 100 gram yük altında ve 15 saniye bekleme süresinde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçüm mesafeleri birbirini etkilemeyecek şekilde, her bir numuneden minimum beş ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

Çizme Testleri: Yapışma gerilmesi, taban malzemeden bir kaplama malzemesini koparmak için gerekli olan gerilmedir. Kaplamanın bozulmaya başladığı normal yüke kritik yük denir ve L_c ile gösterilir. Kritik yük, akustik emisyon, sürtünme kuvvetinin izlenmesi veya çizme hattının optik/elektron mikroskobu yardımıyla incelenmesiyle tespit edilebilir (Efeoglu *et al.* 1993; Yetim 2009). DLC kaplanmış ve dubleks yüzey işlemleri uygulanmış numunelerin adezyonu Bruker UMT Universal Mechanical Tester-

UMT ile tespit edilmiştir. Bu test, 120° konik açılı elmas Rockwell C uçla gerçekleştirilmiştir. Çizme testi şematik olarak Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Çizme testinin şematik gösterimi.

3.5. Yorulma Çatlak İlerlemesi Testleri

Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde, öncelikle numunelere ASTM E647 standardına uygun olarak ön çatlak açılmıştır. Numunelere, maksimum ve minimum kuvvetler sırasıyla $F_{max} = 2500\text{ N}$ ve $F_{min} = 250\text{ N}$ olacak şekilde $R = 0.1$ yükleme oranında ve 30 Hz frekansta çentik ucundan 3 mm çatlak açılmıştır. Böylelikle $a = 13\text{ mm}$ başlangıç çatlak boyutu elde edilmiştir.

Ön çatlak açılmış numunelerin sabit ve değişken genlikli yükler altında çatlak ilerleme davranışlarının belirlenmesi amacıyla, ilk aşama olarak; değişken genlikli yükleme (DGY) durumu ile karşılaştırma yapılmasını sağlayacak olan sabit genlikli yükleme (SGY) testleri gerçekleştirilmiştir. Sabit genlikli yükleme deneyleri maksimum ve minimum kuvvetler sırasıyla $F_{max} = 2500\text{ N}$ ve $F_{min} = 250\text{ N}$ olacak şekilde ($R = 0.1$), sinüs formunda yükleme yapılarak 30 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. SGY deneyleri işlemsiz ve işlemlili numuneler için aynı parametreler kullanılarak tekrarlanmıştır.

SGY deneylerinden sonra numuneler DGY şartları altında çatlak ilerlemesi testlerine tabi tutulmuştur. DGY deneyleri için, gerçekleştirilen ön denemeler sonucunda optimum deney şartları/yük seviyeleri belirlenmiştir. Yükleme/gerilme oranlarının hesaplanmasında 3.4-3.8 denklemleri kullanılmıştır (Skorupa 1998; Borrego *et al.* 2003).

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.4)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (3.5)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (3.6)$$

$$R_{OL} = \frac{\sigma_{OL} - \sigma_{min}}{\Delta\sigma} = \frac{K_{OL} - K_{min}}{\Delta K} \quad (3.7)$$

$$R_{UL} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{UL}}{\Delta\sigma} = \frac{K_{max} - K_{UL}}{\Delta K} \quad (3.8)$$

DGY deneylerinde, yapılan literatür araştırmaları sonucunda; metalik malzemelerin yorulma çatlak ilerleme ömrünü en fazla etkileyen dört yükleme durumu ele alınmıştır. Bunlar; çeki aşırı yüklemesi, bası aşırı yüklemesi, çeki-bası aşırı yüklemesi ve bası-çeki aşırı yüklemesi durumlarıdır. DGY için deney şartları şu şekildedir:

Çeki Aşırı Yükleme (OL) Deneyleri: OL deneylerinde; $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmış ve çatlak boyu $a = 16\text{mm}$ 'ye ulaştığında $F_{OL} = 4750 \text{ N}$ büyüklüğünde tekil çeki aşırı yükü-OL

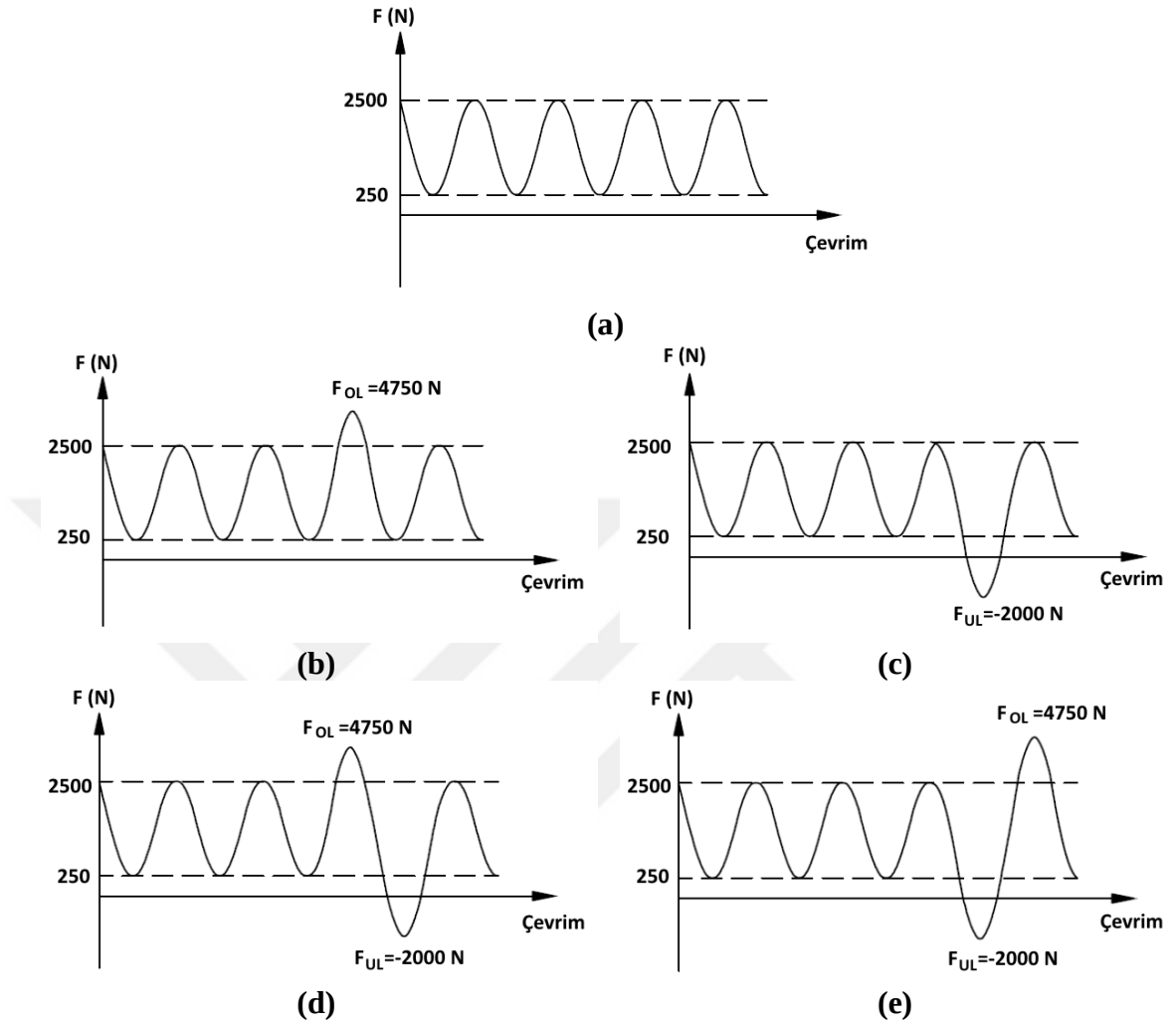
uygulanmıştır ($R_{OL} = 2$). OL uygulanmasından sonra, $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmıştır.

Bası Aşırı Yükleme (UL) Deneyleri: UL deneylerinde; $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmış ve çatlak boyu $a = 16 \text{ mm}$ 'ye ulaştığında $F_{UL} = -2000 \text{ N}$ büyüklüğünde tekil bası aşırı yükü-UL uygulanmıştır ($R_{UL} = 2$). UL uygulanmasından sonra, $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmıştır.

Çeki-Bası Aşırı Yükleme (OL-UL) Deneyleri: OL-UL deneylerinde; $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmıştır. Çatlak boyu $a = 16 \text{ mm}$ 'ye ulaştığında ise art arda $F_{OL} = 4750 \text{ N}$ ve $F_{UL} = -2000 \text{ N}$ büyüklüğünde tekil çeki aşırı yükü-OL ve tekil bası aşırı yükü-UL uygulanmıştır ($R_{OL} = 2$ ve $R_{UL} = 2$). OL-UL uygulanmasından sonra, $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmıştır.

Bası-Çeki Aşırı Yükleme (UL-OL) Deneyleri: UL-OL deneylerinde; $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmıştır. Çatlak boyu $a = 16 \text{ mm}$ 'ye ulaştığında ise art arda $F_{UL} = -2000 \text{ N}$ ve $F_{OL} = 4750 \text{ N}$ büyüklüğünde tekil bası aşırı yükü-UL ve tekil çeki aşırı yükü-OL uygulanmıştır ($R_{UL} = 2$ ve $R_{OL} = 2$). UL-OL uygulanmasından sonra, $F_{max} = 2500 \text{ N}$ ve $F_{min} = 250 \text{ N}$ olacak şekilde 30Hz'de sabit genlikli yükleme yapılmıştır.

SGY ve DGY deneylerinde uygulanan kuvvetler ve yükleme durumları şematik olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Ayrıca, bu testlere ait örnek YÇİ görüntüleri, Ekler kısmında (Ek I, Ek II, Ek III, Ek IV ve Ek V) verilmiştir.



Şekil 3.7. Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde uygulanan yükleme tiplerinin şematik gösterimi

(a) SGY, (b) OL, (c) UL, (d) OL-UL ve (e) UL-OL.

Şekil 3.7 ve Denklem 3.4-3.8'den de anlaşılacağı üzere yorulma çatlak ilerlemesi deneylerinde çeki ve bası aşırı yükleme oranları, $R = 2$ olarak belirlenmiştir. Bu oranlara, aşırı yükleme deneyleri öncesinde yapılan ön denemelere bağlı olarak karar verilmiştir. Bası aşırı yüklemesi için yapılan ön denemelerde, $R = 2.5$ gerilme oranı için numunelerde kararsız çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir. Çeki aşırı yüklemesi durumu için ise, $R > 2$ gerilme oranında numunelerde **çatlak ucu dallanması (crack branching)** gözlemlenmiştir. Bu olaya bağlı olarak da çatlak ilerlemesi tamamen durmuştur. Deneyler esnasında gözlemlenen örnek çatlak ucu dallanması olayı Şekil

3.8’de gösterilmiştir. Bu sebeplerle, çeki ve bası aşırı yüklemesi (OL ve UL) deneyleri için gerilme oranları, $R_{UL} = 2$ ve $R_{OL} = 2$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Çatlak ucu dallanması (crack branching).

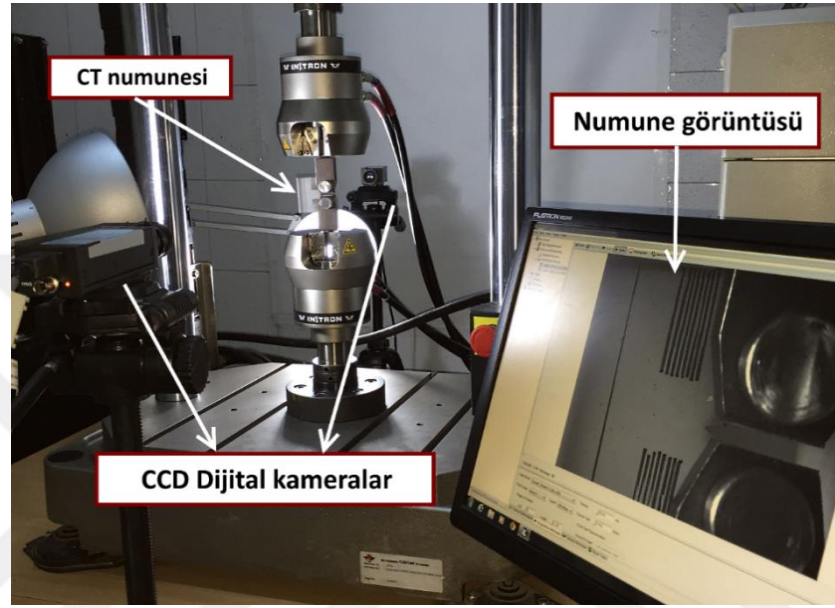
SGY ve DGY deneyleri, her bir yüzey işlemi parametresi ve her bir yükleme durumu için en az üç kez tekrarlanmıştır. Ayrıca, testler maksimum %5 hata payı ile gerçekleştirilmiştir. Bütün testler INSTRON 8872 servo hidrolik çeki-bası yorulma test cihazı ile yük kontrollü olarak oda sıcaklığında ve ortam havasında gerçekleştirilmiştir.

Dijital görüntü alma işlemi: Yorulma çatlak ilerlemesi testleri esnasındaki çatlak ilerleme miktarları; Atatürk Üniversitesi Biyomekanik AR-GE Laboratuvarında mevcut bulunan dijital görüntüleme sistemi kullanılarak *in situ* olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Dijital görüntüleme sistemi aşağıda verilen birimlerden oluşmaktadır:

- SONY XCD-SX910 CCD; Yüksek çözünürlüklü monokrom dijital kamera (2 Adet),
- C Mount Lens; 10, 25 ve 50 mm sabit odaklı lens (2 Adet),
- NI IEEE-1394 FireWire Driver; Veri toplama kartı (2 Adet),
- Veri Toplama Yazılımı; LabVIEW programlama dili kullanılarak oluşturulmuş görüntü toplama yazılımı.

Dijital görüntüleme sistemi aracılığıyla, testler esnasında numunenin her iki yüzeyinden görüntü alınarak testler gerçekleştirilmiştir. Bu sistem anında görüntü alınmasına izin verdiği için hem çatlak ilerleme testlerinde çatlak boyunun *in situ* olarak belirlenmesine

hem de test sonrasında elde edilen görüntülerin muhafaza edilmesine olanak sağlamaktadır. Dijital görüntüleme sistemi ve yorulma deney düzeneğinden oluşan, yorulma çatlak ilerlemesi deney düzeneği Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Yorulma çatlak ilerlemesi deney düzeneği

Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde, gerçekleştirilen testlerin geçerli olarak kabul edilebilmesi için en önemli hususlardan biri çatlak boyunun gözlenmesi ve ölçülmesidir. Çatlak boyu ölçümleri, ASTM E647 (ASTM-E647-13ae1 2013) standardına uygun olarak;

$$0.25 \leq a/W \leq 0.40 \quad \text{için;} \quad \Delta a \leq 0.04W$$

$$0.40 \leq a/W \leq 0.60 \quad \text{için;} \quad \Delta a \leq 0.02W$$

$$a/W \geq 0.60 \quad \text{için;} \quad \Delta a \leq 0.01$$

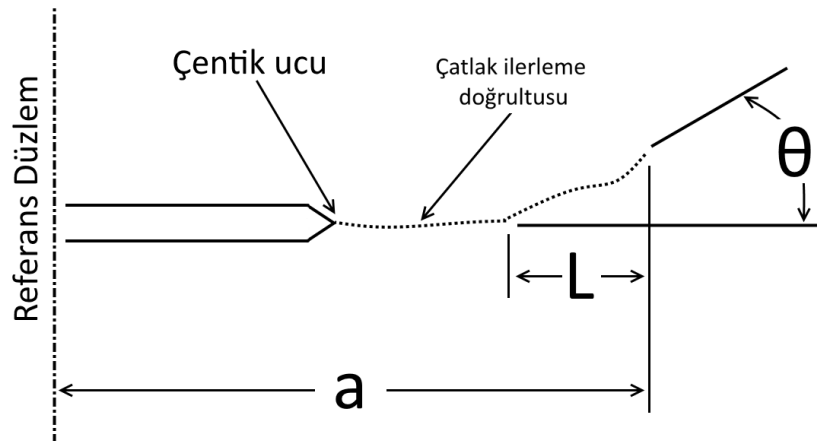
limitleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ilgili standartta testlerin geçerli olabilmesi için belirtilen bir diğer kriter çatlak ucunun çatlak ilerleme düzlemi ile yaptığı açıdır. Şekil 3.10'da çatlak ilerleme açısı ve ilgili büyüklükler gösterilmiştir. Yorulma çatlak ilerlemesi testleri esnasında kararlı ve simetrik bir çatlak ilerlemesi istenmektedir. Bu duruma göre;

$$\theta \leq 10^\circ \quad (1)$$

$$10^\circ < \theta \leq 20^\circ \quad (2)$$

$$L \geq 0.1W \text{ için } \theta > 20^\circ \quad (3)$$

üç farklı kriter ortaya konmuştur. Burada belirtilen (1) numaralı şart için çatlak ilerlemesi deneyleri geçerlidir. (2) numaralı durumun oluşması halinde ise çatlak ucu açısının değişimi rapor edilerek testlere devam edilebilir. (3) numaralı durumda ise çatlak ilerleme testleri geçersizdir. Yapılan deneylerde (1) numaralı durum esas alınmış ve buna göre, bu şarta uymayan deneyler geçersiz sayılarak tekrarlanmıştır.



Şekil 3.10. Çatlak ilerleme açısı ile ilgili büyüklükler (ASTM-E647-13ae1 2013)

3.6. Yorulma atlak İlerlemesi Testleri Sonrasında Numunelerin İncelenmesi

Yorulma atlak ilerlemesi testleri sonrasında numunelerin kırılma yüzeyleri; ETÜ bünyesinde bulunan ESEM, FEI QUANTA-FEG 250 Taramalı Elektron mikroskobu, ZEISS STEMI 200-C Stereo Optik Mikroskop ve Bruker ContourGT-I 3D Optik Mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerlemesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, çalışmanın ilk aşaması olan plazma ile nitrürleme, elmas benzeri karbon (Diamond Like Carbon-DLC) kaplama ve dubleks (plazma nitrürleme+DLC kaplama) yüzey işlemleri AISI 4140 çelik üzerine uygulanmıştır. Uygulanan yüzey işlemleri sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.1. Yapısal İncelemeler

4.1.1. XRD ve artık gerilme analizleri

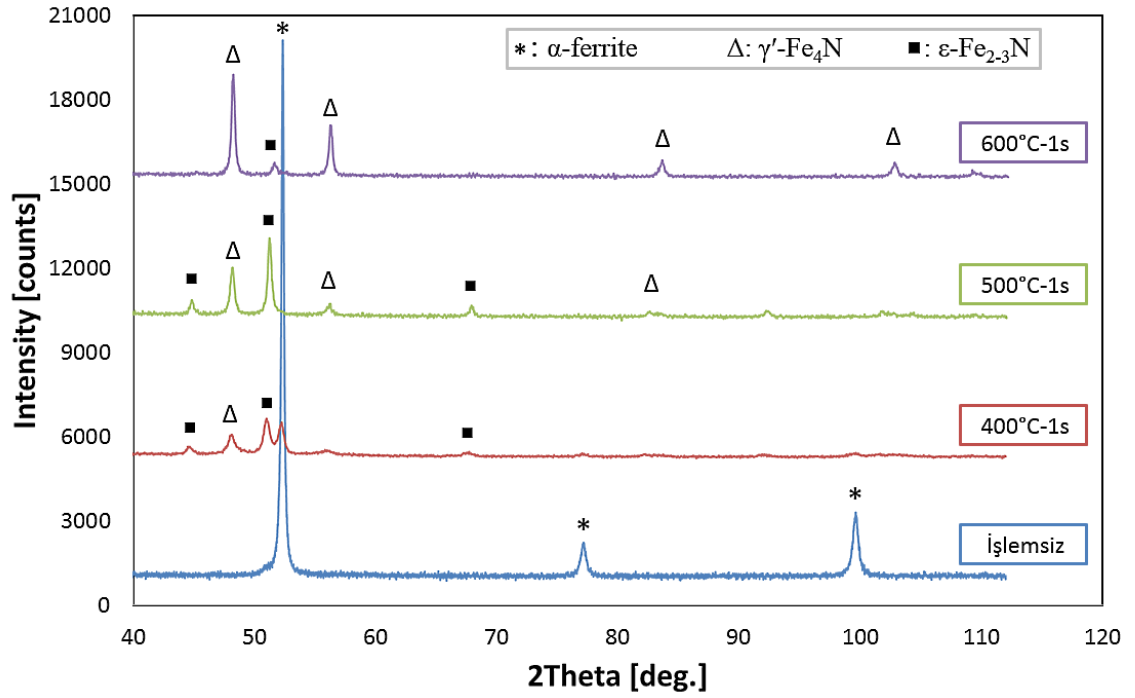
Plazma ile nitrürleme yöntemi elektriksel boşalma (glow discharge) şartlarında oluşur. Bu yöntemde, malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. İşlem teorik olarak, elektriksel bakımdan iletken malzeme yüzeyine N arayer atomunun yayınma işlemidir. Çalışma kapsamında, dubleks yüzey işleminin ilk adımı olan plazma ile nitrürleme sonucu elde edilen modifiye yüzeyin faz dağılımı XRD analizleri ile tespit edilmiştir.

Farklı işlem süresi ve sıcaklıklarına göre elde edilmiş XRD grafikleri Şekil 4.1 ve 4.2’de verilmektedir. İşlem görmemiş taban malzemenin tamamen α -ferrit yapısından oluştuğu görülmektedir. Plazma nitrürleme sonrası ise işlem parametrelerine bağlı olarak değişen ϵ -Fe₂₋₃N ve γ' -Fe₄N nitrürlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Plazma nitrürleme sonrası oluşan yapılara ilişkin Edenhofer (Edenhofer 1974a; Edenhofer 1974b) modeli kullanılmaktadır. Bu modele göre, elektriksel boşalma şartları altında azot gazı iyonize olur. Azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenir ve katoda bağlı iş parçasını bombardımana uğratar. Yüzeye çarpan iyonlar, yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açar. Bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elemanları, metalik olmayan element atomları (karbon, oksijen, azot) ile

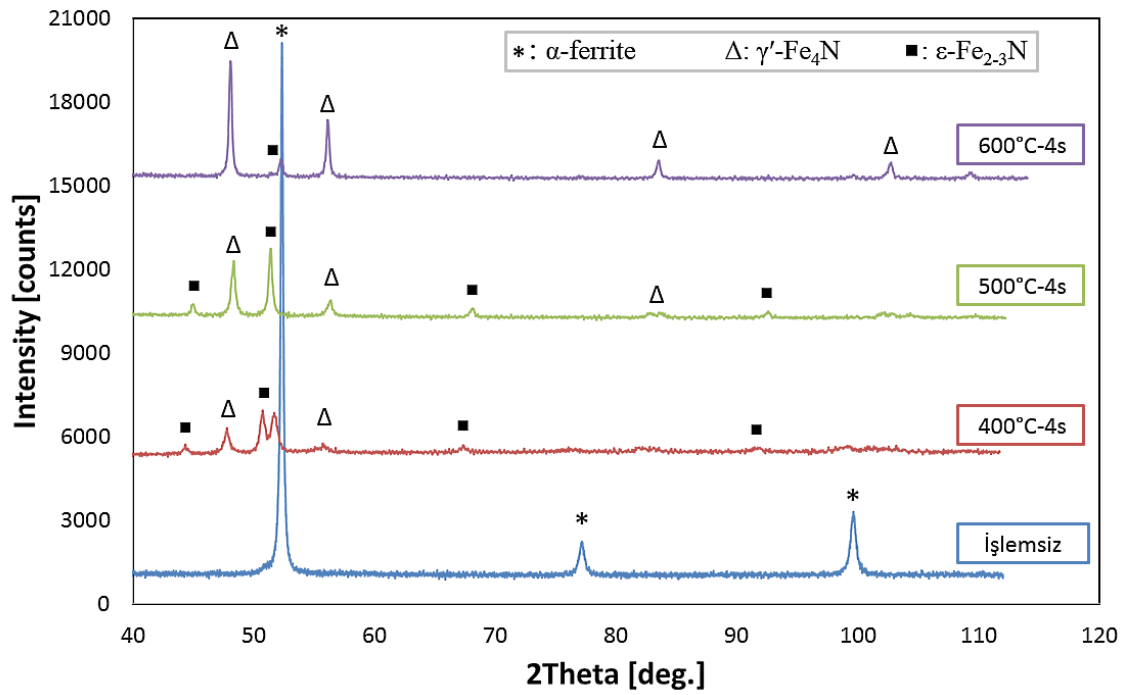
elektronlar yüzeyden uzaklaşır (saçılma). Yüzeye çarpan iyonların ancak çok az bir kısmı iş parçasına yayınır (doğrudan implantasyon). Bu iyonların büyük bir kısmı saçılma olayını sağlar. Saçılan demir atomları ile yüksek enerjili azot atomları, yüzey dolayında FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikir (yoğunlaşma). FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır ve kararlı diğer nitrürlere (Fe_2N , Fe_3N ve Fe_4N) dönüşür. Dönüşme sırasında serbest kalan azot atomları ya metale yayınır ya da plazmaya döner (Edenhofer 1974b).

Şekil 4.1’de 1 saatlik plazma ile nitrürleme süresinde, 400, 500 ve 600 °C işlem sıcaklıklarında nitrürlenmiş AISI4140 çeliğine ait XRD sonuçları görülmektedir. İşlem süresi ve sıcaklıkları arttıkça α -ferrit fazının yansıma şiddetinde azalma, nitrür fazlarının şiddetlerinde ise artma görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda (400 ve 500 °C) ϵ - Fe_{2-3}N fazının, yüksek sıcaklıklarda ise γ - Fe_4N fazının baskın olduğu görülmektedir. 600 °C’de plazma ile nitrürlenmiş numunelerde daha düşük nitrürleme sıcaklıklarında bazı yansıma açılarında var olan ϵ - Fe_{2-3}N piklerinin kaybolduğu, buna karşın γ - Fe_4N fazına ait piklerin şiddetinin ise arttığı tespit edilmiştir. 4 saatlik plazma ile nitrürleme süresinde, 400, 500 ve 600 °C işlem sıcaklıklarında nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğine ait XRD sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Hem işlem sıcaklığının hem de süresinin artışı tabaka içerisinde γ - Fe_4N fazının daha baskın olmasına neden olmuştur. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 birlikte değerlendirildiğinde, XRD grafiklerinin benzerlik gösterdiği, sadece sürenin artışının bir miktar nitrür pik şiddetlerini artırdığı görülmektedir. Bu durum, plazma ile nitrürleme sonrası elde edilen yüzeyin faz yapısına plazma nitrürleme süresinden daha çok sıcaklığının etkin olduğunu göstermektedir.

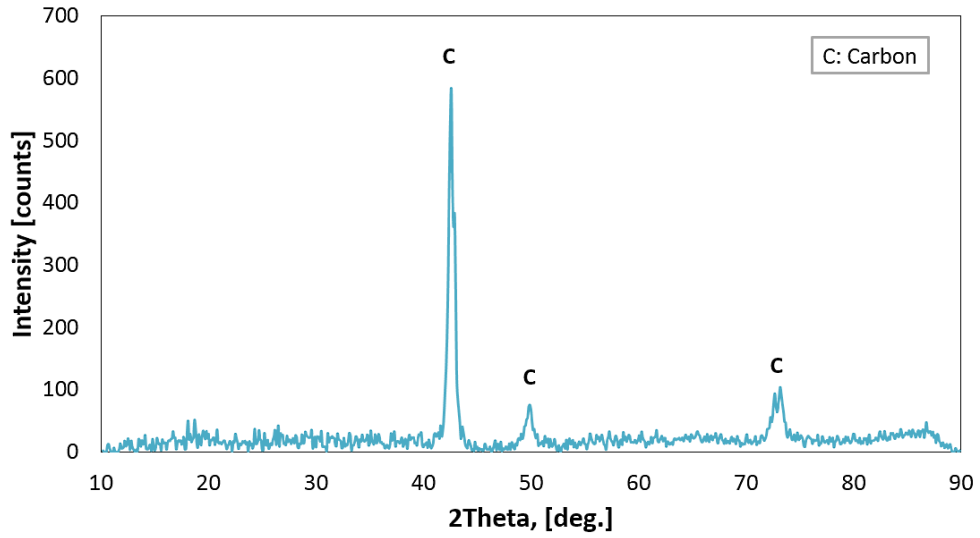
Ayrıca, Şekil 4.3’te DLC kaplama sonrası elde edilen XRD grafiği verilmiştir. Silikon altlık üzerine yapılan kaplama sonrası yapılan XRD analizinde yapının tamamen karbondan oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.1. 1 saatlik plazma ile nitrürleme süresinde, 400, 500 ve 600°C işlem sıcaklıklarında nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğine ait XRD sonuçları



Şekil 4.2. 4 saatlik plazma ile nitrürleme süresinde, 400, 500 ve 600°C işlem sıcaklıklarında nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğine ait XRD sonuçları



Şekil 4.3. DLC filmin XRD grafiği

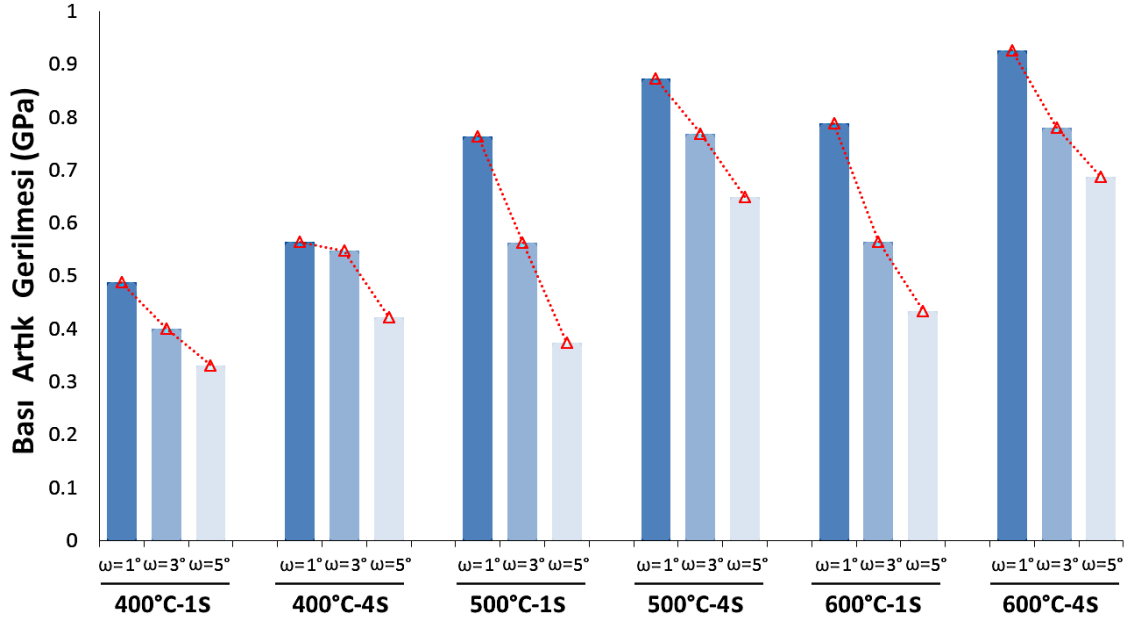
Yüzeye uygulanan plazma ile nitrüleme ve DLC kaplama işlemleri sonucu yüzeyde oluşturulan tabakalar içerisinde gerilme durumu değişir ve yapıda artık gerilme olarak tanımlanan elastik gerilmeler oluşur. Artık gerilmeler dışarıdan uygulanan yük kaldırıldığı halde yapıda kalan gerilmeler olarak tanımlanır. Artık gerilmelerin kaynağı mekanik, termal ve kimyasal işlemler olabilir. Bu çalışmada kullanılan yüzey işlemleri termo-kimyasal işlemler olduğundan ve yüzeyin kimyasal yapısını değiştirdiğinden artık gerilmelerin oluşumu kaçınılmazdır. Artık gerilmeler uygulanan işleme bağlı olarak yapıda çeki veya bası şeklinde bulunabilir. Yapısında artık gerilme bulunan bir eleman üzerine dış bir gerilme uygulandığında bu eleman dış ve artık gerilmelerin kümülatif etkisi kadar etkilenir. Bu nedenle uygulanan dış gerilme ile içyapıdaki artık gerilmenin aynı işaretli olması sistemin daha büyük gerilmelerin altında kalmasına sebep olur.

Genellikle çekme gerilmelerine maruz kalan sistemlerde bası artık gerilmelerinin oluşturulması faydalıdır. Bası gerilmeleri çatlak başlangıcını geciktirdiği gibi mevcut çatlakların ilerlemesine de engel olmaktadır. Diğer taraftan, çeki gerilmeleri ise çatlak ilerlemelerini desteklediği için tercih edilmemektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında uygulanan yüzey işlemlerin yorulma çatlak ilerleme davranışına etkileri araştırılırken, bu yüzey işlemleri sonucu oluşacak artık gerilmelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu

amaç için X-ışını kullanılarak artık gerilme ölçümleri yapılmış ve ölçülen artık gerilme değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Artık gerilmelerin ölçülmesinde kullanılan en etkili yöntemlerden birisi olan X-ışını yöntemi ölçülen numunede hasar oluşturmada artık gerilmelerin belirleyen bir yöntemdir. Bu yöntem, kristalografik düzlemler arası mesafenin değişimi esasına dayanmaktadır. Uygulanan işlemler sonucu meydana gelen kristalografik deformasyonlar gerilme olmayan duruma kıyasla kafes düzlemleri arasındaki mesafenin değişmesine neden olur. Poisson oranı etkisinden dolayı, eğer çeki artık gerilmesi oluşmuşsa gerilme yönüne dik yöndeki düzlemlerde boşluk artışına, yatay düzlemlerdeki boşluğun ise azalmasına neden olur. Bası artık gerilmelerinde ise bu durumun tam tersi meydana gelmektedir. Bu yöntemle artık gerilme ölçümü yapılırken, XRD cihazında kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu ve yansıma açıları bilindiğinden, Bragg kanunu kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) tespit edilebilir. Düzlemler arası mesafe (d) ‘ye karşılık $\sin^2\omega$ grafiği çizildiğinde eğrinin eğiminin gerilme ile orantılı olduğu ifade edilmiştir. Kullanılan XRD cihazının yazılımı bu esasa dayanarak doğrudan artık gerilme değerlerini vermektedir.

Çizelge 4.1’de ölçülen artık gerilmelerin bası tip artık gerilmeler olduğu görülmektedir. Bu çalışmada uygulanan yüzey işlemlerinin yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturduğu bilimsel literatürde birçok çalışmada belirtilmiştir (Sun and Bell 1991; Çelik and Karadeniz 1996; De la Cruz *et al.* 1998; Alsaran *et al.* 2004; Sirin *et al.* 2008; Akbari *et al.* 2010). Plazma ile nitrürleme işlemi uygulanan numunelerin difüzyon bölgesinde oluşan artık gerilmeler nitrür çökeltilerinin oluşumu ve arayer azot atomlarının kristal kafesi genişletmesi sebebiyle meydana gelir. Difüzyon etkisinden dolayı artık gerilme değerleri iç kısımlara doğru gidildikçe azalmaktadır. Bu durumu belirlemek için farklı incident açılarında (ω) X-ışınları yüzeye gönderilmiştir. Incident açı değeri arttıkça X-ışınları yüzeyden daha derin kısımlara ulaşabilir. Plazma nitrürlenmiş numunelerin farklı incident açıları için elde edilen artık gerilme değerleri Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.4’ten de görüldüğü gibi ω değerleri arttıkça ölçülen artık gerilme değerleri de azalmaktadır. DLC kaplama işlemlerinde kaplama sırasında büyütülen film üzerine yapılan yüksek enerjili iyon bombardımanı yüksek bası artık gerilmelerinin oluşumuna neden olmaktadır. DLC filmler homojen ince bir film şeklinde

büyütüldüğünden sadece düşük incident açılı X-ışını kullanılarak artık gerilme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında farklı incident açılarında elde edilen artık gerilme değerleri

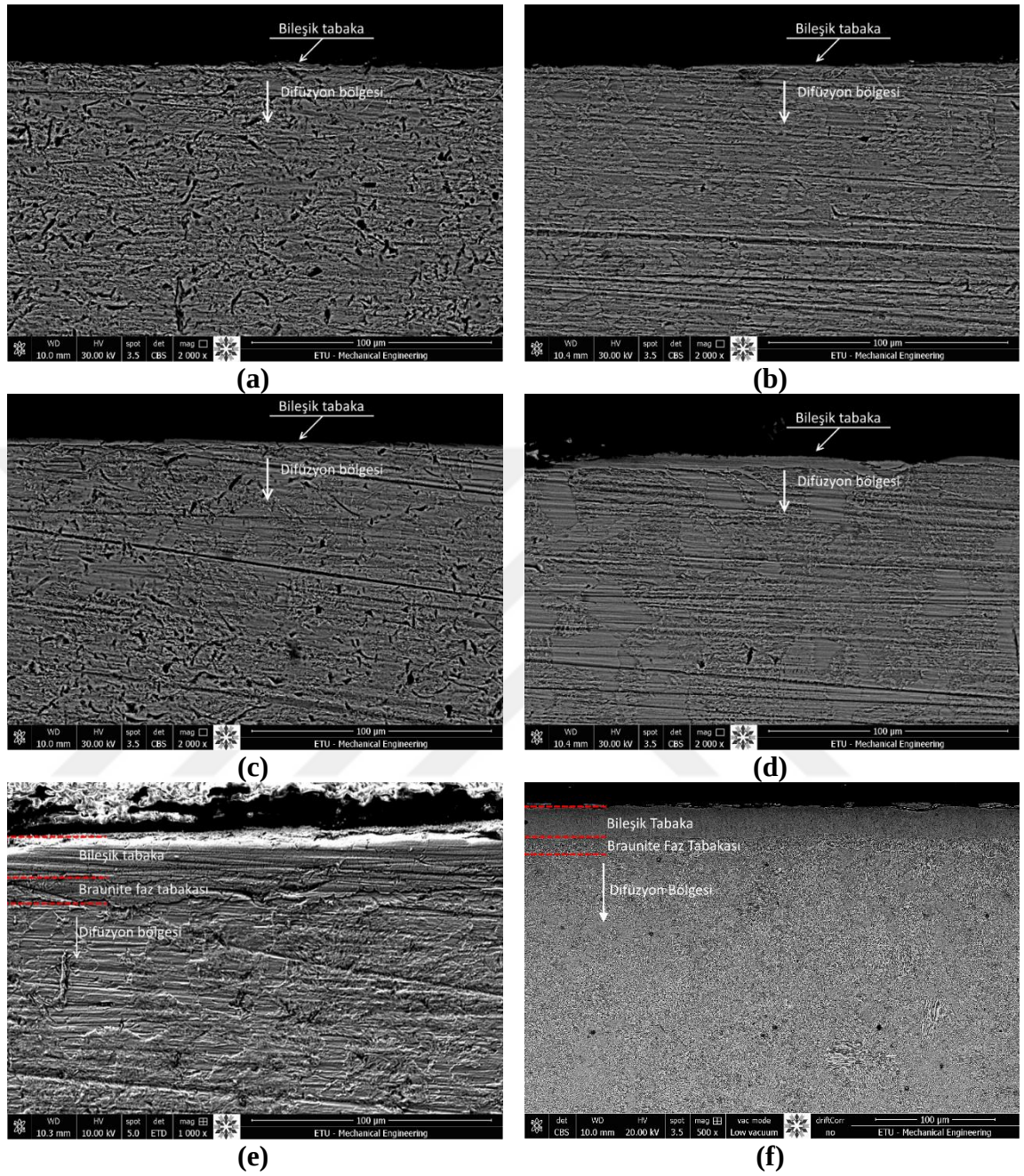
4.1.2. Mikroyapı ve mikrosertlik analizleri

Plazma ile nitrüleme sonrası elde edilen tabakalara ait kesitler taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiş ve elde edilen kesit resimleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Bilindiği üzere, plazma ile nitrüleme işlemi sonrası en dışta beyaz tabaka ve onun altında da difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşur. Kesit resimlerinden de görüldüğü gibi işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça tabaka kalınlıkları da artmaktadır (Şekil 4.5, a-f).

Beyaz tabaka veya bileşik tabaka olarak isimlendirilen bu tabaka, en dışta bulunur ve nital çözeltisi ile kimyasal dağlama işleminden etkilenmeyen, çok ince demir nitrürler içeren bir tabakadır. Dağlama işleminden etkilenmediğinden beyaz tabaka olarak adlandırılmıştır. Beyaz tabaka olarak, sadece ϵ (HSP) veya γ' (YMK) nitritlerinden biri

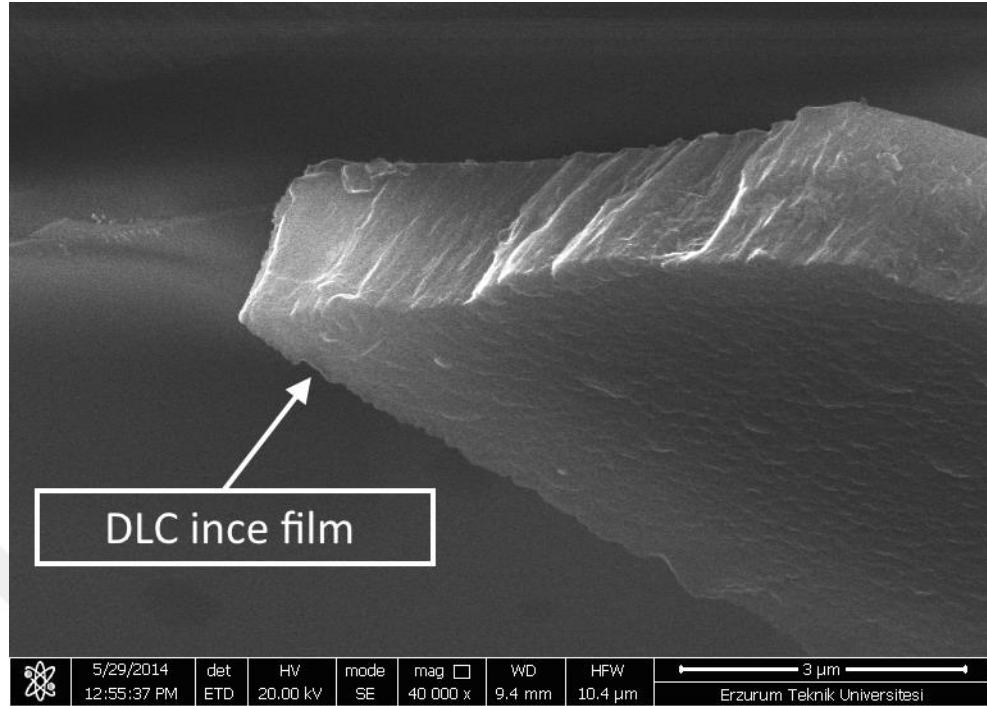
oluşuyorsa mekanik özelliklerin daha iyi olduğu görülmüştür. Çok fazlı beyaz tabaka ϵ ve γ birleşimi olup heterojen bir karışımdır. Farklı kafes yapılarından dolayı geçiş bölgelerinde iç gerilmeler oluşur. Bu durumda çok az bir kuvvet uygulanması halinde bile mikroçatlaklar oluşabilir. Ayrıca tabaka kalınlığı artıkça sünekliğinin düştüğü bilinmektedir. Bu iki faktöre bağlı olarak optimum özellikler, tek fazlı ve minimum kalınlıklı beyaz tabakada elde edilir. Beyaz tabakanın hemen altında ise difüzyon tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın sertliği ve azot yoğunluğu yüzeyden içeriye doğru gidildikçe azalmaktadır. Bu yüzden, difüzyon tabakası yüzeyden malzemenin içine doğru bir geçiş sağlar. Difüzyon tabakası azot atomlarının arayer atomu şeklinde demir kafesi içerisine yerleştiği ve ince dağılmış demir nitrürlerin olduğu bir bölgedir. Difüzyon bölgesinde, metal nitrürlerin çökmesi, azotla α -fazının doyması, artık gerilmelerin dağılımı, karbonun yeniden dağılımı ve tane sınırı fazının oluşumu gibi birkaç olay meydana gelir (Karadeniz 1990).

Şekil 4.5, e ve f incelendiğinde, beyaz tabakanın alt kısmında belirgin bir hat ile beyaz tabakadan ayrılmış ayrı bir tabakanın olduğu görülmektedir. Bilimsel literatürde bu bölge Braunite fazı bölgesi olarak bilinmektedir (Kurny *et al.* 1986; Çelik *et al.* 2001). Braunite fazı α -ferrit ve γ -Fe₄N fazlarının ötektoid bir karışımı olup 592°C'lik nitrürleme sıcaklıklarının üzerindeki işlem sıcaklıklarında oluşan oldukça sert ve kırılgan bir fazdır. Çelik ve arkadaşları (Çelik *et al.* 2001) Braunite fazı tabakasının 4 saatlik nitrürleme sürelerine kadar birbirlerine yakın kalınlıkta oluştuğunu, bu sürelerin üzerindeki nitrürleme işlemlerinde ise tabaka kalınlığının azaldığını ifade etmiştir. Benzer şekilde, braunite fazı tabaka kalınlığının değişmediği Şekil 4.5-e ve f'de görülmektedir.



Şekil 4.5. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında numunelerden elde edilen kesitler
 (a) 400°C-1s, (b) 400°C-4s, (c) 500°C-1s, (d) 500°C-4s, (e) 600°C-1s ve (f) 600°C-4s

DLC ince film kaplama işlemi yapılırken film yapısı ve kalınlığının tespiti için kullanılan silikon altlık kırılarak DLC ince filmin kesit resmi görüntülenmiştir. Elde edilen kesitin SEM resmi Şekil 4.6’da verilmiştir. Büyütülen film uniform ve yoğun bir yapıdadır. Film içerisinde mikro-boşluk ve çatlak gibi kusurlara rastlanılmamıştır. Film kalınlığının yaklaşık 2 µm’dir.

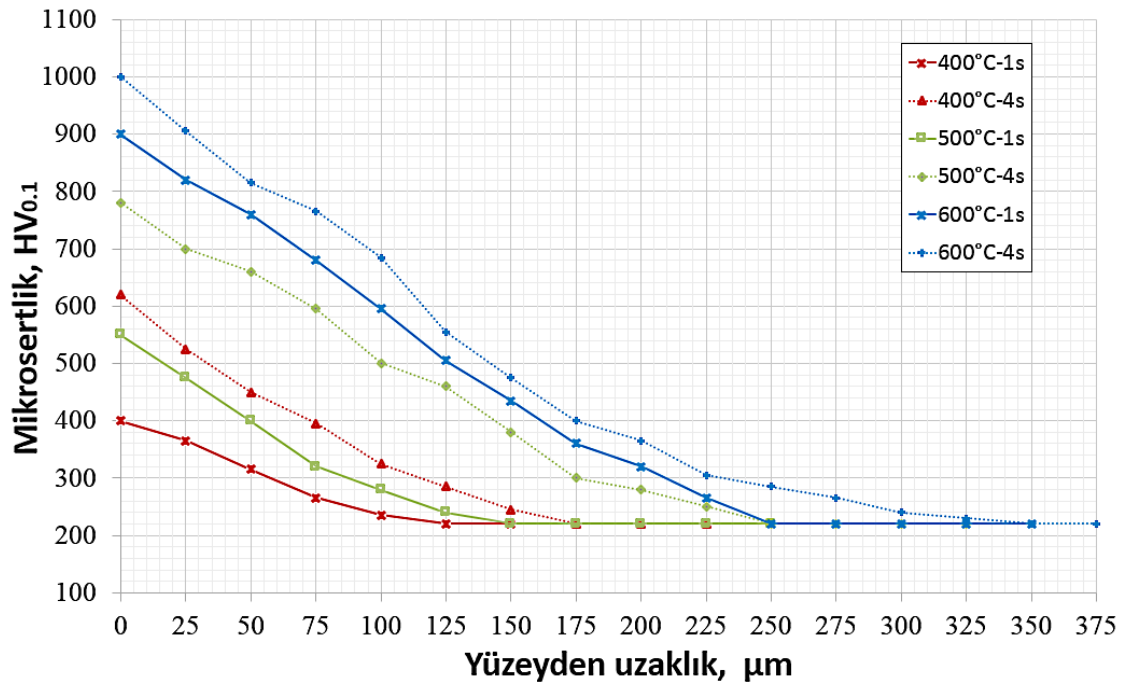


Şekil 4.6. DLC ince filmin kesit SEM resmi

Plazma ile nitrürlenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks yüzey işlemi uygulanmış numunelere ait sertlik ve tabaka kalınlığı değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Plazma nitrürlenme işlemi bir termokimyasal difüzyon işlemi olduğundan işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça azotun difüzyon kabiliyeti artmakta ve daha yüksek tabaka kalınlıkları elde edilmektedir. Bu nedenle yapılan ölçümlerde en yüksek tabaka kalınlığı değerlerine 600°C’de ve 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş numunelerde ulaşılmıştır. Diğer taraftan, 400 ve 500°C’de nitrürlenmiş numunelerde sadece beyaz tabaka ve difüzyon tabakası oluşurken, 600°C’de nitrürlenmiş numunelerde beyaz tabakanın hemen altında braunite (α -ferrit+ γ -Fe₄N) fazının oluşturduğu farklı bir tabakanın oluştuğu tespit edilmiştir. Braunite tabakası kalınlığının hem 1 saat hem de 4 saat nitrürlenmiş numunelerde yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

Yüzeyden itibaren en alt kısımda oluşan difüzyon tabakası kalınlığı ile sertlik ölçümleri ile belirlenmiştir. Yüzeyden iç kısma doğru sertlik değerleri ölçülerek kaydedilmiş ve sertliğin taban malzeme sertliğine ulaştığı andaki yüzeyden mesafe ölçülerek difüzyon tabakası kalınlığı tespit edilmiştir. Bu durumu gösteren sertlik-yüzeyden olan mesafe

arasındaki ilişki Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Sertliğin kademeli olarak taban malzeme sertliğine kadar inmesi literatürdeki benzer çalışmalarda da görülmüştür (Wilson *et al.* 1999; Wei *et al.* 2004). İşlem görmemiş numunelerin sertlik değeri 200-220 HV_{0.01} iken plazma nitrüleme parametrelerine bağlı olarak yüzey sertliği değerleri 5 kata kadar artmıştır. Şekil 4.7’den görüldüğü gibi, en yüksek sertlik değerlerine yüzeye yakın kısımlarda ulaşılmıştır. Yüzeyden uzaklaştıkça ölçülen sertlik değerlerinde azalma görülmektedir. Yüzey sertliğindeki artışın nedenleri oluşan sert nitrürler ve yük taşıma kapasitesi yüksek bir beyaz tabakanın oluşmasıdır. Plazma nitrüleme sıcaklığı ve süresi arttıkça difüzyon derinliği artmış ve daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Kalın bir difüzyon tabakası yüzeyin yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olması anlamına gelmektedir. Oluşan demir nitrür çökeltileri dislokasyon hareketlerine engel olarak şekil değişimine karşı direnç göstermekte ve sertlik ölçümü için kullanılan batıcı ucun bıraktığı iz değerini düşürmektedir. Sertlik değerini artıran diğer bir faktör, difüzyon sonucunda α -ferrit yapısı içerisine giren ara yer azot atomları α fazının kristal kafesini çarpıtması ve mukavemeti artırmasıdır (Yılbaş *et al.* 1996).



Şekil 4.7. Sertlik-mesafe değişimi grafiği

Çizelge 4.1. Uygulanan yüzey işlemleri sonrası elde edilen tabaka kalınlıkları, sertlik ve artık gerilme değerleri

Plazma Nitrürleme		Sertlik (HV _{0.1})	Tabaka Kalınlığı (μm)			Artık Gerilme (GPa)		
T (°C)	t (s)		Beyaz	Difüzyon	Braunite	ω=1°	ω=3°	ω=5°
400	1	380-400	1-2	120-130	-	-0.488	-0.401	-0.331
400	4	600-620	2-3	140-150	-	-0.564	-0.548	-0.422
500	1	550-570	3-5	160-180	-	-0.764	-0.563	-0.374
500	4	700-780	6-8	240-260	-	-0.873	-0.769	-0.649
600	1	870-900	10-12	230-250	20-30	-0.788	-0.565	-0.434
600	4	980-1000	10-12	320-350	20-30	-0.927	-0.781	-0.687
DLC Film		1400-1450	1.5-2			-1.2,-1.3		
Dubleks İşlem								
400	1	1450-1500	1-2	120-130	-	-1.2-1.3	-0.463	-0.346
400	4	1500-1550	2-3	140-150	-	-1.2-1.3	-0.555	-0.430
500	1	1450-1500	3-5	160-180	-	-1.2-1.3	-0.556	-0.391
500	4	1550-1600	6-8	240-260	-	-1.2-1.3	-0.773	-0.629
600	1	1600-1650	10-12	230-250	20-30	-1.2-1.3	-0.567	-0.478
600	4	1750-1800	10-12	320-350	20-30	-1.2-1.3	-0.804	-0.712
İşlemsiz 4140		200-220	-	-	-	-	-	-

Elmas benzeri karbon (DLC) filmler karbonun grafit ve elmas formunun birlikte bulunduğu yapılardır. Bu filmlere sertliğini elmas içeriği sağlamaktadır. Bu çalışmada büyütülen DLC filmlerin sertliği 1400-1450 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. Dupleks işlem görmüş numunelerde plazma ile nitrülenmiş numunelere göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeni, dupleks işlemin ilk kademesi olan plazma nitrüleme işleminin DLC filme işlemsiz taban malzemeye göre daha fazla destek vermesi ve ince film+nitrür tabakası sisteminin yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olmasındandır.

4.1.3. Çizme testi

Çizme testleri sonrasında, DLC kaplanmış ve dupleks işlem görmüş numunelerin L_{c1} değerlerinin birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. DLC kaplanmış numune için kritik yük değeri $L_{c1}=42-45N$ ve dupleks işlem görmüş numunelerin kritik yük değeri $L_{c1}=58-65N$ olarak ölçülmüştür. Bu durum, DLC filmlerin alt kısımda bulunan nitrür tabakasının iyi bir adezyonla taban malzemeye bağlı olduğunu göstermektedir. Adezyon için taban malzemenin sertliği önemlidir. Sert bir taban malzeme, uygulanan yüke daha fazla direnç göstermektedir ve taban malzeme sertliği arttıkça kritik yük değeri de yükselmektedir. Kaplama öncesi yapılan nitrüleme işlemi ile daha sert bir yüzey oluşturulmuş ve böylece dupleks işlem görmüş numunelerin kritik yük değerlerinde artış görülmüştür.

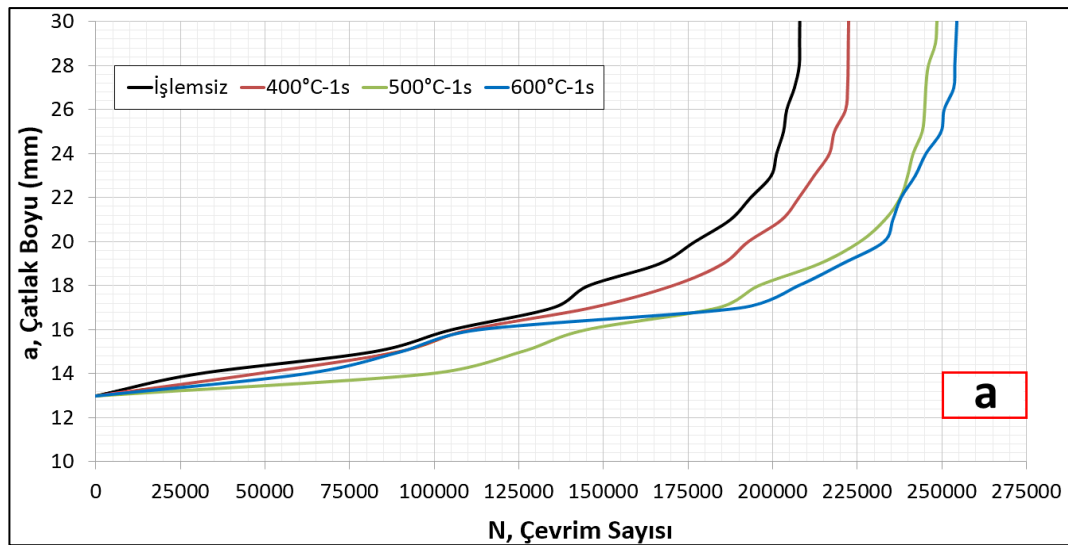
4.2. Yorulma Çatlak İlerlemesi Analizleri

Yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerlemesi üzerindeki etkilerinin incelemek için, işlemsiz ve yüzey işlemi uygulanmış AISI 4140 malzemeden üretilen CT numuneleri SGY ve DGY şartları altında yorulmaya maruz bırakılmışlardır. Yüzey işlemi uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme (YÇİ) ömürlerindeki değişim işlemsiz numunelerle karşılaştırılmıştır. YÇİ testleri sonuçları aşağıda her bir yükleme durumu ve her bir yüzey işlemi için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

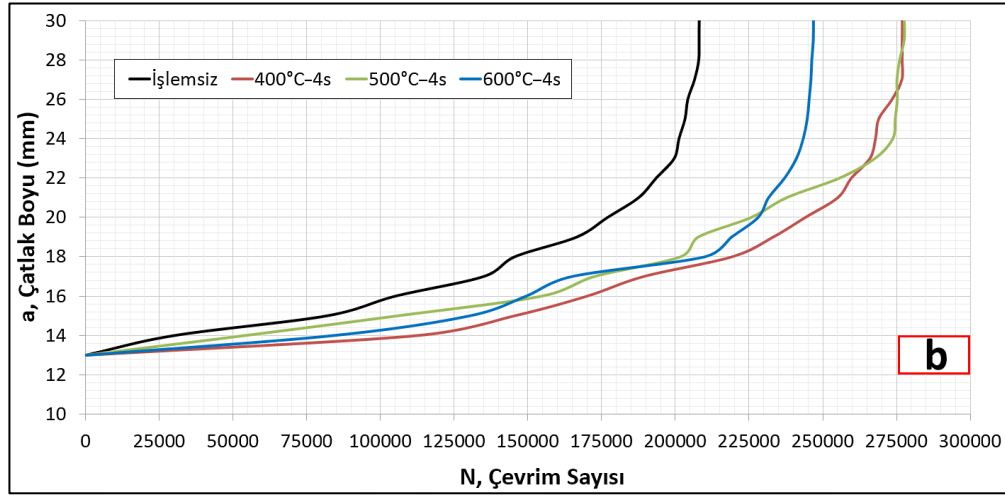
4.2.1. Sabit genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri

4.2.1.a. Plazma nitrürleme

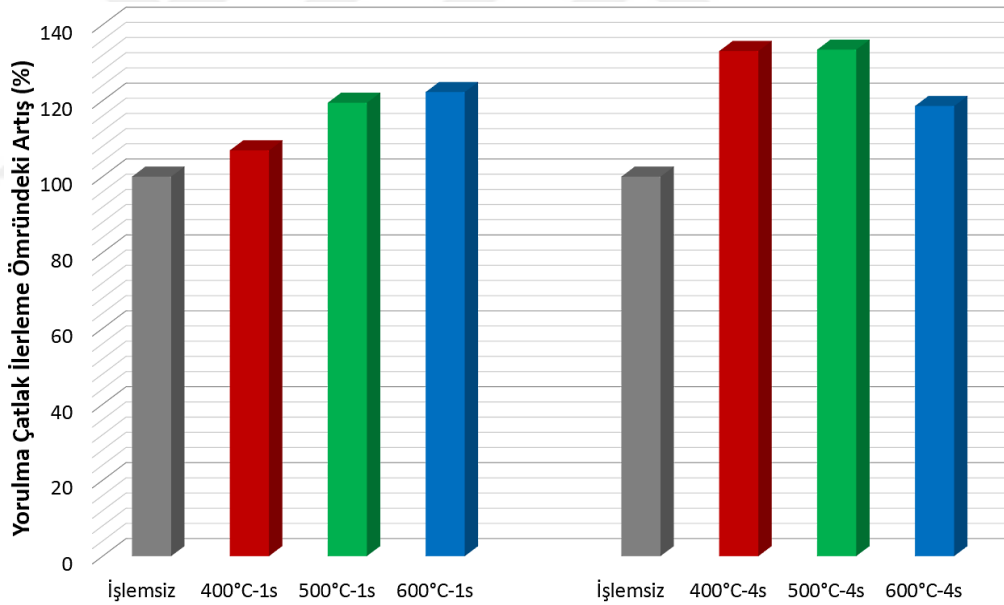
İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemelerin SGY altında yorulma çatlak ilerleme eğrileri (a, çatlak boyu-N, evrim sayısı) şekil 4.8 ve yorulma ömründeki yüzde artış grafiği şekil 4.9’da verilmiştir. İşlemsiz numune için yorulma çatlak ilerleme ömrü yaklaşık 208.000 (%100) evrim iken; çatlak ilerleme ömrü bir saatlik işlemler sonrasında 400, 500 ve 600°C sıcaklıklar için sırasıyla 222.450 (%107), 248.550 (%119) ve 254.400 (%122) evrim değerlerine ulaşmıştır. Dört saatlik plazma nitrürleme işlemleri sonrasında ise 400, 500 ve 600°C sıcaklıklar için sırasıyla 276.900 (%133), 277.650 (%133) ve 246.750 (%119) evrim değerleri elde edilmiştir. Buradan, plazma nitrürleme işlemi sonrasında malzemelerin yorulma çatlak ilerleme ömürlerinin arttığı görülmektedir ve maksimum ömür artışı 400 ve 500°C sıcaklıklarda dört saatlik nitrürleme süreleri sonunda elde edilmiştir. Bu ve bundan sonraki bölümlerde verilen Yİ mr grafiklerinde, işlemsiz malzemenin Yİ mr olan 208.000 çevrim sayısı değeri %100 kabul edilmiş ve diğer numunelerdeki yüzde ömür değişimleri bu değer referans alınarak hesaplanmıştır.



şekil 4.8. (devam)



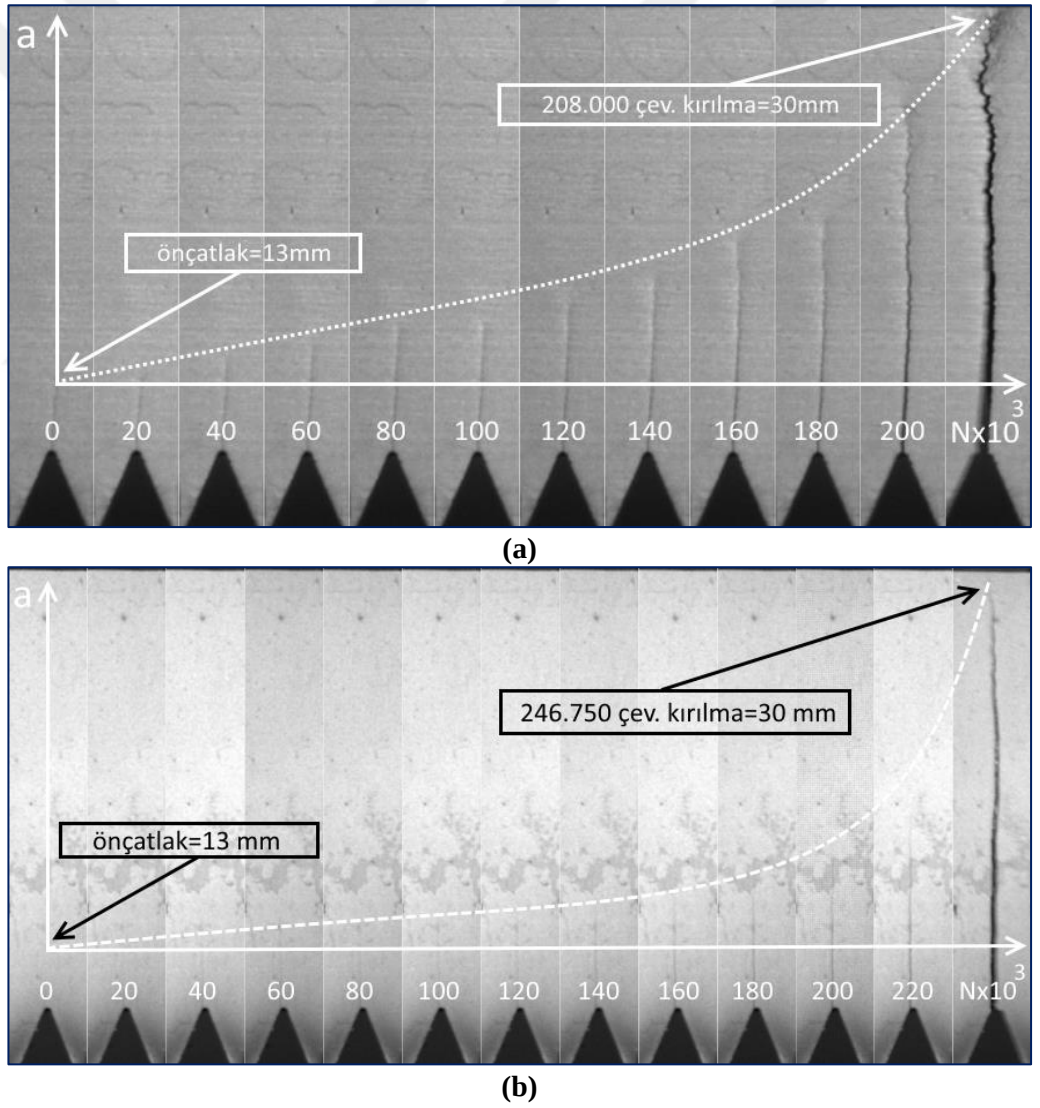
Şekil 4.8. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrileri, (a) 1 saat süre ile plazma nitrüleme ve (b) 4 saat süre ile plazma nitrüleme



Şekil 4.9. Plazma nitrüleme işleminin yorulma çatlak ilerleme ömrü üzerindeki etkisi

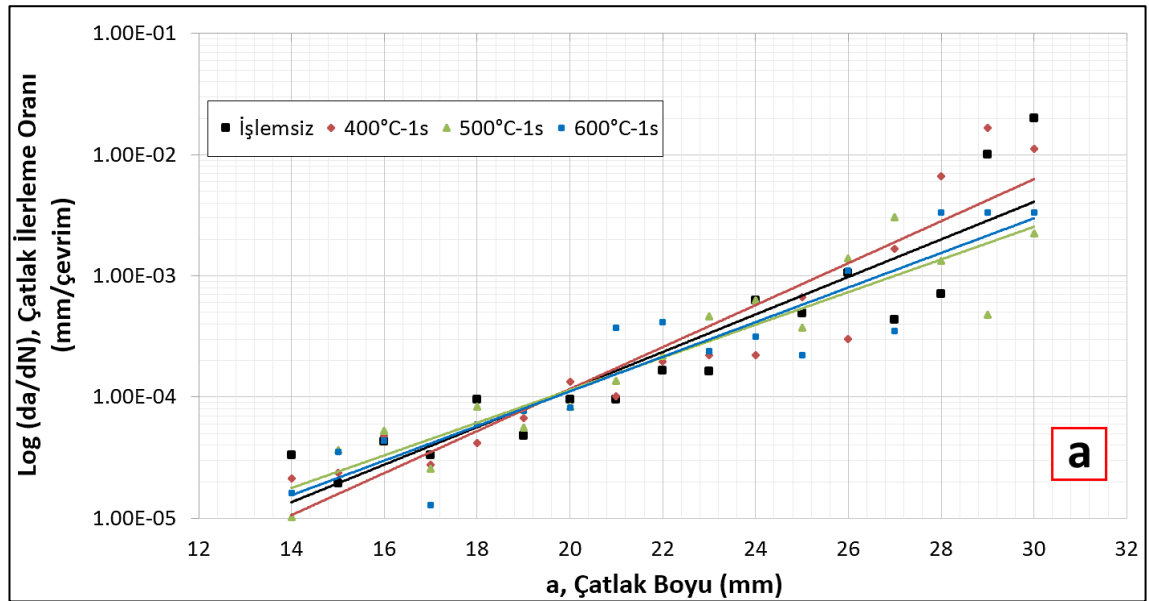
Plazma nitrüleme işlemi sonrasında YÇİ ömründe artış olması beklenen bir durumdur. Çünkü işlem sonrasında, yüzeyde oluşan demir nitrid fazları malzemenin kafes yapısında arayer atomu olarak yerleşerek kafes yapısının çarpılmasına ve bunun sonucunda da malzemenin yüzeyinde ve hemen yüzey altında sertlik artışına ve bası artık gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sertlik artışı ve bası artık gerilmeleri malzeme yüzeyindeki dislokasyon hareketini zorlaştırmaktadır. Engellenen

dislokasyon hareketi neticesinde ise malzemelerin hem yorulma çatlak başlangıç ömürleri hem de YÇİ ömürleri artış göstermektedir. Bu durum literatürde, yorulma ile ilgili farklı pek çok çalışmada gözlemlenmiş ve açıklanmıştır (Çelik and Karadeniz 1995; Sirin *et al.* 2008; Şengül and Çelik 2011). Çizelge 4.1’den görüleceği üzere, gerçekleştirilen çalışmada da farklı plazma nitrüleme işlem süreleri ve sıcaklıkları için sertlik ve artık gerilmelerin arttığı ve bu durum sonucunda ise YÇİ ömrünün arttığı görülmektedir (Şekil 4.9). Ayrıca, plazma nitrüleme işlemi sonrasında YÇİ ömründeki artış, deney sırasında alınan görüntüler düzenlenerek Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

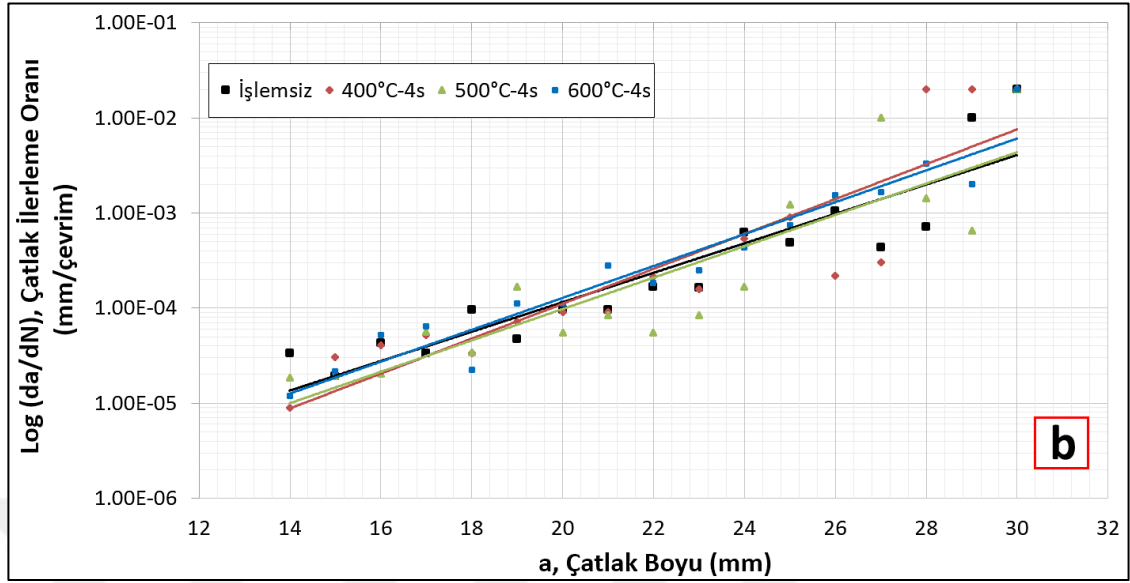


Şekil 4.10. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde çatlak ilerleme görüntüleri
(a) İşlemsiz numune ve (b) 600°C-4 saat plazma nitrülenmiş numune

Plazma nitrüleme işlemi sonrasında tüm numunelerde YÇİ ömründe artış gözlenmesine rağmen burada dikkat çeken nokta, bu artışın artan yüzey sertliği ve artık gerilme değerleri ile orantılı olmamasıdır. Bir saatlik işlemler sonrasında YÇİ ömründe sürekli bir artış gözlemlenmiştir. Fakat 500 ve 600°C sıcaklıklar için elde edilen ömür artışı değerleri birbirine oldukça yakındır. Dört saatlik işlemler sonrasında ise 400 ve 500°C işlem sıcaklıklarında birbirine çok yakın ve 600°C'lik işlem sıcaklığından daha fazla ömür artışı elde edilmiştir. Bu durum Şekil 4.11'de verilen çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrilerinde de açıkça görülmektedir. Çizelge 4.1'de gösterildiği üzere artan işlem sıcaklığı ve süresi ile bası artık gerilmeleri ve sertlik değerleri artmış ve en yüksek değerler 600°C ve dört saatlik plazma nitrülenmiş numuneden elde edilmiştir. Teorik olarak artık gerilme ve mikrosertlik değeri arttıkça YÇİ ömrünün de doğru orantılı olarak artması ve en yüksek YÇİ ömrünün 600°C ve dört saatlik numuneden elde edilmesi beklenmektedir. Ancak en yüksek yüzey sertliği ve artık gerilme değerine sahip olan 600°C sıcaklık ve dört saat süre ile nitrülenmiş numunenin YÇİ ömründeki artış diğer dört saat nitrülenmiş numunelerden daha azdır. Bu durum, plazma nitrüleme sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan mekanik, metalürjik ve kimyasal değişimler ile ilişkilendirilerek ilerleyen bölümde açıklanmıştır.



Şekil 4.11. (devam)



Şekil 4.11. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları

(a) 1 saat süre ile plazma nitrüleme ve (b) 4 saat süre ile plazma nitrüleme

XRD analizlerinde belirtildiği üzere; plazma nitrüleme işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan tabakalar, işlem sıcaklıkları ve sürelerine bağlı olarak kompozisyonel olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca Çizelge 4.1'den, beyaz tabaka kalınlıklarının artan işlem sıcaklığı ve süresi ile doğru orantılı olarak arttığı ve mekanik özellikler bakımından da farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu mekanik ve kompozisyonel farklılıklar, YÇİ ömürlerindeki orantısızlığı açıklar niteliktedir. Çünkü Şengül ve Çelik (Şengül and Çelik 2011), plazma ile nitrülenmiş malzemelerin YÇİ davranışını inceledikleri çalışmada, plazma nitrüleme sonrasında yüzeyde oluşan tabakalar ve taban malzeme arasında mekanik özellikler bakımından uyumsuzluk oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Şengül ve Çelik (Şengül and Çelik 2011), De la Cruz ve arkadaşları (De la Cruz *et al.* 1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmayı referans göstererek: plazma ile nitrülenmiş malzemede, yüzeyde oluşan tabakalar ve taban malzeme arasındaki kırılma tokluğu (K_{IC}) farklılığından dolayı işlem görmüş numunelerin kompozit malzeme gibi davranacağını belirtmişlerdir. Bu durum gerçekleştirdiğimiz çalışma için de geçerlidir. Yüzeyde oluşan tabakalar ve taban malzemenin mekanik özelliklerinin birbirinden farklı olmasından dolayı, her bir numune kompozit malzeme olarak düşünülebilir ve bu yapılar deney esnasında lineer elastik yüklemelere maruz

kalmaktadırlar. YÇİ testleri esnasında uygulanan kuvvetler neticesinde, taban malzeme ve tabakalarda eşit şekil değişimi oluşmaktadır. Plazma nitrüleme sonrasında oluşan tabakalarda, yüksek sertlik ve artık gerilme değerlerinden de anlaşılabileceği üzere taban malzemedan daha fazla gerilme oluşacaktır; yani tabakalar taban malzemedan daha fazla yük taşıyacaktır. Oluşan bu gerilmeler ise, nitrüleme sonrasında yüzeyde oluşan tabakaların kırılarak malzemenin beklenenden daha az YÇİ ömrü göstermesine sebep olmaktadır. Ayrıca XRD analizlerinde, nitrüleme işlemi sonrasında elde edilen beyaz tabakaların ϵ ve γ' fazlarını içerdiği belirlenmiştir. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında oluşan ve ϵ (HSP) ve/veya γ' (YMK) nitrür fazlarından oluşan beyaz tabaka çok küçük yükler altında dahi kırılğan özellik göstermektedir. Özellikle de bu fazlardan her ikisini birlikte içeriyorsa kendisini oluşturan fazların kafes yapılarının farklı olmasından dolayı tek fazdan oluşması durumuna göre daha da kırılğan özellik göstermektedir. Bu durum braunite (α -ferrit+ γ' -Fe₄N) tabakası için de geçerlidir ve bu tabaka da çok kırılğan özelliktedir. Bunlarla birlikte beyaz tabaka kalınlığı ve sertliği arttıkça, tabakanın gevrekliği ve kırılğanlığının da arttığı farklı çalışmalarda belirtilmiştir (Höck *et al.* 1995; Çelik and Karadeniz 1996; Kwietniewski *et al.* 2004).

Plazma nitrüleme işlemi için bu özellikler dikkate alındığında; işlem sıcaklıkları ve sürelerine bağlı olarak mekanik özelliklerin arttığı ancak bununla birlikte yapıların kırılğanlıklarının da arttığı söylenebilir. Öne sürülen bu teori, YÇİ eğrilerinden ve yüzde ömür değişimlerinden elde edilen verileri destekler niteliktedir. Bir saatlik işlemler için, en yüksek sertlik ve artık gerilme değerine sahip olan 600°C nitrülenmiş numune, diğer numunelerden daha kalın beyaz tabakaya sahiptir ve diğer tabaklardan farklı olarak braunite tabakasını içermektedir. Bu durum yapının mekanik özelliklerinin artmasının yanında YÇİ ömrünün azalmasına ve 500°C nitrülenmiş numuneye yakın YÇİ ömrünün elde edilmesine sebep olmaktadır. Benzer şekilde dört saatlik işlem süreleri için; artan beyaz tabaka kalınlığına bağlı olarak 500°C nitrülenmiş numunede, 400°C nitrülenmiş malzeme ile neredeyse aynı YÇİ ömrü elde edilmiştir. 600°C nitrülenmiş numune ise en yüksek sertlik ve artık gerilme değerlerine sahip olmasına rağmen; yapısında bulunan braunite fazı, yüksek beyaz tabaka kalınlığı ve yüksek tabaka sertliğinden dolayı hem dört saat nitrülenmiş numunelerden hem de 600°C bir

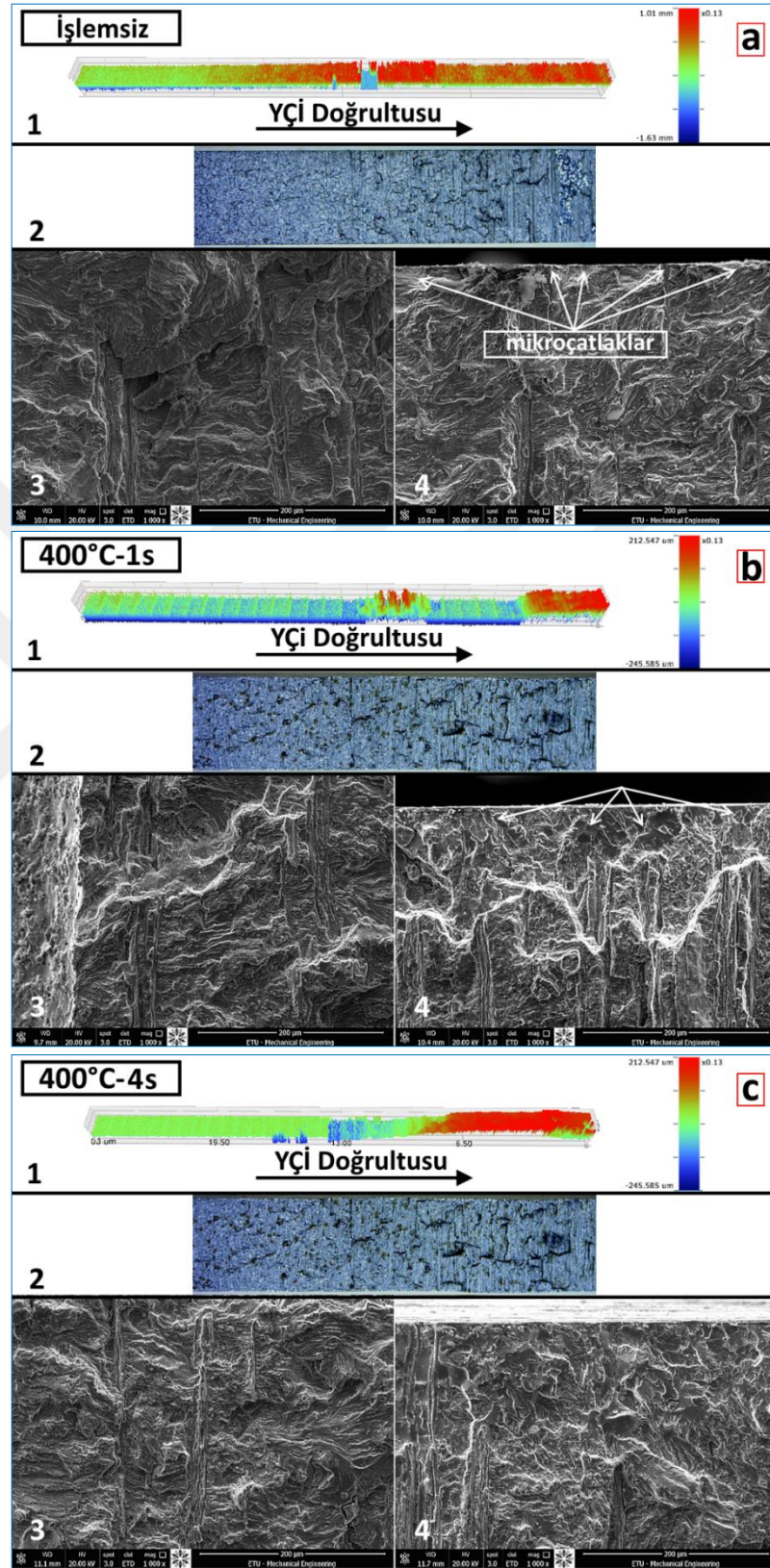
saat nitr rl nmiş numunelerden daha düşük Y    ömrüne sahiptir. Plazma nitr rl nmiş numunelerde Y    ömrünü etkileyen bu durumlar, testler sonrasında elde edilen kırılma yüzeylerinde gerçekleştirilen fraktografik incelemeler ile de desteklenmektedir.

şekil 4.12’de testler sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan üç boyutlu yüzey profili (3D), SEM ve optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Her bir şekil için; 1 numaralı görüntüler kırılma yüzeyi boyunca alınan 3D görüntüleri, 2 numaralı görüntüler kırılma yüzeyinin optik mikroskoptan alınan görüntülerini, 3 numaralı görüntüler yorulma çatlak başlangıcı görüntülerini ve 4 numaralı görüntüler ise kararlı Y    bölgesinde, numunelerin kenar kısımlarından alınan görüntüleri göstermektedir. Bir ve dört saatlik işlem süreleri için 3D ve optik görüntüleri incelendiğinde numunelerde Y    olayının; çatlak başlangıcı, kararlı çatlak ilerlemesi, hızlı/kararsız çatlak ilerlemesi ve son kırılma aşamalarından meydana geldiği görülmektedir. Bütün numunelerde, çatlak başlangıç bölgelerinin büyüklükleri neredeyse eşittir. Ancak artan işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak Y    bölgelerinin büyüklükleri değişkenlik göstermiştir. Ayrıca 3D görüntülerinden de görüleceği üzere, bütün numunelerde özellikle çatlak başlangıç ve kararlı çatlak ilerleme bölgelerinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri çok düşük değerlere sahiptir. Ancak hızlı çatlak ilerlemesi ve kırılma bölgelerinde pürüzlülük değerleri artmıştır. Bununla birlikte, bu bölgelerdeki pürüzlülük değerleri artan işlem sıcaklığı ve süresi ile artış göstermiştir.

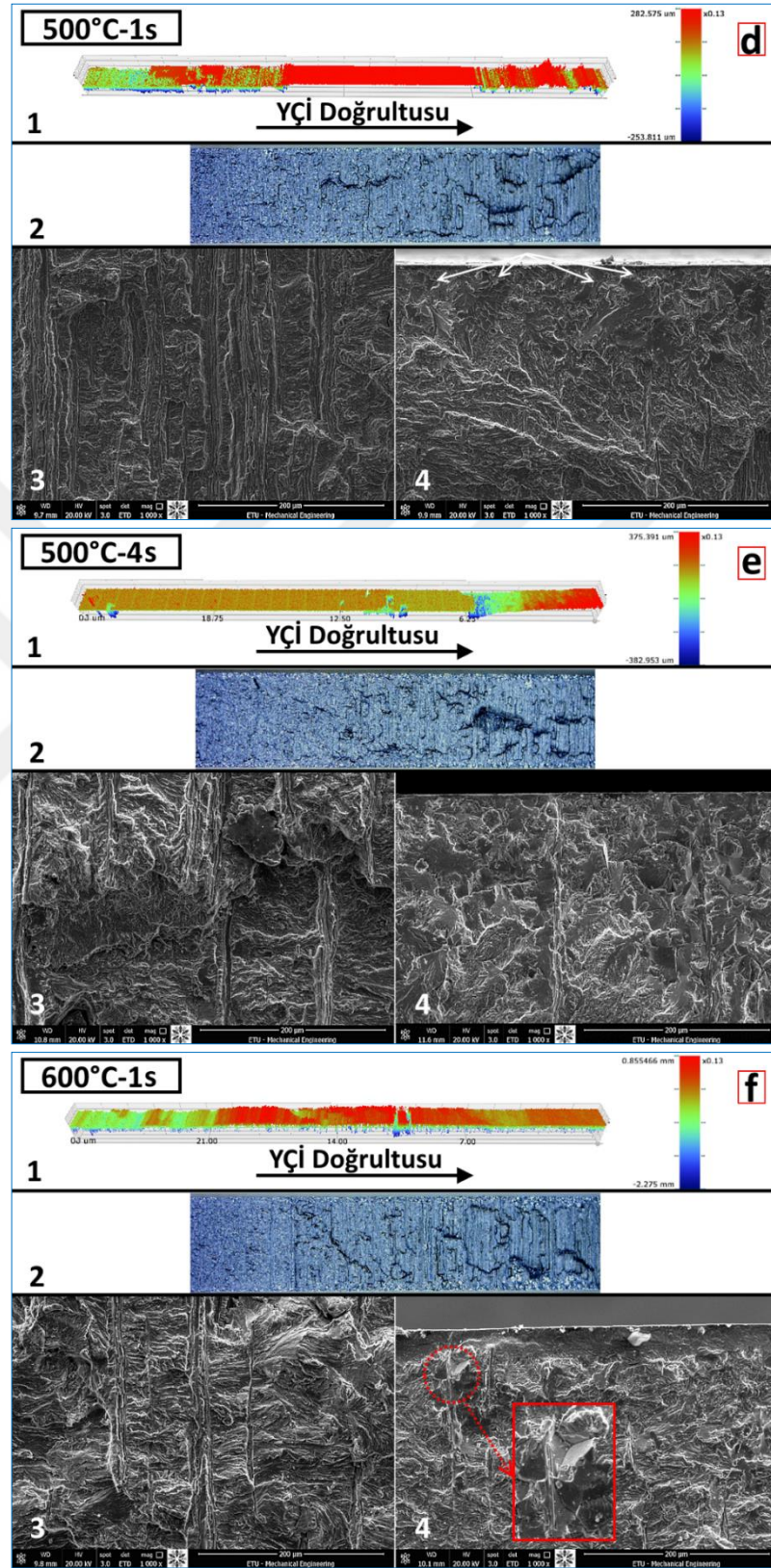
Yorulma  atlak başlangıcı ve ilerleme aşamalarını gösteren SEM görüntülerinden görüleceği üzere (3 ve 4), bütün numuneler transgranüler kırılma davranışı göstermişlerdir. Bu olay literatürde de gözlemlenmiştir ( elik and Karadeniz 1996; De la Cruz *et al.* 1998). Bununla birlikte, numuneler lineer elastik şartlarda Y    testlerine tabi tutulmasına rağmen işlemsiz malzemenin sünek yapısından dolayı; işlemsiz numunede bazı lokal sünek kırılma bölgelerine rastlanmıştır. Ancak, işlemsiz malzeme genel olarak gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Artan plazma nitrürleme süresi ve sıcaklığı ile birlikte gevrek kırılma eğilimi artmıştır (şekil 4.12, 4 numaralı resimler). Özellikle de 600 C dört saat nitr rl nmiş numune, oluşan nehir izlerinden (river line)’de görüleceği üzere transgranüler gevrek kırılma davranışı sergilemiştir (şekil

4.12,g, 4 numaralı resim). Plazma nitrürleme işlemi sonrasında oluşan yüzey tabakaları ve taban malzeme bir bütün olarak düşünüldüğünde kırılma karakterinin transgranüler olduğu gözlemlense dahi burada bir diğer dikkat çekici nokta, nitrür tabakasının kırılma karakteridir. Taban malzemedan farklı olarak plazma nitrürleme sonrasında oluşan tabakalar; yapısında oluşan demir nitrür fazlarının tane sınırlarında çökelerek kırılma eğilimiye sebep olması nedeniyle, intergranüler kırılma davranışı göstermiştir (Şekil 4.12-f, 4 numaralı resim).

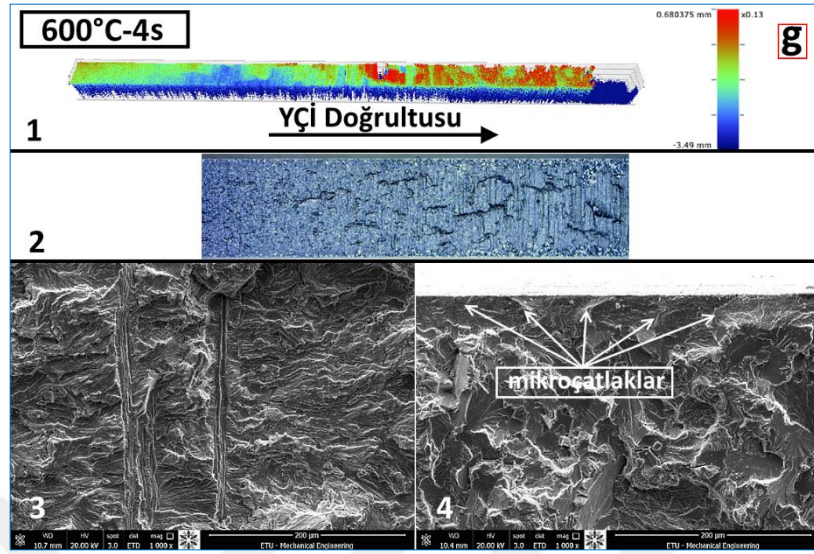
Numunelerin YÇİ aşamalarından alınan SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.12, 4 numaralı resimler), işlemsiz numunelerin kenar kısımlarında birden fazla noktada mikro çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Oluşan bu mikro çatlaklar, numunenin çatlak ilerleme doğrultusundaki makro çatlak ilerlemesine ek olarak YÇİ ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. 4 numaralı resimlerden de görüleceği üzere; plazma ile nitrürleme işleminden sonra oluşan beyaz tabakalar, braunite tabakaları ve difüzyon tabakalarının bu mikro çatlak başlangıçları için engel oluşturmaktadır. Ancak bu olumlu etkinin yanı sıra, artan beyaz tabaka ve braunite tabakası kalınlığı ve mekanik özelliklerine bağlı olarak, bu tabakalarda kırılmalar gözlemlenmiştir (Şekil 4.12-g, 4 numaralı resim). Ayrıca, plazma nitrürleme işlemi sonrasında yüzeyde oluşan sert tabakalar; yüzeyde oluşması gereken tekrarlı kayma olayını engelledikleri için (Alsaran *et al.* 2004), sert nitrür tabakalarının hemen altında ikincil çatlak oluşumlarına sebep olmuştur (Şekil 4.12-b ve d). Bu iki durum, plazma nitrürlemenin oluşturduğu olumlu etkiden daha baskındır ve 500°C dört saat, 600°C bir ve dört saat nitrürlenmiş numunelerin beklenenden daha düşük YÇİ ömrü göstermesini açıklar niteliktedir.



Şekil 4.12. (devam)



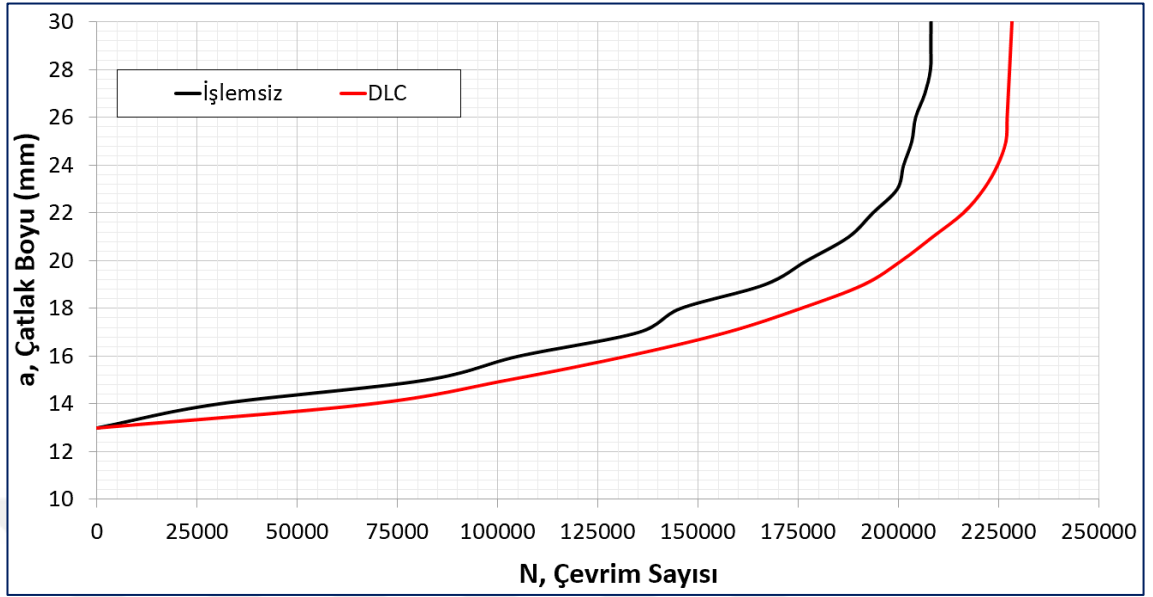
Şekil 4.12. (devam)



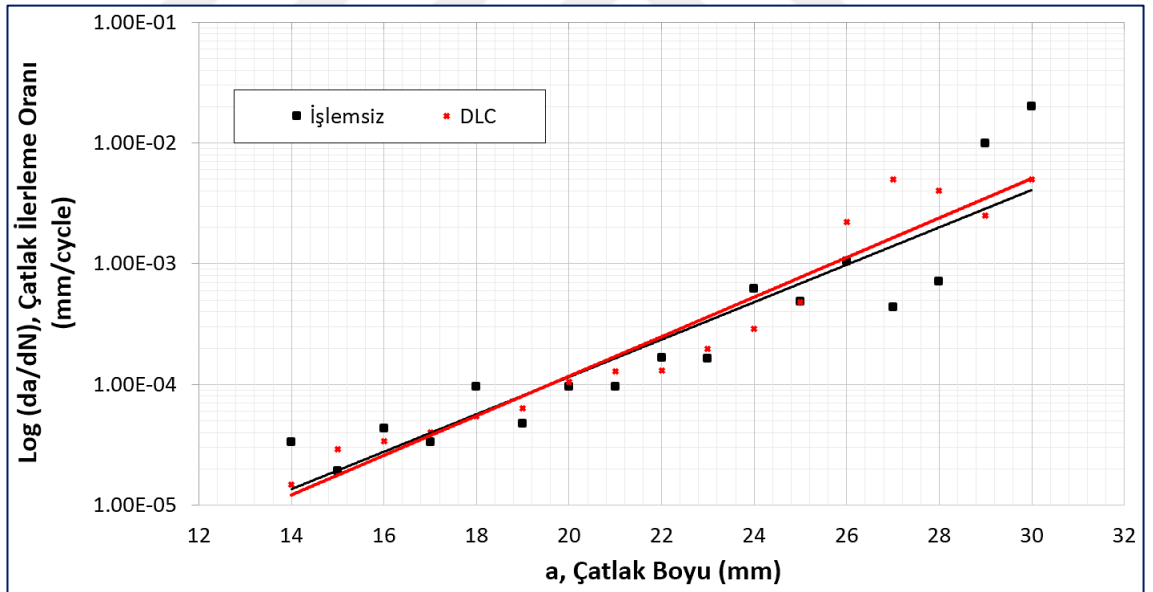
Şekil 4.12. Yorulma çatlak ilerlemesi testleri sonrasında kırılma yüzeylerinden elde edilen görüntüler;
 (a) işlemsiz, (b) 400°C-1s, (c) 400°C-4s, (d) 500°C-1s, (e) 500°C-4s, (f) 600°C-1s ve (g) 600°C-4s plazma nitrülenmiş numune

4.2.1.b. DLC kaplama

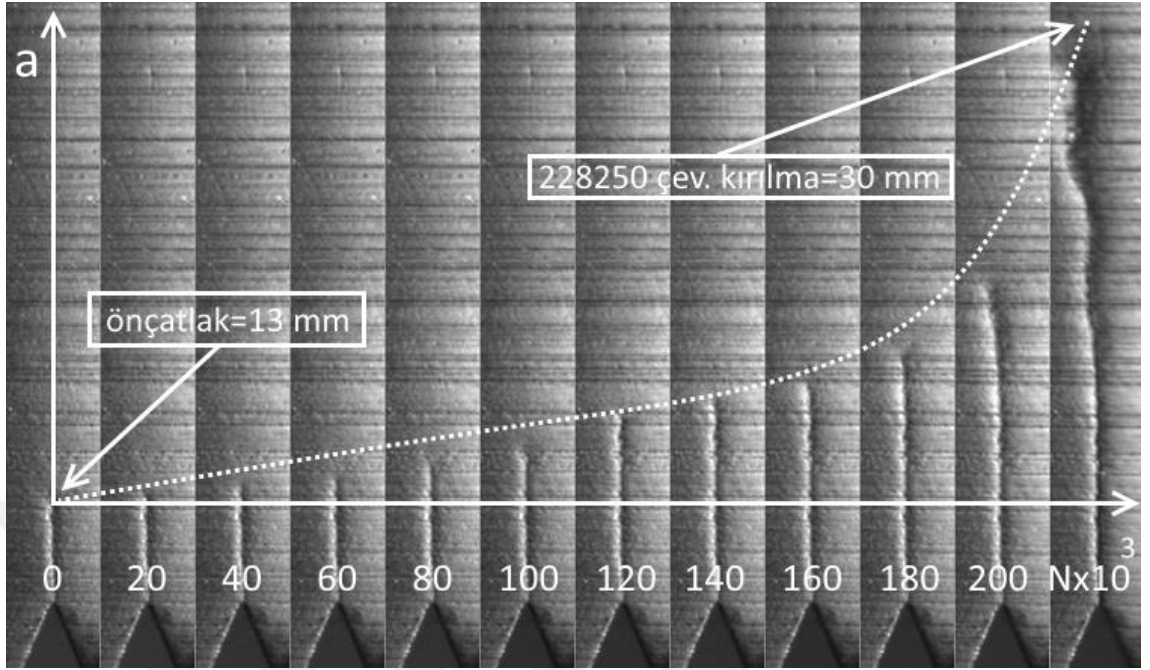
İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin SGY altında yorulma çatlak ilerleme eğrileri (a, çatlak boyu-N, çevrim sayısı) Şekil 4.13'te verilmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere işlemsiz numune için yaklaşık YÇİ ömrü 208.000 çevrim iken, DLC kaplama sonrasında YÇİ ömrü 228.250 çevrim değerine ulaşmıştır. İşlemsiz numune için elde edilen ömür %100 olarak kabul edildiğinde, DLC kaplama işlemi sonrasında malzemenin YÇİ ömrü işlemsiz numuneye oranla %9 oranında artmıştır. YÇİ ömründeki bu artışa bağlı olarak, DLC kaplanmış malzemenin, yorulma çatlak ilerleme hızı/oranı işlemsiz malzemeye göre azalmıştır (Şekil 4.14). Ayrıca, DLC kaplanmış numunenin yorulma çatlak ilerlemesi esnasındaki görüntüsü Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.13. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrileri



Şekil 4.14. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları

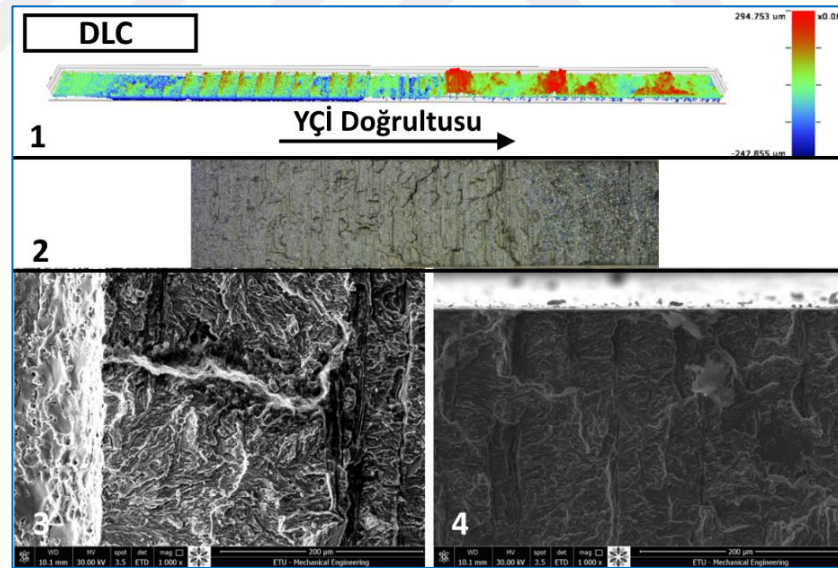


Şekil 4.15. DLC kaplanmış numunenin yorulma çatlak ilerleme görüntüsü

DLC kaplanmış malzemelerde yorulma ömrünün (“stress life”) işlemsiz malzemelere oranla artması çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda, DLC filmin yüksek sertliğe sahip olması ve malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşturmasının yorulma ömrünü artırdığı gözlemlenmiştir (Baragetti *et al.* 2009; Puchi-Cabrera *et al.* 2010). Bu durum yorulma çatlak ilerleme ömrü içinde geçerlidir (Costa *et al.* 2011). Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi, DLC film yüksek sertliğe sahiptir ve malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşturmuştur. Yüksek yüzey sertliği ve bası artık gerilmeleri sebebiyle DLC film, yüzeydeki dislokasyon hareketini ve bu hareket sonucunda oluşacak yüzey çatlaklarının oluşumunu engelleyerek malzemenin yorulma çatlak ilerleme ömrünü artırmıştır. Bu durum kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan incelemeler ile de doğrulanmıştır.

Şekil 4.16’da testler sonrasında numunelerin kırılma yüzeyi boyunca alınan 3D (1 numaralı görüntü), optik mikroskop (2 numaralı görüntü) ve SEM (3 ve 4 numaralı görüntüler) görüntüleri verilmiştir. 3 numaralı görüntü yorulma çatlak başlangıcını ve 4 numaralı görüntüler ise kararlı YÇİ bölgesini göstermektedir. 3D ve optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde numunelerde kırılma olayının yorulma çatlak başlangıcı,

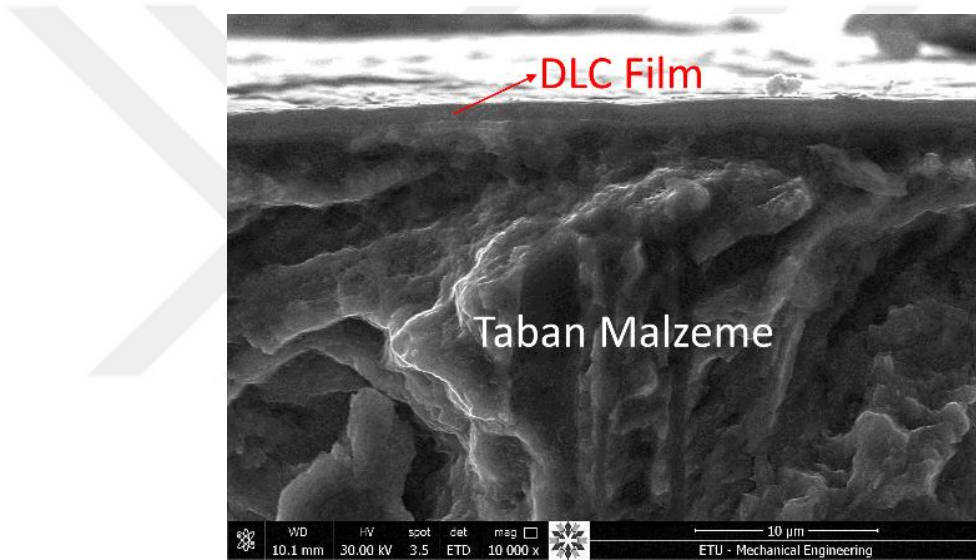
kararlı çatlak ilerlemesi, hızlı/kararsız çatlak ilerlemesi ve son kırılma aşamalarından meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca 3D görüntüsünde gösterildiği üzere, özellikle çatlak başlangıcı ve kararlı çatlak ilerleme bölgelerinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri çok düşük değerlere sahiptir. Ancak hızlı çatlak ilerlemesi ve kırılma bölgelerinde pürüzlülük değerleri artmıştır. Bu bakımdan DLC kaplanmış numunenin yorulma çatlak ilerleme davranışı Şekil Şekil 4.12-a'da gösterilen işlemsiz numunenin davranışı ile benzerlikler göstermiştir. DLC kaplanmış numunede de gevrek kırılma davranışı gözlemlenmiştir. Bunlarla birlikte daha önce de belirtildiği üzere, işlemsiz numunelerde malzeme yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar, çatlak ilerleme doğrultusundaki makro çatlak ilerlemesine ek olarak YÇİ ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Kaplanmış numunelerde ise DLC film, bu yüzey mikro çatlakların oluşumunu engelleyerek yorulma çatlak ilerleme ömrünü artırıcı yönde etki etmiştir (Şekil 4.16, 4 numaralı görüntü).



Şekil 4.16. DLC kaplanmış numunede yorulma çatlak ilerlemesi sonrasında kırılma yüzeyinden elde edilen görüntüler

DLC kaplanmış malzemelerde yorulma ömründeki artışa sebep olan yüksek yüzey sertliği ve yüzeyde oluşan bası artık gerilmelerine ek olarak, yorulma ömrü üzerinde etkili olan diğer parametreler filmin yapısı/morfolojisi ve film-taban malzeme arasındaki adezyondur. DLC filmlerde malzemelerin yorulma ömrünün artması için

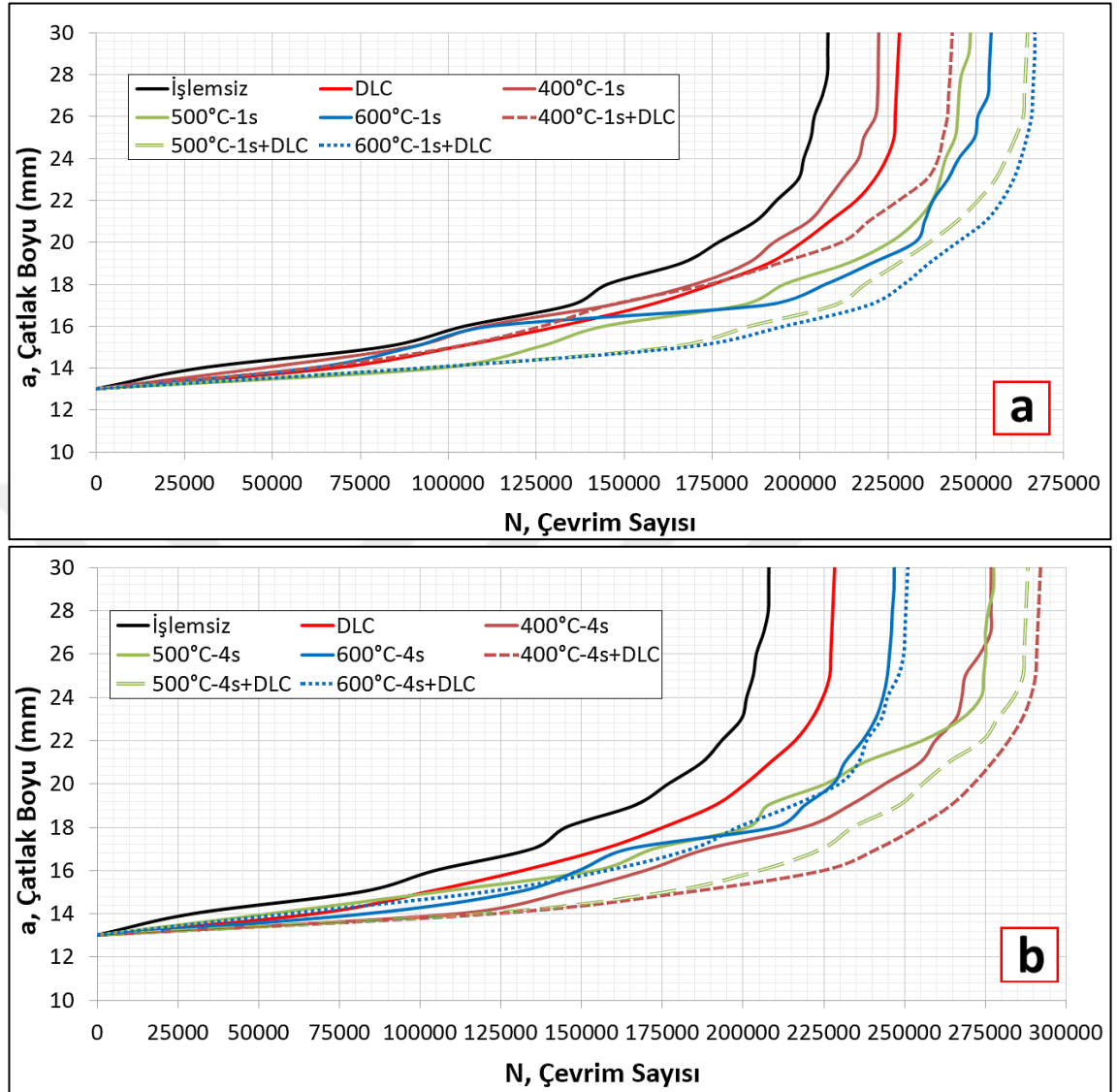
filmin hata içermemesi, homojen olması (Baragetti *et al.* 2009; Uematsu *et al.* 2010; Uematsu *et al.* 2011) ve taban malzemeye yüksek bir adezyonla bağlanmış olması gerekmektedir (Baragetti *et al.* 2009; Puchi-Cabrera *et al.* 2010). Şekil 4.17’de DLC filmin kararlı çatlak ilerlemesi bölgesinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Buradan görüleceği üzere, DLC film oldukça homojen yapıdadır ve filmin yapısında herhangi bir mikro çatlak veya hata bulunmamaktadır. Ayrıca, çatlak ilerlemesi esnasında filmin taban malzemeden ayrılmamış olması, film-taban malzeme arasındaki adezyonunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.17. DLC filmin kararlı çatlak ilerleme bölgesindeki SEM görüntüsü

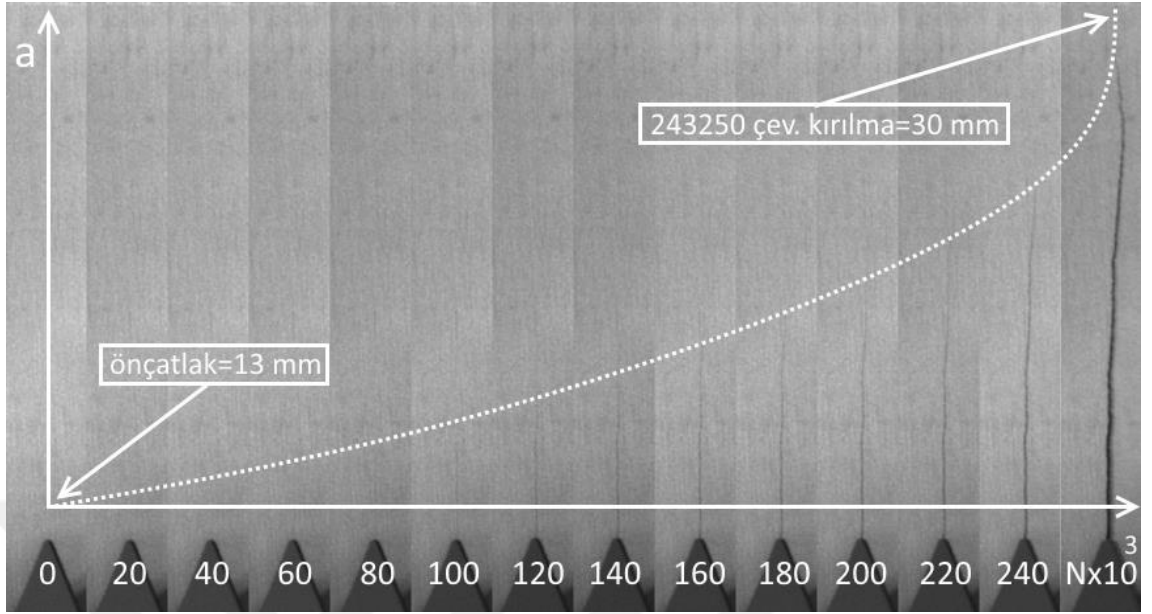
4.2.1.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması

Plazma nitrürlenmiş, DLC kaplanmış ve dupleks yüzey işlemi uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi eğrileri (a-N) bir ve dört saatlik işlem süreleri için Şekil 4.18’de verilmiştir. Ayrıca, dupleks işlem görmüş numuneye ait örnek YÇİ görüntüsü Şekil 4.19’da verilmiştir. Şekil 4.18’den, dupleks yüzey işlemi uygulanmış numunelerin, sadece plazma nitrürlenmiş numunelerden ve DLC kaplanmış numunelerden daha fazla YÇİ ömrüne sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrileri

(a) 1 saat süre ile plazma nitrülenmiş ve DLC kaplanmış numuneler ve (b) 4 saat süre ile plazma nitrülenmiş ve DLC kaplanmış numuneler

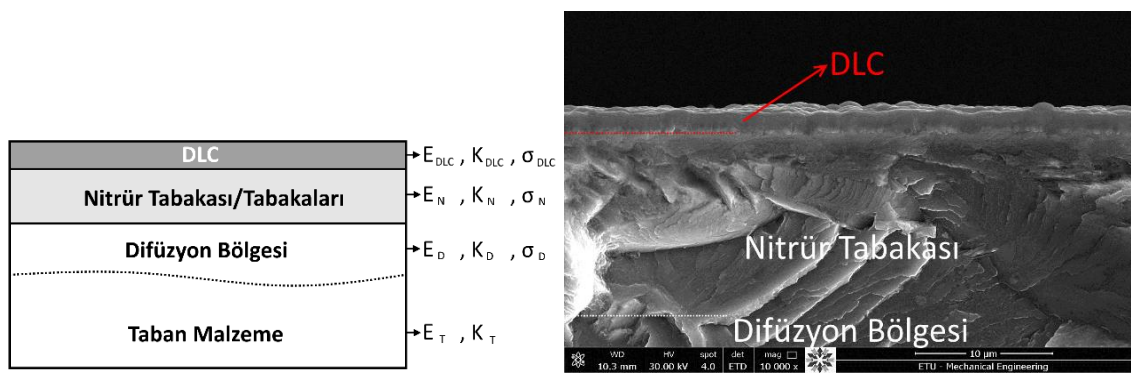


Şekil 4.19. Dupleks yüzey işlemleri uygulanmış numunenin yorulma çatlak ilerleme görüntüsü (400°C-1s+DLC)

İnce film kaplanmış (Puchi-Cabrera *et al.* 2004; Morita *et al.* 2008a; Morita *et al.* 2008b; Baragetti *et al.* 2009; Puchi-Cabrera *et al.* 2010; Uematsu *et al.* 2010; Costa *et al.* 2011; Uematsu *et al.* 2011; Yıldız *et al.* 2013) ve dupleks yüzey işlemleri uygulanmış (Baragetti *et al.* 2009; Morita *et al.* 2012; Morita *et al.* 2013; Yonekura *et al.* 2015) malzemelerin yorulma dayanımlarının işlemsiz numunelere oranla artması literatürde çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda özellikle malzeme yüzeyinde oluşan sert tabakaların ve artık gerilmelerin, malzemelerin yorulma ömrünü artırıcı yönde etki ettiği belirtilmiştir. YÇİ için de bu etkiler geçerlidir ve gerçekleştirilen çalışmada, dupleks yüzey işlemleri uygulanmış numunelerde hem plazma nitrürlenmiş hem de DLC kaplanmış numunelerden daha yüksek YÇİ elde edilmesinin sebebi dupleks yüzey işleminin oluşturduğu kümülatif etkidir. Plazma nitrürlenmiş ve DLC kaplanmış numunelerin SGY altında çatlak ilerlemesinde bahsedildiği üzere, YÇİ ömrünün artmasına sebep olan parametreler; bu işlemler sonrasında yüzeyde oluşan tabakalar, artan yüzey sertliği ve artık gerilmelerdir.

Dupleks işlem sonrasında işlemsiz numune üzerinde Şekil 4.20’de gösterilen yüksek sertliğe sahip çok tabakalı bir yapı oluşmuştur. Oluşan tabakalı yapı, sadece DLC

kaplanmış ve sadece plazma nitrürlenmiş numunelerde oluşan yüzey ve yüzey altı tabakalarının toplamı olarak düşünülebilir. Bu bakımdan, oluşan tabakalı yapı, yüzeyde oluşan dislokasyon hareketleri için DLC filminden ve plazma nitrüleme sonucunda oluşan tabakaların etkisinden daha fazla etki ederek malzemede maksimum YÇİ ömrü elde edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, YÇİ ömrü üzerinde etkili olan diğer parametre yüzeyde oluşan artık gerilmelerdir. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında oluşan artık gerilmeler σ_N , DLC kaplama sonrasında oluşan gerilmeler σ_{DLC} olmak üzere, malzeme yüzeyinde sadece nitrüleme işlemi için σ_N ve sadece DLC kaplama işlemi için σ_{DLC} bası artık gerilmeleri yorulma üzerinde etkilidir. Bunun yanında, artık gerilmeler elastik gerilmelerdir ve süperpozisyon ilkesine göre toplanabilmektedir. Bu bakımdan, dubleks işlem uygulanmış malzemelerde her iki işlem neticesinde oluşan artık gerilmelerin toplamı kadar bir etki oluşmaktadır ($\sigma_N + \sigma_{DLC}$). Bu sebeple de, dubleks işlem uygulanmış malzemenin YÇİ ömrü sadece plazma nitrürlenmiş ve sadece DLC kaplanmış malzemeden daha yüksektir. Ayrıca, Şekil 4.20’de gösterilen tabakalı yapı incelendiğinde, DLC filmin nitrür tabakası üzerinde herhangi bir ayrılma olmaksızın bağlandığı ve homojen yapıda olduğu görülmektedir. İnce filmin adezyonu ve homojen oluşu da YÇİ ömrünün artmasına katkıda bulunmuştur (Baragetti *et al.* 2009; Puchi-Cabrera *et al.* 2010).

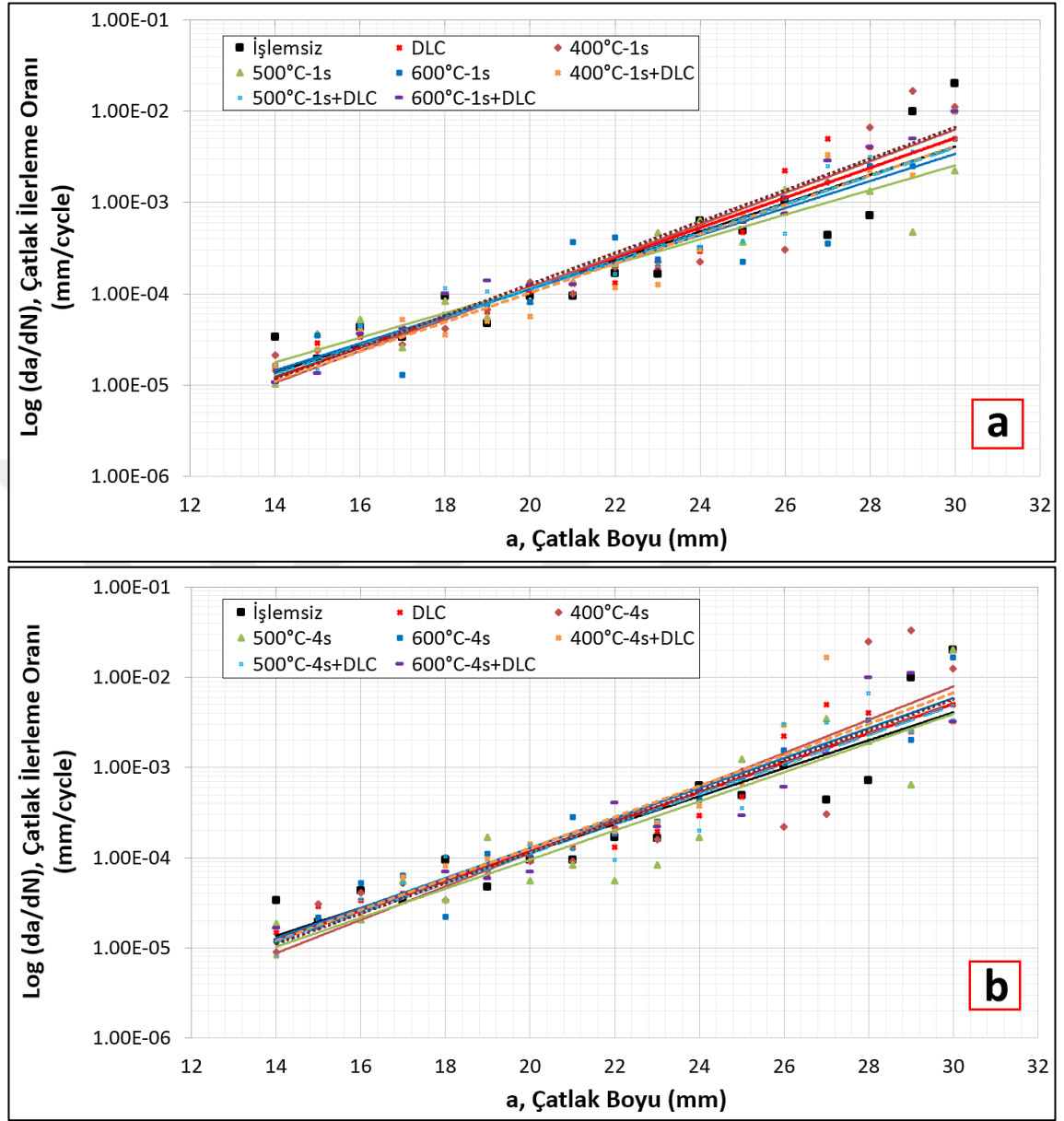


Şekil 4.20. Dubleks yüzey işlemi sonrasında oluşan yapıların şematik gösterimi ve dubleks işlem uygulanmış (600°C-1s + DLC) numunenin kırılma kesiti

Yüzey işlemleri uygulanmış malzemelerden elde edilen a-N değerlerinden elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı (hızı)-çatlak boyu (da/dN-a) grafikleri Şekil 4.21’de

verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, dubleks yüzey işlemi uygulanması sonucunda çatlak ilerleme hızı işlemsiz, plazma nitrülenmiş ve DLC kaplanmış numunelere oranla azalmıştır. Şekil 4.18 ve Şekil 4.21 birlikte incelendiğinde bütün numunelerin 13-26 mm arasında kararlı, 26-30 mm arasında ise kararsız/hızlı çatlak ilerleme davranışı sergilediği görülmektedir. Burada, kararlı çatlak ilerleme bölgesinin de kendi içerisinde iki kısma ayrıldığı görülmektedir; 19-26 mm arasındaki çatlak ilerleme oranı 13-19 mm arasındaki çatlak ilerleme oranından çok daha yüksektir. Buradan hareketle, yüzey işlemlerinin numunelerin çatlak ilerleme oranları üzerindeki etkisi incelemek amacıyla çatlak ilerleme oranlarındaki değişim, çatlak boyu dikkate alınarak 3 bölgeye ayrılmış ve bu bölgelerden elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kararlı çatlak ilerleme bölgesi (13-26 mm) için genel olarak; plazma nitrülenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranlarının işlemsiz numuneye oranla azaldığı ve özellikle de uygulanan dubleks yüzey işlemi yorulma çatlak ilerleme oranını hem DLC kaplanmış hem de plazma nitrülenmiş malzemeye oranla daha da düştüğü söylenebilir. Yüzey işlemleri özellikle kararlı çatlak ilerleme bölgesinin başlangıcında (13-19 mm), diğer bölgelerden çok daha etkilidir. Bunlarla birlikte, kararlı çatlak ilerlemesi bölgesinin 19-26 mm’lik kısmı ve kararsız çatlak ilerleme (26-30 mm) bölgesinde, yüzey işlemi uygulanmış numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları arasında işlem parametreleri bakımından herhangi bir orantı bulunmamaktadır.

Ayrıca, uygulanan yüzey işlemlerinin çoğu bu bölgelerde işlemsiz numuneye kıyasla yorulma çatlak ilerleme oranının artmasına sebep olmuştur. Buradan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki yüzey işlemleri; numunelerin kararsız çatlak ilerlemesi bölgesinden ziyade kararlı çatlak ilerleme bölgesinde etkindir. Diğer bir deyişle, AISI 4140 malzemenin yorulma çatlak ilerleme ömründeki artışa; yüzey işlemlerinin kararlı yorulma çatlak ilerleme bölgesinde oluşturduğu değişimler sebep olmuştur.



Şekil 4.21. İşlemsiz, plazma nitrülenmiş ve dubleks işlem görmüş numunelerin yorulma çatlak ilerleme oranları

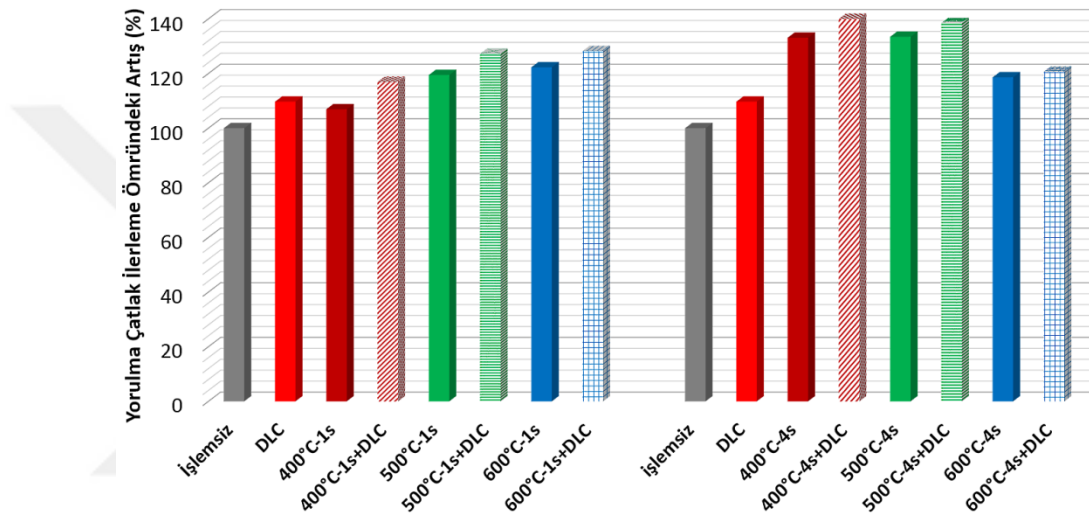
(a) 1 saat süre ile plazma nitrülenmiş ve DLC kaplanmış numuneler ve (b) 4 saat süre ile plazma nitrülenmiş ve DLC kaplanmış numuneler

Çizelge 4.2. Sabit genlikli yükleme durumunda işlemsiz ve yüzey işlemi uygulanmış numunelerden elde edilen çatlak ilerleme oranları

Uygulanan Yüzey İşlemi	Çatlak İlerleme Oranı (x 10 ⁻⁴ mm/çevrim)		
	13-19 mm arası	19-26 mm arası	26-30 mm arası
Plazma Nitrüleme			
400°C-1s	0.32	1.92	44.34
500°C-1s	0.28	2.24	11.01
600°C-1s	0.27	2.12	44.41
400°C-4s	0.25	1.73	11.59
500°C-4s	0.25	1.03	16.66
600°C-4s	0.26	2.66	27.58
DLC	0.31	1.94	38.09
400°C-1s+DLC	0.30	1.46	29.62
500°C-1s+DLC	0.26	1.97	32.11
600°C-1s+DLC	0.25	2.40	44.36
400°C-4s+DLC	0.22	2.63	34.48
500°C-4s+DLC	0.24	1.80	34.18
600°C-4s+DLC	0.26	2.04	33.12
İşlemsiz	0.36	1.86	10.38

Plazma nitrülenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemenin YÇİ ömründeki yüzde değişimler Şekil 4.22 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Buradan görüleceği üzere, YÇİ ömründeki en büyük artış dubleks işlem sonucunda elde edilmiştir. Ancak burada dikkat çekici nokta, Çizelge 4.3'te de gösterilen YÇİ ömründeki artış oranlarıdır. YÇİ ömürleri işlemsiz malzemeye göre kıyaslandığında; bir saatlik plazma nitrüleme işlemleri ve bir saatlik dubleks işlemler için sürekli bir ömür artışı söz konusudur. Fakat 600°C-1s+DLC prosesindeki artış oranı 400°C-1s+DLC ve 500°C-1s+DLC prosesleri arasındaki artıştan daha azdır. Bu duruma benzer şekilde, maksimum YÇİ ömrü 400°C-4s+DLC ve 500°C-4s+DLC işlemleri sonucunda elde edilmesine rağmen 600°C-4s+DLC işlemi sonrasındaki ömür artışı bu iki proses sonucunda elde edilenden daha azdır. Dubleks işlem sonucunda YÇİ ömründeki artış aynı şartlarda sadece nitrülenmiş malzemeye oranla kıyaslandığında da benzer bir durum söz konusudur. YÇİ ömründeki bu değişimler, ön işlem olan plazma nitrüleme işlemi sonucunda elde edilen sonuçlara atfen açıklanabilir. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında malzemelerin YÇİ ömrü üzerinde malzeme yüzeyinde/yüzey altında oluşan fazların ve tabakaların etkili olduğu daha önce belirtilmiştir. Bu durumla uyumlu olarak, 500°C-4s ve 600°C-4s nitrüleme işlemleri sonunda malzemenin YÇİ ömründeki artışın

diğer işlem parametreleri sonucunda elde edilen ömür artışı ile uyum göstermediği daha önce de belirtilmiştir. Buradan dubleks işlem sonucunda malzemelerin YÇİ ömründeki artışa sebep olan artık gerilme ve yüzey sertliğindeki artışın yanında, plazma nitrürleme işlemi sonrasında oluşan fazların ve tabakalarında ömür artışında daha etkili olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Bu durum kırılma yüzeylerinde yapılan incelemeler ile de desteklenmiştir.



Şekil 4.22. Plazma nitrürleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerleme ömrü üzerindeki etkisi

Çizelge 4.3. Plazma nitrürleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin yorulma çatlak ilerleme ömründe sebep olduğu yüzde değişimler

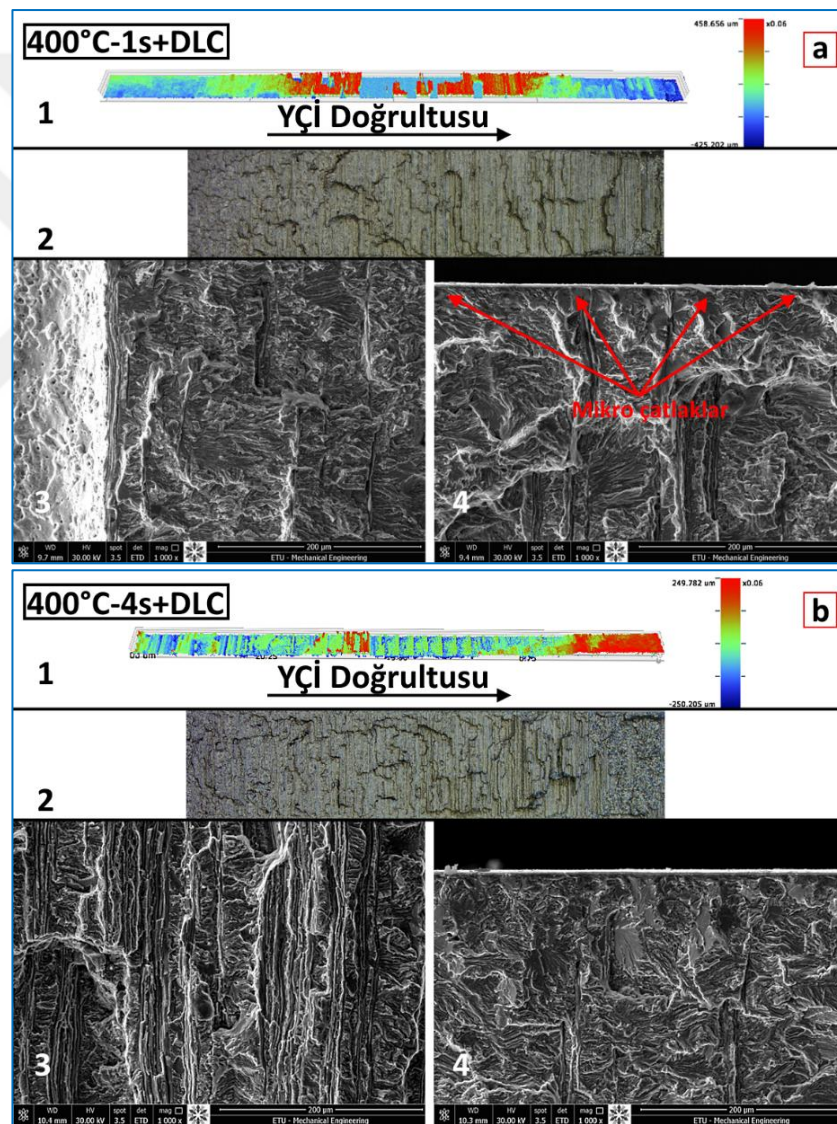
Numune	İşlemsiz numuneye göre ömür artışı (%)	Aynı şartlarda nitrürlenmiş numuneye göre ömür artışı (%)
İşlemsiz	-	-
400°C-1s	7	-
500°C-1s	19	-
600°C-1s	22	-
400°C-4s	33	-
500°C-4s	33	-
600°C-4s	18	-
DLC	9	-
400°C-1s+DLC	16	9
500°C-1s+DLC	27	6
600°C-1s+DLC	28	5
400°C-4s+DLC	40	5
500°C-4s+DLC	38	4
600°C-4s+DLC	20	2

Şekil 4.23'te dubleks işlem uygulanmış malzemelerin kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Dubleks işlem sonrasında elde edilen kırılma görüntüleri, Şekil 4.12'de verilen sadece plazma nitrülenmiş numunelerden elde edilen görüntülerle karşılaştırmalı olarak incelendiğinde her bir dubleks işlem şartı için, kırılma davranışının aynı şarttaki sadece plazma nitrülenmiş numune ile benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca 3D ve optik mikroskop görüntülerinde gösterildiği üzere, çatlak başlangıcı ve kararlı çatlak ilerleme bölgelerinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri oldukça düşüktür ve artan ön işlem (plazma nitrüleme) sıcaklığı ve süresine bağlı olarak bu bölgelerdeki pürüzlülük değerleri de artmıştır. Ayrıca, DLC filmlerin YÇİ esnasında nitrür tabakasından ayrılmamış olması, filmin nitrür tabakasına adezyonunun iyi olduğunu göstermektedir (Şekil 4.23, 4 numaralı görüntüler).

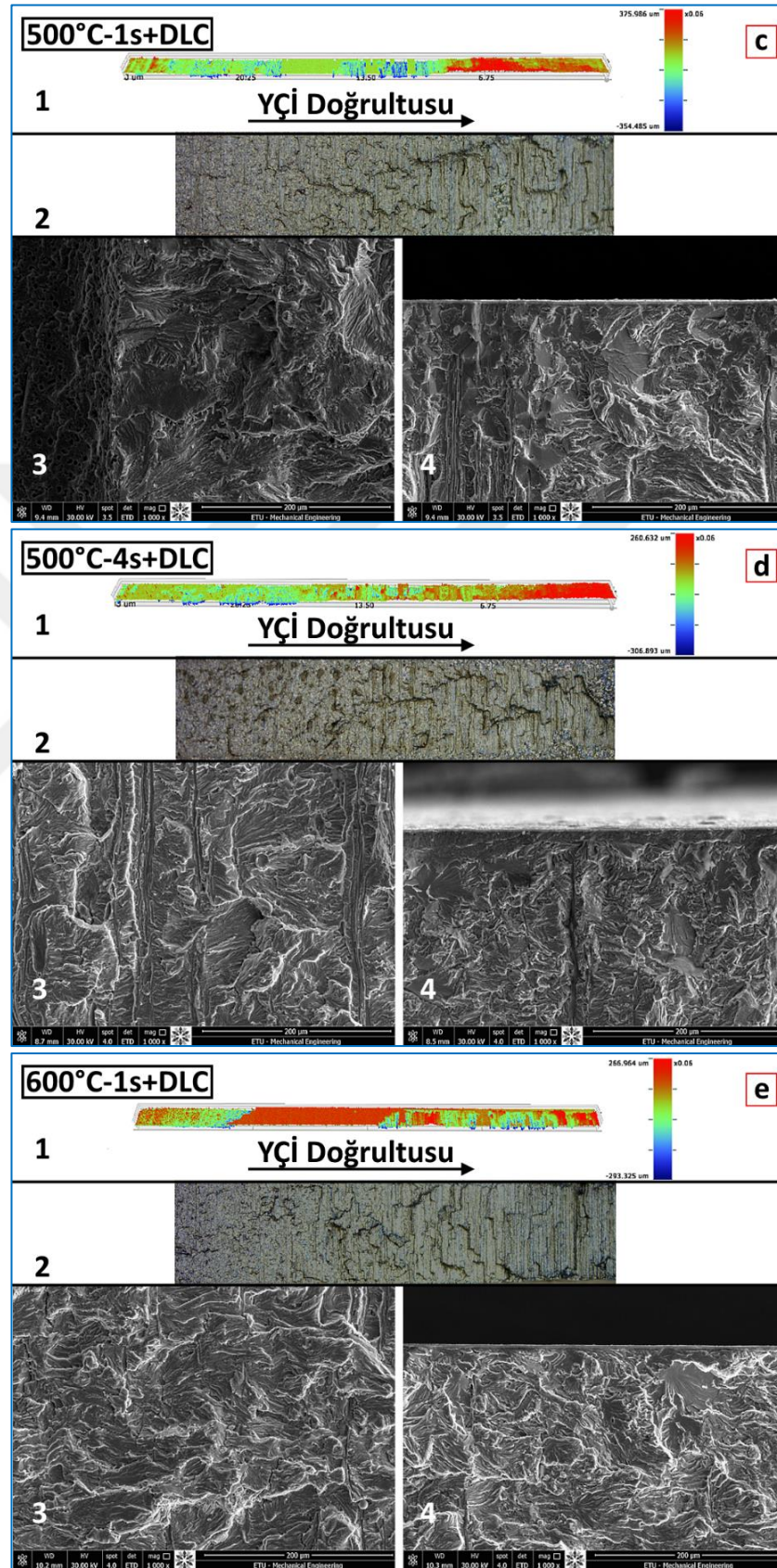
SEM görüntülerinden görüleceği üzere dubleks işlem uygulanmış numunelerin, sadece plazma nitrülenmiş numunelere benzer şekilde, artan ön işlem sıcaklığı ve süresi ile gevrek kırılma eğilimi artmıştır ve özellikle de 600°C-4s+DLC numunesi, tamamen gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Numunelerde genel olarak transgranüler kırılma olayı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, sadece plazma nitrülenmiş numunelerde gözlemlenen nitrür tabakalarının intergranüler kırılması olayı dubleks işlem uygulanmış numunelerde de tespit edilmiştir (Şekil 4.23, f). Plazma nitrülenmiş yüzeyler üzerine uygulanan DLC filmin kararlı YÇİ bölgesinden alınan SEM görüntülerinden (4 numaralı görüntüler) görüleceği üzere plazma nitrüleme işlemi sonrasında oluşan yüzey ve yüzey altı nitrür tabakaları yüzey çatlaklarının oluşumu engellemiştir. Fakat artan plazma nitrüleme sıcaklığı ve süresi ile nitrür tabakalarının kırılması olayı burada da gözlemlenmiştir. Bu seb

eplerden dolayı, dubleks işlem sonrasında her ne kadar YÇİ ömrü, plazma nitrüleme sonrasında ve DLC kaplama sonrasında oluşan artık gerilmelerin bileşik etkisi ile artış göstermiş olsa da dubleks işlem görmüş numunede, malzemenin kırılma karakterini ve ömür artışını belirleyen temel işlemin plazma nitrüleme olduğu sonucuna varılmıştır. Çizelge 4.3'te verilen ömür artışı oranları bu bilgiler ışığında tekrar incelenecek olursa, 500°C-4s+DLC ve 600°C-4s+DLC numunelerinde artan artık gerilmelere rağmen ömür

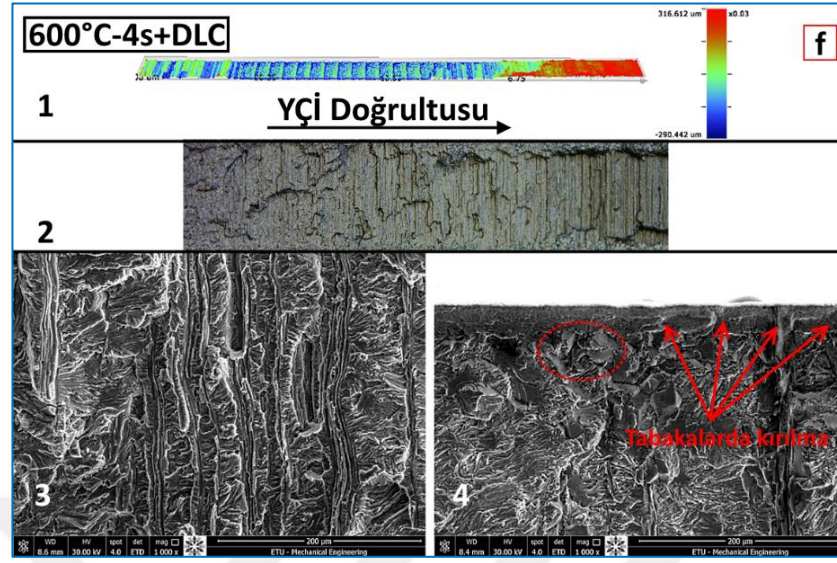
artışının 400°C-4s+DLC numunesinden daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi de, malzemelerde ömür artışını belirleyen temel mekanizmanın plazma nitrürleme olmasıdır. Çünkü 500°C-4s ve 600°C-4s nitrürleme işlemleri sonrasında oluşan nitrür tabakalarının kalınlığı diğer şartlarda oluşan tabakalardan daha yüksektir ve bu tabakalar oldukça kırılğan yapıdadır. Buradan, DLC filmlerin yüksek nitrür tabaka kalınlıklarında ömür artışı üzerinde, düşük tabaka kalınlıklarına oranla daha az etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. (devam)



Şekil 4.23. (devam)



Şekil 4.23. Yorulma çatlak ilerlemesi testleri sonrasında kırılma yüzeylerinden elde edilen görüntüler

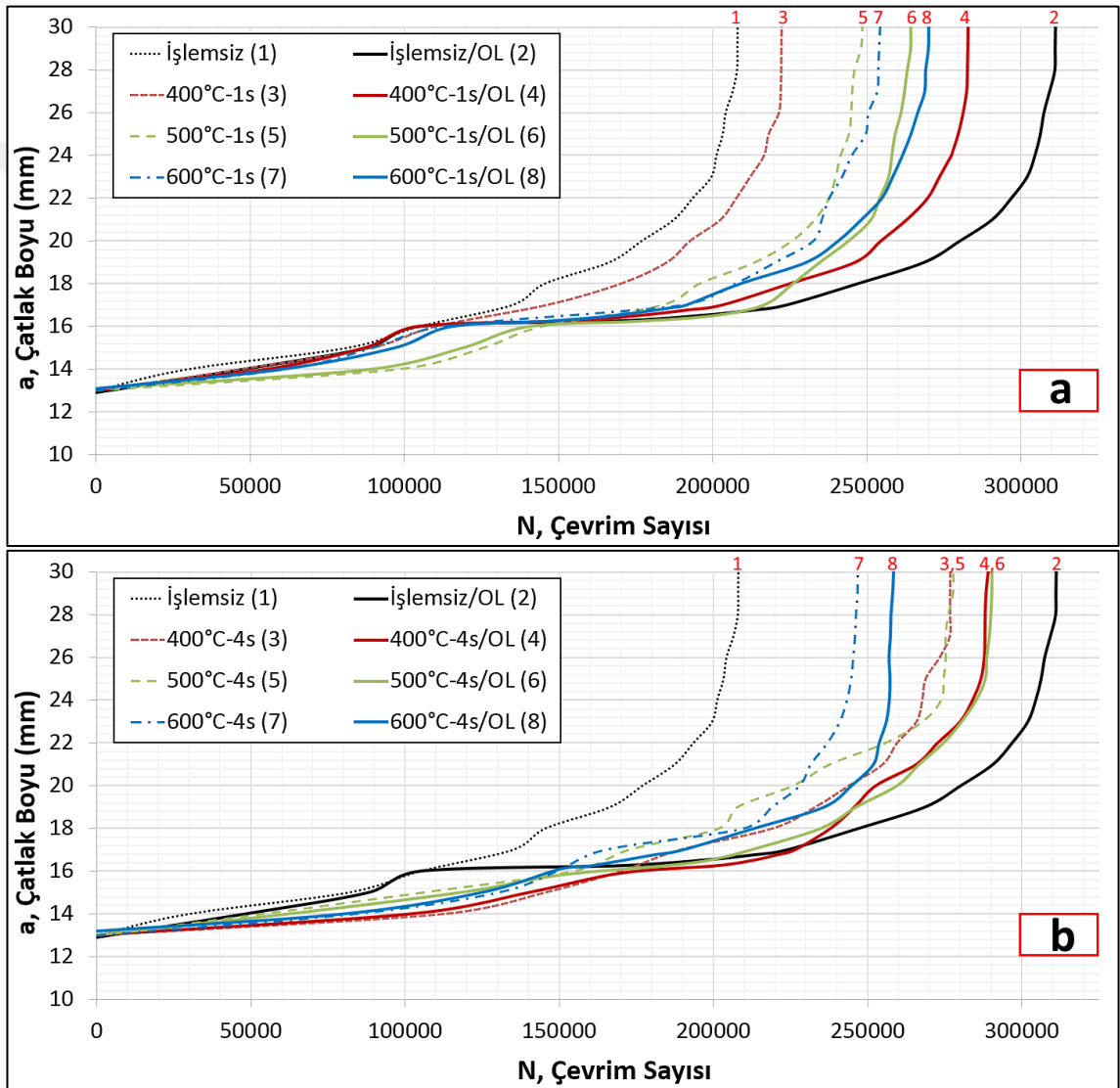
(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

4.2.2. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Çeki aşırı yüklemesi (Overload-OL)

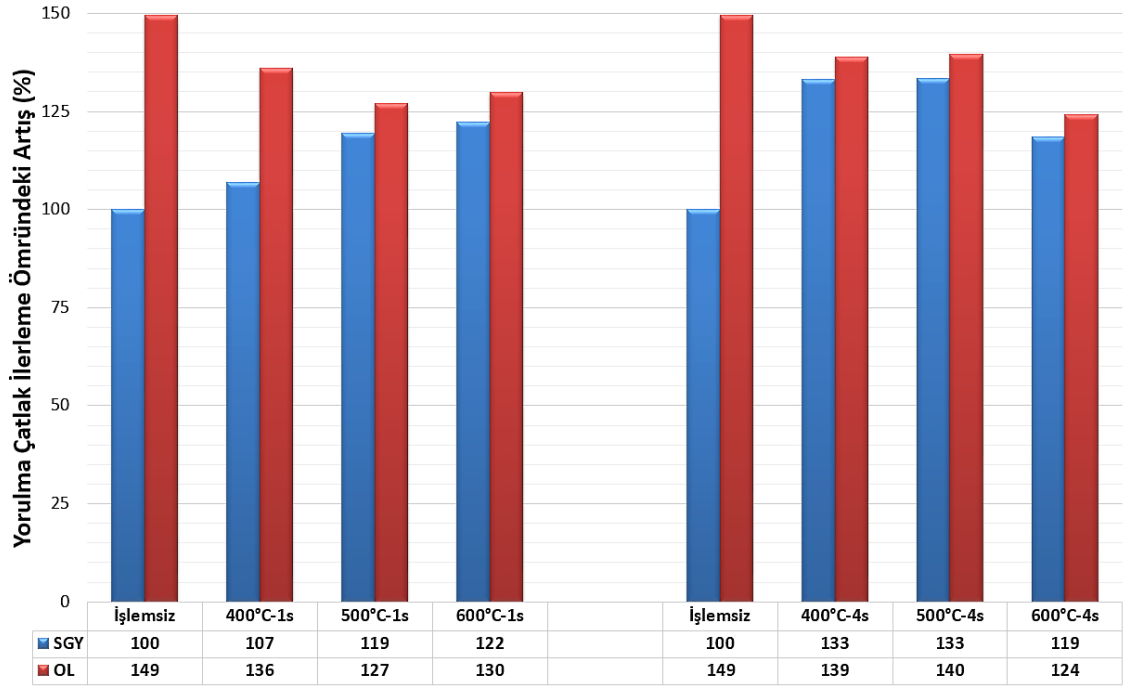
4.2.2.a. Plazma nitrürleme

Plazma nitrürlenmiş ve işlemsiz numunelere ait a-N grafikleri hem SGY hem de çeki aşırı yüklemesi (overload-OL) durumu için Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Buradan, OL uygulanması sonrasında oluşan çatlak gecikmesinden dolayı numunelerin YÇİ ömrünün arttığı görülmektedir. OL sonrasında, plazma nitrürlenmiş numuneler işlemsiz numuneye kıyasla daha düşük çatlak gecikme periyotları göstermiş ve bu sebeple de plazma nitrürlenmiş numunelerden işlemsiz numuneye oranla daha düşük YÇİ ömrü elde edilmiştir. Şekil 4.25'te işlemsiz numunenin SGY altındaki YÇİ ömrü referans alınarak OL sonrasında oluşan ömür artışları verilmiştir. İşlemsiz numune için SGY ömrü daha önce belirlendiği üzere 208050 (%100) çevrimdir. OL sonrasında işlemsiz numune için YÇİ ömrü %49 artışla 311100 çevrim değerine ulaşmıştır ve numuneler içerisinde en yüksek YÇİ değeri bu değerdir. Ayrıca, her bir numune grubu için SGY ve OL sonrasında elde edilen ömür değerleri kendi arasında karşılaştırıldığında, YÇİ ömrü

için maksimum fark işlemsiz numuneden elde edilmiş olup hem bir saat hem de dört saatlik plazma nitrülenmiş numunelerde artan işlem sıcaklığı ile SGY ve OL ömürleri arasındaki farkın azaldığı belirlenmiştir. Buradan, plazma nitrüleme işleminin OL ile oluşan yorulma çatlak gecikmesi periyodu üzerinde azaltıcı yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır.

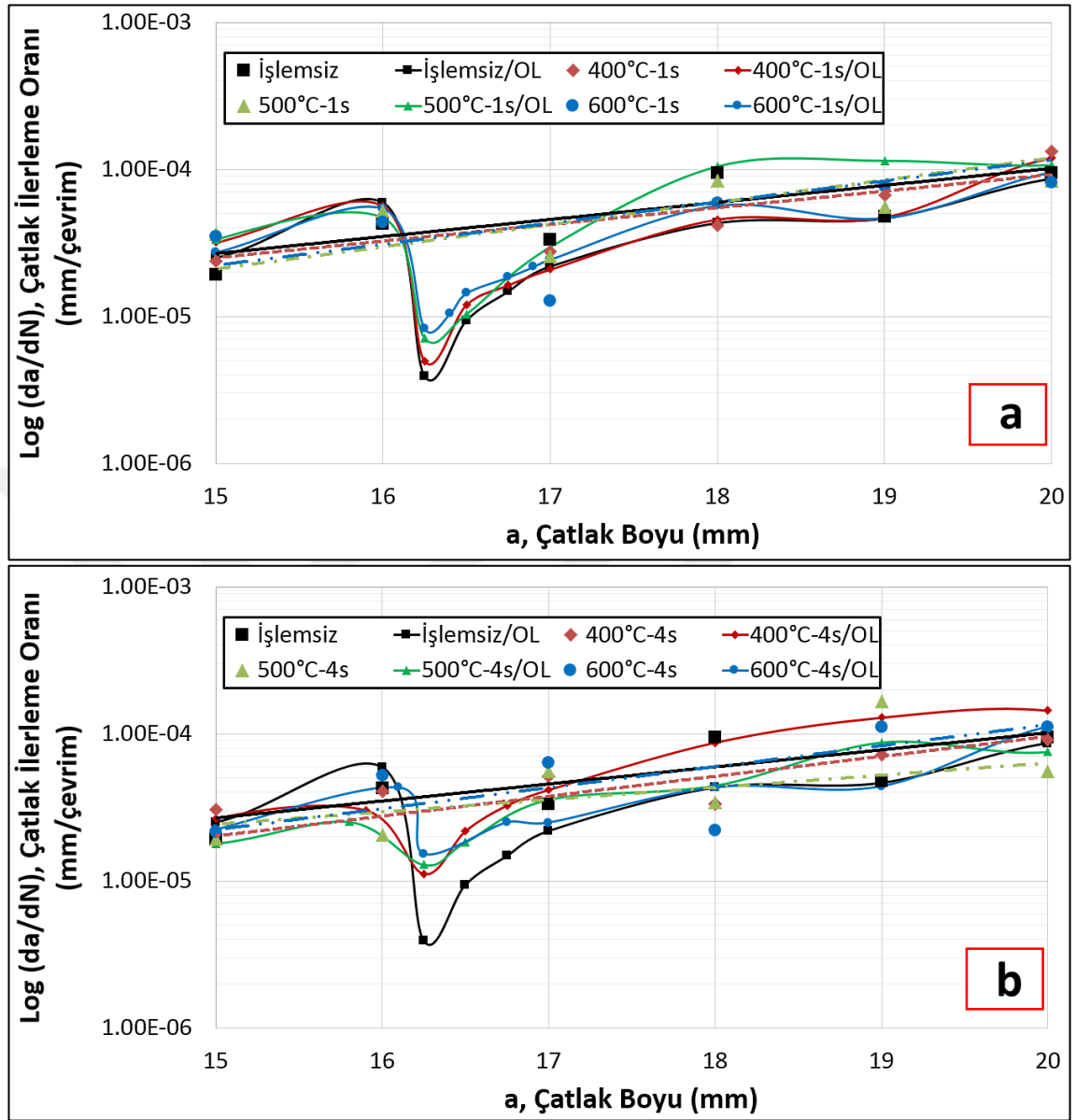


Şekil 4.24. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri
(a) 1 saat süre ile plazma nitrüleme ve (b) 4 saat süre ile plazma nitrüleme



Şekil 4.25. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerde SGY ve OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömrünün değişimi

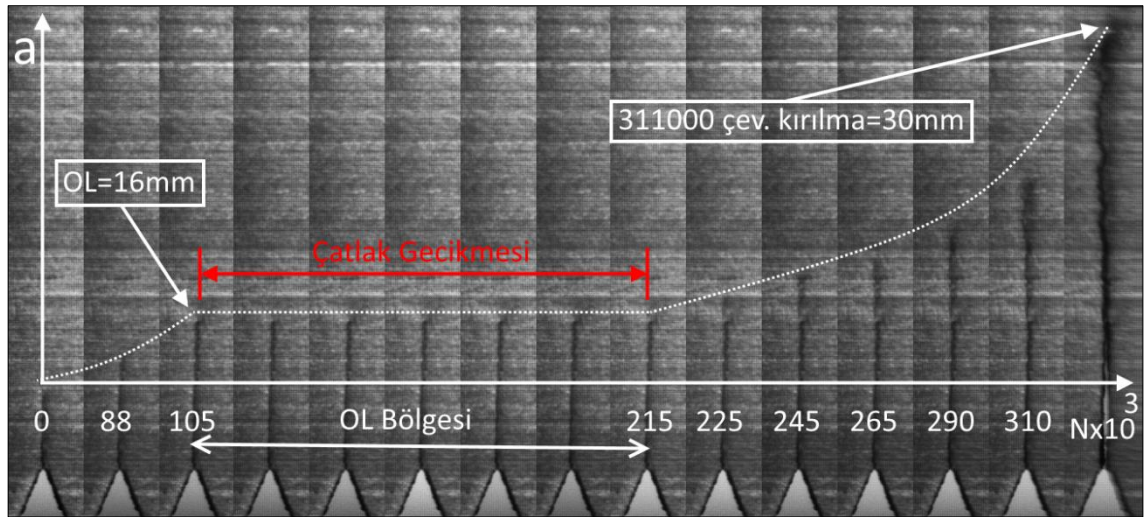
İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelere ait yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) grafikleri Şekil 4.26’da verilmiştir. Görüldüğü gibi, başlangıçta hem işlemsiz hem de plazma nitrürlenmiş numuneler için OL uygulandığında çatlak ilerleme hızının SGY durumuna göre arttığı görülmektedir. Bu artışın akabinde ise, çatlak ilerleme hızı tüm numuneler için minimum değerine ulaşmıştır. Bu minimum değerinden sonra ise belirli bir gecikme periyodu sonunda çatlak ilerleme hızı tekrar SGY yükleme durumundaki seviyeye ulaşmıştır. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerin YÇİ ömründeki değişim bu grafikler ile incelendiğinde, maksimum çatlak gecikmesi periyodu gösteren işlemsiz numunenin OL uygulandığında minimum çatlak ilerleme hızı/oranına ulaştığı ve SGY durumundaki çatlak ilerleme oranına diğer numunelere nazaran daha geç ulaştığı tespit edilmiştir. Bir ve dört saatlik plazma nitrürlenme işlemleri için ise, işlemsiz numune ile kıyaslandığında; artan proses sıcaklığı ile minimum çatlak ilerleme hızlarının azaldığı ve SGY durumundaki çatlak ilerleme hızına ulaşma periyotlarının kısaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tüm numuneler için çatlak gecikmesinin OL uygulanır uygulanmaz minimum değere ulaşmadığı tespit edilmiştir. Bütün numuneler ertelenmiş çatlak gecikmesi davranışı göstermiştir.



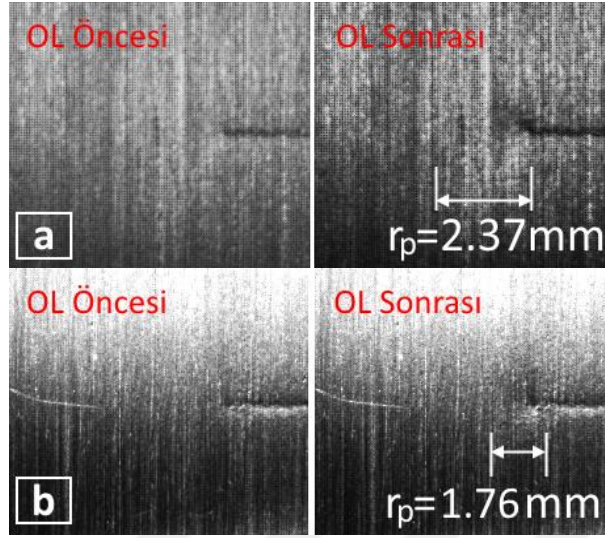
Şekil 4.26. OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi
(a) 1 saat plazma nitrürleme ve (b) 4 saat plazma nitrürleme

OL olayının sebep olduğu YÇİ ömür artışı için literatürde; çatlak ucu körleşmesi, çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluşması ve çatlak kapanması olmak üzere üç temel teori öne sürülmüştür (Bannantine 1990). Bu teoriler içerisinde çatlak kapanması ve her ne kadar ertelenmiş çatlak gecikmesi davranışını tam anlamıyla açıklayamasa da (bu durum gerçekleştirilen çalışma için de geçerlidir) çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluşması teorileri çatlak gecikmesi olayını incelemek için sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle Elber (Wolf 1970) tarafından öne sürülen çatlak kapanma teorisi farklı pek

çok araştırmacı tarafından incelenmiş ve çatlak gecikmesinden, çatlak kapanma mekanizmasının sorumlu olduğu öne sürülmüştür (Newman Jr 1981; Pommier and Risbet 2005; Lopez-Crespo and Pommier 2008; Korsunsky *et al.* 2009; Şengül 2011; Dai and Li 2013). Bu iki teori de, OL sonrasında çatlak ucu plastisitesi/çatlak ucunda plastik bölge oluşumu ile çatlak gecikmesi olayını açıklamaya çalışır (Bannantine 1990; Şengül 2011). Plazma nitrürleme işleminin, OL sonrasında oluşan çatlak gecikmesini azaltıcı yönde etki ettiği literatürde farklı deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir (Şengül 2011; Şengül and Çelik 2011). Bu çalışmalarda, OL sonrasında plazma nitrürlenmiş malzemelerde oluşan plastik bölge büyüklüğünün işlemsiz malzemede oluşan plastik bölge büyüklüğüne kıyasla daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmalarda azalan plastik bölge büyüklüğü sonucunda, çatlak gecikmesinin de azaldığı belirtilmiş ve elde edilen bu sonucun Elber (Wolf 1970) tarafından öne sürülen plastisite ile oluşan çatlak kapanması teorisi ile uyum gösterdiği belirlenmiştir. Çatlak ucu plastisitesinin etkisini incelemek için işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemelere ait örnek YÇİ görüntüleri ve OL uygulanması sonrasında oluşan örnek çatlak ucu plastik bölge büyüklükleri sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

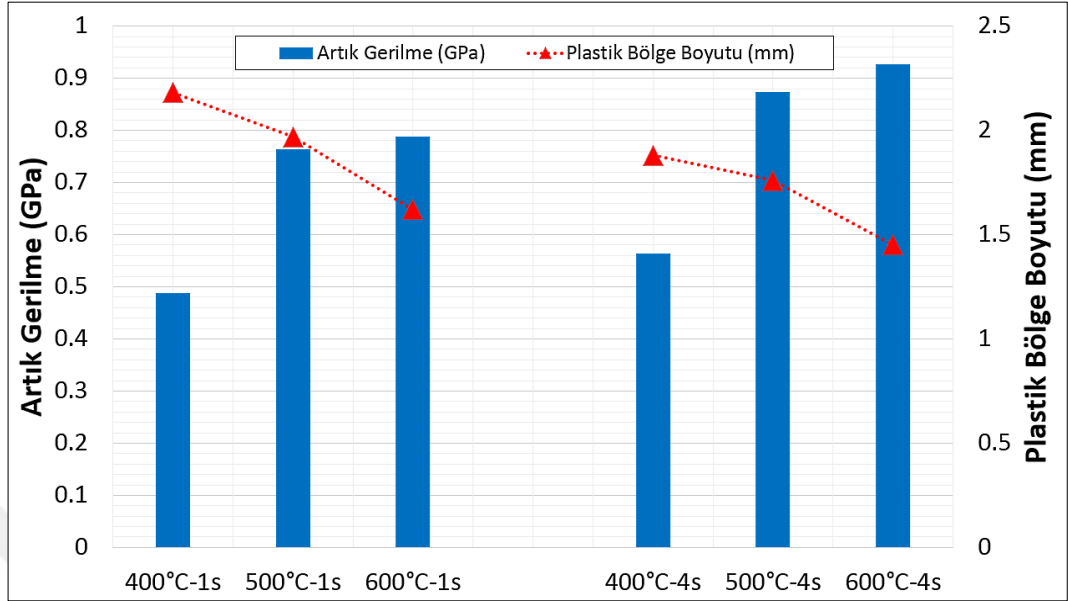


Şekil 4.27. OL durumunda işlemsiz malzemenin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü



Şekil 4.28. OL öncesi ve sonrasında plastik bölge büyüklükleri
(a) işlemsiz numune ve (b) 500°C-4s numunesi

Şekil 4.28’de gösterildiği üzere, plazma nitrülenmiş numunede çatlak ucu plastik bölge büyüklüğünün işlemsiz numuneden daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin işlemsiz numuneye oranla küçülmesi, plazma nitrüleme işlemi sonrasında oluşan yüzey bası artık gerilmeleri ve yüzey/yüzey altı tabakalarının oluşumu ile ilgilidir. Bu durum yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişimlerin gösterildiği Şekil 4.25’ten açıkça görülmektedir. Plazma nitrülenmiş numuneler içerisinde, diğer numunelere kıyasla daha düşük modifiye tabaka kalınlığına ve artık gerilme değerine sahip olan 400°C-1s numunesinden maksimum çatlak gecikmesi elde edilmiştir ve artan proses sıcaklığı ve süresi ile çatlak gecikme periyodunun azaldığı görülmüştür. Bu durumu açıklamak için her bir numune grubundan ölçülen OL plastik bölge büyüklüğünün plazma nitrüleme sonucunda yüzeyde oluşan maksimum bası artık gerilmeleri ile değişimi Şekil 4.29’da verilmiştir. Buradan, yüzeyde oluşan bası artık gerilmelerinin artışı ile plastik bölge büyüklüğünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca, plazma nitrüleme işlemi sonrasında elde edilen plastik bölgeler, işlemsiz numuneden elde edildenden (Şekil 4.28) daha küçüktür. Buradan, plazma nitrüleme işlemi sonucunda yüzeyde oluşan bası artık gerilmeleri ve sert nitrür tabakalarının OL uygulandığında oluşan plastik bölge için engel oluşturarak, işlemsiz numuneden daha küçük plastik bölge oluşumuna sebep olduğu tespit edilmiştir.



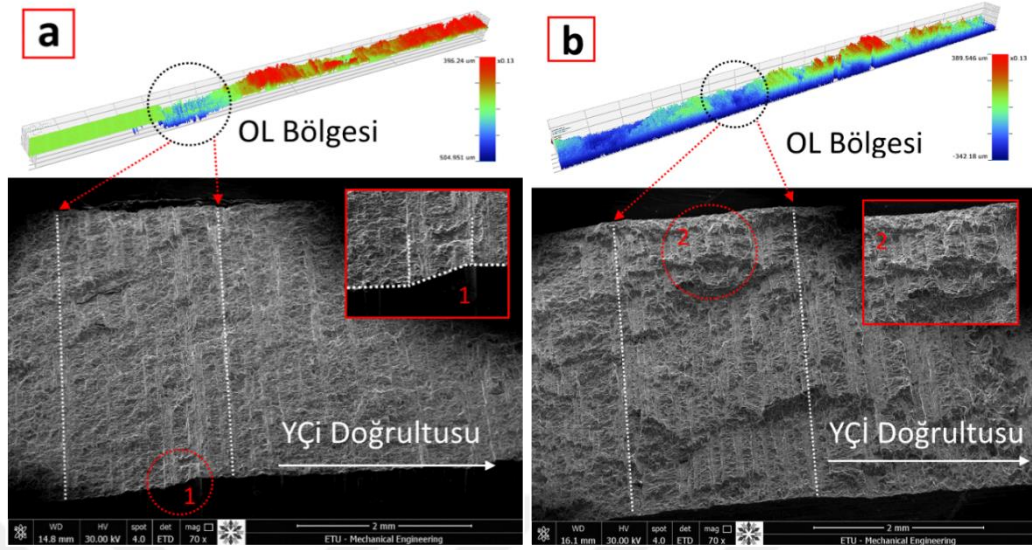
Şekil 4.29. Çatlak ucu plastik bölge büyüklüklerinin artık gerilmeler ile değişimi

Gerek çatlak kapanması teorisi olsun gerekse çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşması teorisi olsun, her iki teori de direkt olarak çatlak ucu plastisitesi ile ilgilidir. Başka bir deyişle bu teorilere göre çatlak gecikmesi miktarı, OL sonrasında çatlak ucunda oluşan plastik bölge büyüklüğü ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu durum gerçekleştirilen çalışma için de geçerlidir. Bu sebeple, plazma nitrülenmiş malzemede çatlak gecikme periyodunun işlemsiz numuneye oranla azalmasının sebebinin literatürde de (Şengül 2011; Şengül and Çelik 2011) belirtildiği üzere plazma nitrürleme sebebiyle azalan çatlak ucu plastisitesi/plastik bölge büyüklüğü olduğu belirlenmiş ve sonuçların Elber çatlak kapanma teorisi (Wolf 1970) ile uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Daha önce de belirtilen çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşması teorisi her ne kadar çalışmada da gözlemlenen ertelenmiş çatlak gecikmesini açıklama noktasında yetersiz kalsa da OL anında çatlak ucunda yüksek miktarda bası artık gerilmelerinin oluştuğu özellikle son yıllarda yapılan pek çok deneysel çalışmada gözlemlenen bir durumdur (Lee *et al.* 2009; Lee 2009; Lee *et al.* 2010a; Lee *et al.* 2010b; Lee *et al.* 2011a; Lee *et al.* 2011b). Ayrıca, bu teori genel davranış itibarı ile elde edilen sonuçlar ile uyum göstermektedir. Şekil 4.30'dan görüleceği üzere, plazma nitrürleme işlemi sonrasında

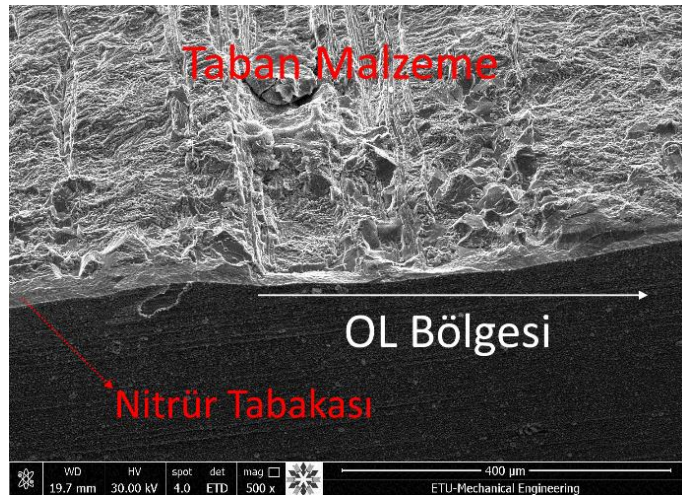
OL çatlak ucu plastik bölge büyüklüğü işlemsiz numuneye nazaran azalmıştır. Çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşması teorisine göre bu durum incelenecek olursa, plazma nitrürleme sonrasında yüzey/yüzey altında oluşan sert nitrür tabakaları ve bası artık gerilmeleri çatlak ucunda plastik bölge oluşumu için engel teşkil ettiğinden dolayı plastik bölge büyüklüğü azalmıştır. İşlemsiz numuneye kıyasla azalan plastik bölge büyüklüğü ise, plazma nitrürlenmiş malzemenin çatlak ucunda işlemsiz numuneye oranla daha düşük bası artık gerilmelerinin oluşmasına sebep olmuştur. Ayrıca, her ne kadar plazma nitrürleme işlemi sonrasında yüzeyde oluşan bası artık gerilmeleri OL sonrasında oluşan çatlak ucu bası artık gerilmeleri ile birlikte çatlak gecikmesi olayına katkıda bulunsa da, bu etkinin işlemsiz numunenin çatlak ucunda oluşan bası artık gerilmelerinin tek başına oluşturduğu etkiden daha az olduğu belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında genel olarak, elde edilen sonuçların hem çatlak kapanması hem de çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşumu teorisi ile uyum gösterdiği ve plazma nitrürleme işleminin sebep olduğu çatlak gecikme davranışındaki azalmanın, azalan çatlak ucu plastisitesi nedeniyle olduğu sonucuna varılmıştır.

SGY kısmında belirlendiği üzere, plazma nitrürleme işlemi malzemenin kırılma karakterini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple, hem plazma nitrürlemenin hem de OL'nin malzemenin kırılma özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için, işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemenin örnek kırılma görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir. OL bölgesinde hem işlemsiz hem de plazma nitrürlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülükleri artmıştır. İşlemsiz numunede, OL uygulandığında malzemenin iç kısmında çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca işlemsiz numunenin 1 numaralı detay görüntüsünden malzemenin OL bölgesinden çıkarken çatlak ilerleme düzleminin değiştiği görülmektedir. Plazma nitrürlenmiş numunede ise OL bölgesinde özellikle malzemenin iç kısmında pürüzlülüğün işlemsiz numuneye kıyasla arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, plazma nitrürlenmiş numunenin 2 numaralı detay görüntüsünden, plazma nitrürleme sonucunda yüzeyde oluşan sert nitrür tabakalarının çatlak ilerlemesine engel olması ve plastik bölgeyi sınırlandırması sebebiyle, numunenin yüzeyi ile iç kısmı arasında homojen olmayan bir çatlak ilerleme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. Kırılma yüzey görüntüleri
(a) işlemsiz numune ve (b) 500°C-1s plazma nitrülenmiş numune

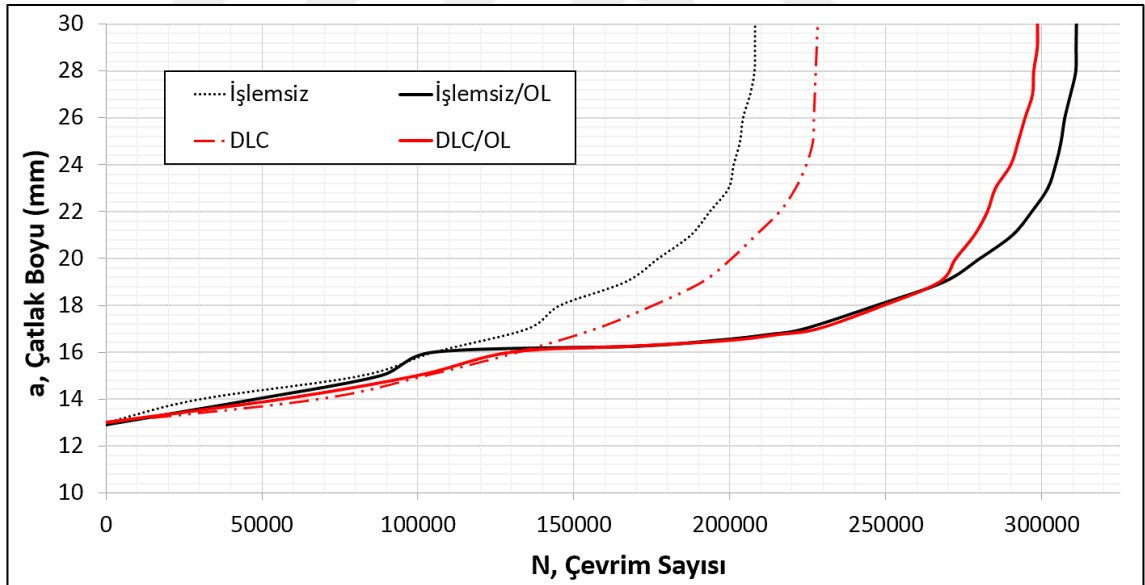
Şekil 4.31’de plazma nitrülenmiş malzemenin OL anındaki SEM görüntüsü verilmiştir. OL bölgesi boyunca nitrür tabakasında mikro çatlaklar oluşmuş ve tabaka birden çok noktadan kırılmıştır. SGY araştırmalarında da gözlemlenen bu davranış, nitrür tabakasının kırılabilirliği sebebiyledir. Buradan, OL sonrasında plazma nitrülenmiş numunelerin işlemsiz numunelere kıyasla daha düşük YÇİ göstermesinin sadece azalan çatlak gecikme periyodu bağlı olmadığı, aynı zamanda da nitrür tabakası kırılabilirliğinin de bu etkiye katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.



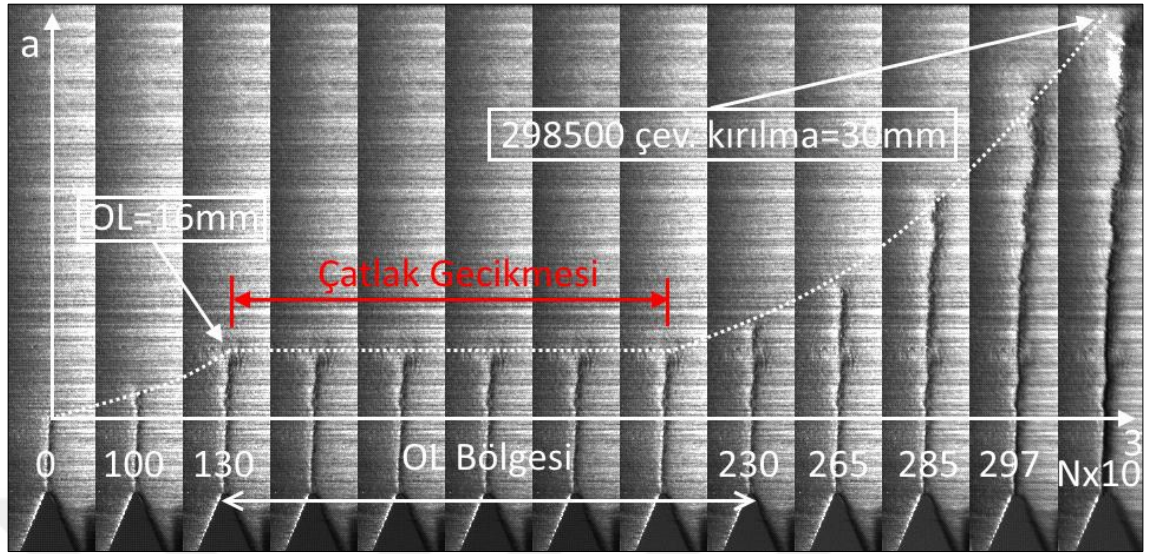
Şekil 4.31. OL bölgesinde 600°C-4s numunesinin SEM görüntüsü

4.2.2.b. DLC kaplama

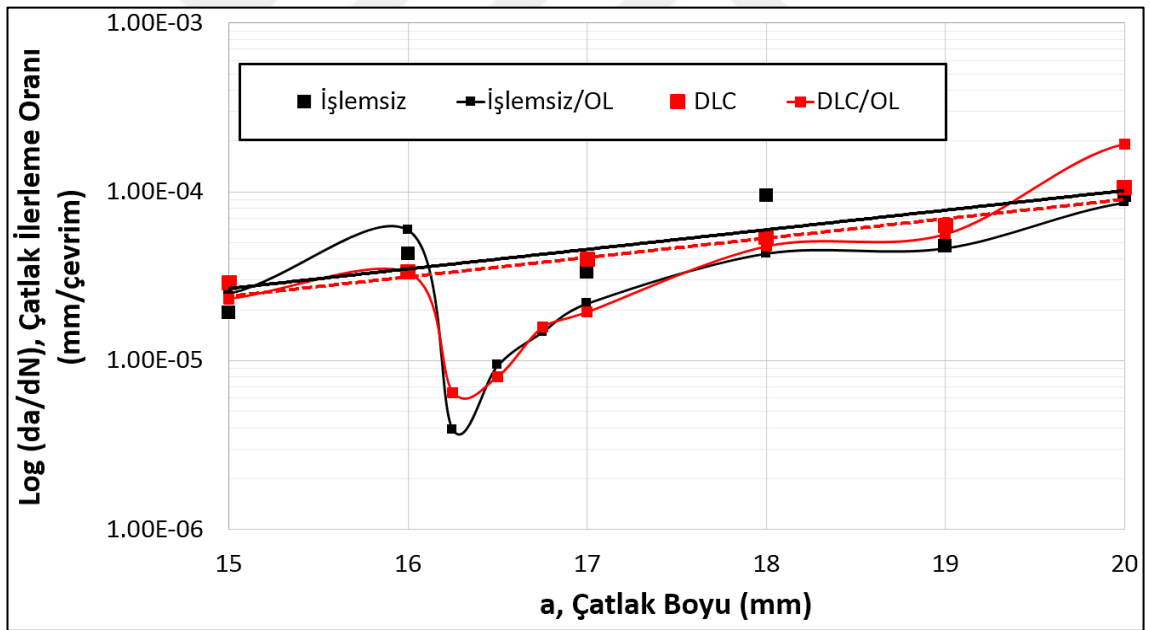
İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin a-N grafiği ve çatlak ilerleme görüntüsü sırasıyla Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmiştir. OL sonrasında, işlemsiz numunenin YÇİ ömrü SGY durumuna göre %49 artışla 311100 çevrim değerine ulaşırken DLC kaplanmış numunenin %43 artışla 298500 çevrim değerine ulaştığı belirlenmiştir. Buradan, OL işleminin DLC kaplamanın yorulma çatlak gecikmesi çevrim sayısını artırdığı, ancak işlemsiz malzemeye oranla bu artışın düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin da/dN-a grafikleri Şekil 4.34'te verilmiştir. DLC kaplanmış malzeme işlemsiz malzemeye benzer bir çatlak ilerleme davranışı sergilemiştir. Ancak, OL uygulandıktan sonra DLC kaplanmış malzemenin çatlak ilerleme hızı işlemsiz malzemedan daha yüksektir.



Şekil 4.32. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri



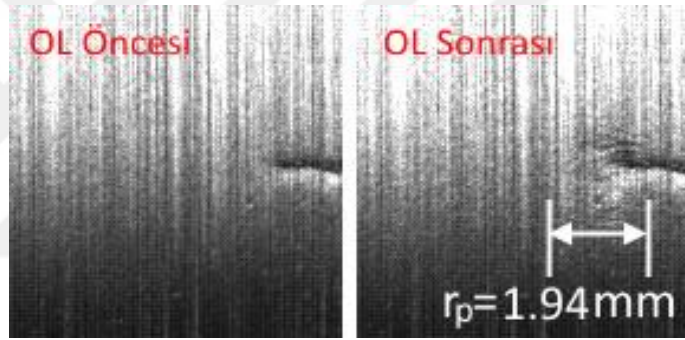
Şekil 4.33. DLC kaplanmış numunenin OL durumunda çatlak ilerleme görüntüsü



Şekil 4.34. DLC kaplanmış malzemenin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

Plazma nitrüleme işlemine benzer şekilde, OL durumunda DLC kaplamanın da YÇİ ömrünü işlemsiz numuneye oranla düşürdüğü görülmektedir. Bunun sebebi, daha önce de belirtilen azalan çatlak ucu plastisitesi/plastik bölge boyutudur. Şekil 4.35'te DLC kaplanmış malzemeden OL sonrasında elde edilen plastik bölge gösterilmiştir. DLC

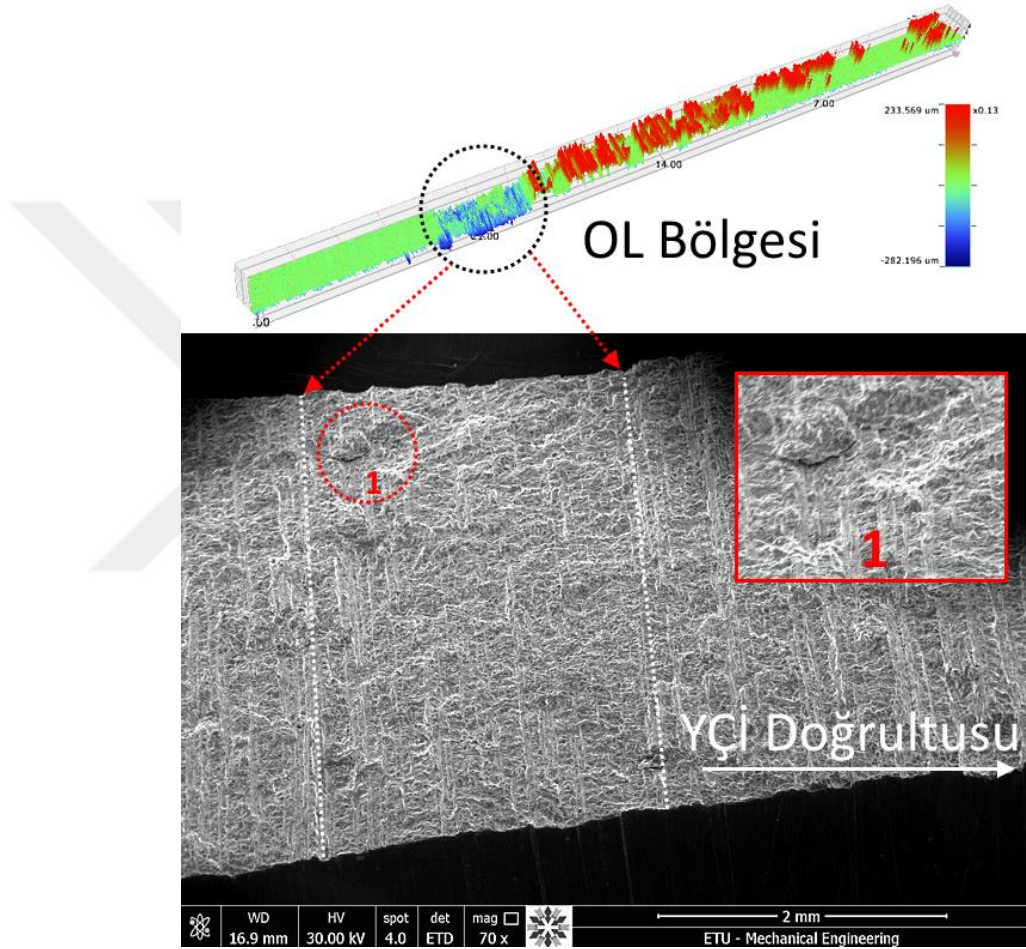
kaplanmış malzemede, işlemsiz malzemeye kıyasla daha küçük plastik bölge elde edilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere, malzemenin yüzey sertliğini artıran ve malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşturan DLC kaplama, YÇİ esnasında malzemenin yüzeyinde dislokasyon hareketleri için bir engel oluşturarak YÇİ ömrünün artmasına sebep olmaktadır. DLC filmin malzeme yüzeyinde oluşturduğu bası artık gerilmeleri ve yüksek sertlikte olan filmin plastik bölge oluşumu için direkt olarak engel oluşturması sebebiyle, OL sonrasında DLC kaplanmış malzemede oluşan plastik bölge işlemsiz malzemeye kıyasla daha küçüktür. Plastik bölge boyutunun küçülmesi de, DLC kaplanmış numuneden elde edilen çatlak gecikme periyodunun azalmasına sebep olmuştur.



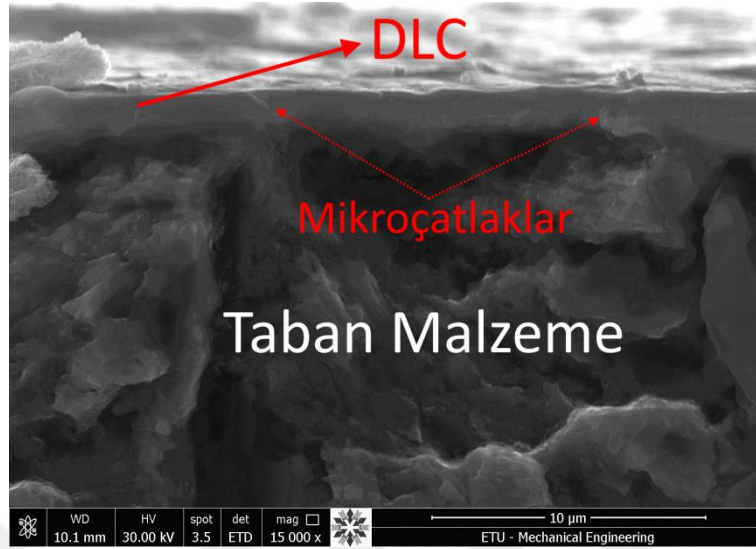
Şekil 4.35. OL sonrasında DLC kaplanmış malzemede oluşan plastik bölge

DLC kaplanmış malzemeye OL uygulanması sonrasında elde edilen kırılma görüntüleri Şekil 4.36’da verilmiştir. DLC kaplanmış malzemede, işlemsiz numuneye benzer kırılma davranışı gözlemlenmiştir. OL öncesinde malzemede homojen bir çatlak ilerleme yüzeyi oluşmuş ve OL bölgesinde pürüzlülük değerleri artış göstermiştir. Ayrıca, DLC kaplanmış malzemede işlemsiz numuneye benzer şekilde malzemenin iç kısmında ikincil çatlak oluşumu gözlemlenmiştir (1 numaralı detay görüntüsü). Ayrıca, DLC filmin OL bölgesinden alınan SEM görüntüsü Şekil 4.37’de gösterilmiştir. DLC filmin OL yüklemesi esnasında taban malzemedan ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu durum, DLC filmin adezyonunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak, OL yüklemesi esnasında DLC filmin yapısında mikro çatlaklar oluşmuştur. Bu mikro çatlaklar, malzemenin normal YÇİ periyoduna ek olarak çatlak ilerlemesine katkıda bulunarak YÇİ ömrünün düşmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple DLC kaplanmış

malzemede plastik bölge boyutunun sınırlandırılması ile oluşan çatlak gecikme periyodundaki azalmaya ek olarak, OL anındaki mikro çatlak oluşumunun da DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömrünün işlemsiz malzemeye oranla azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



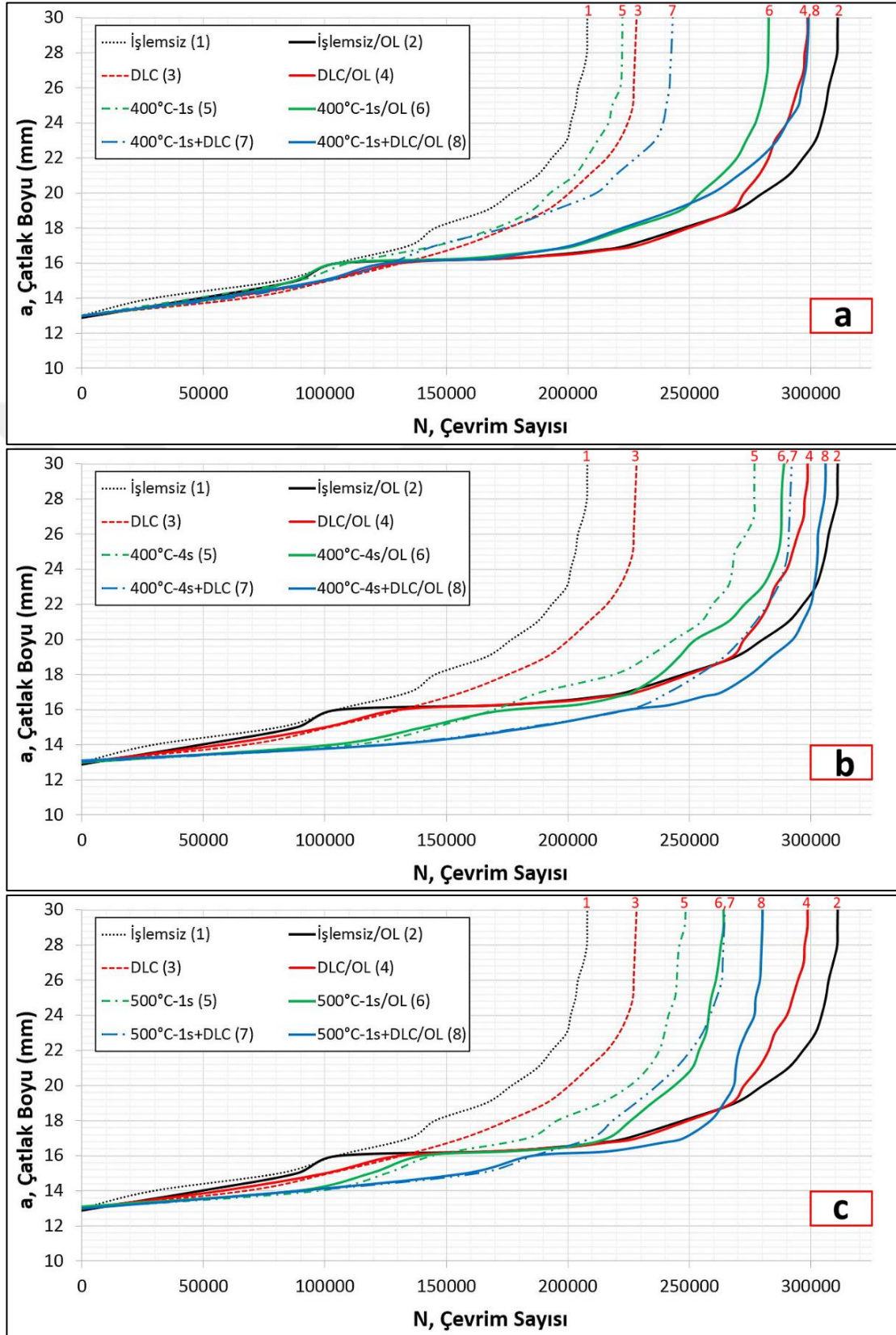
Şekil 4.36. DLC kaplanmış numunenin kırılma yüzey görüntüsü

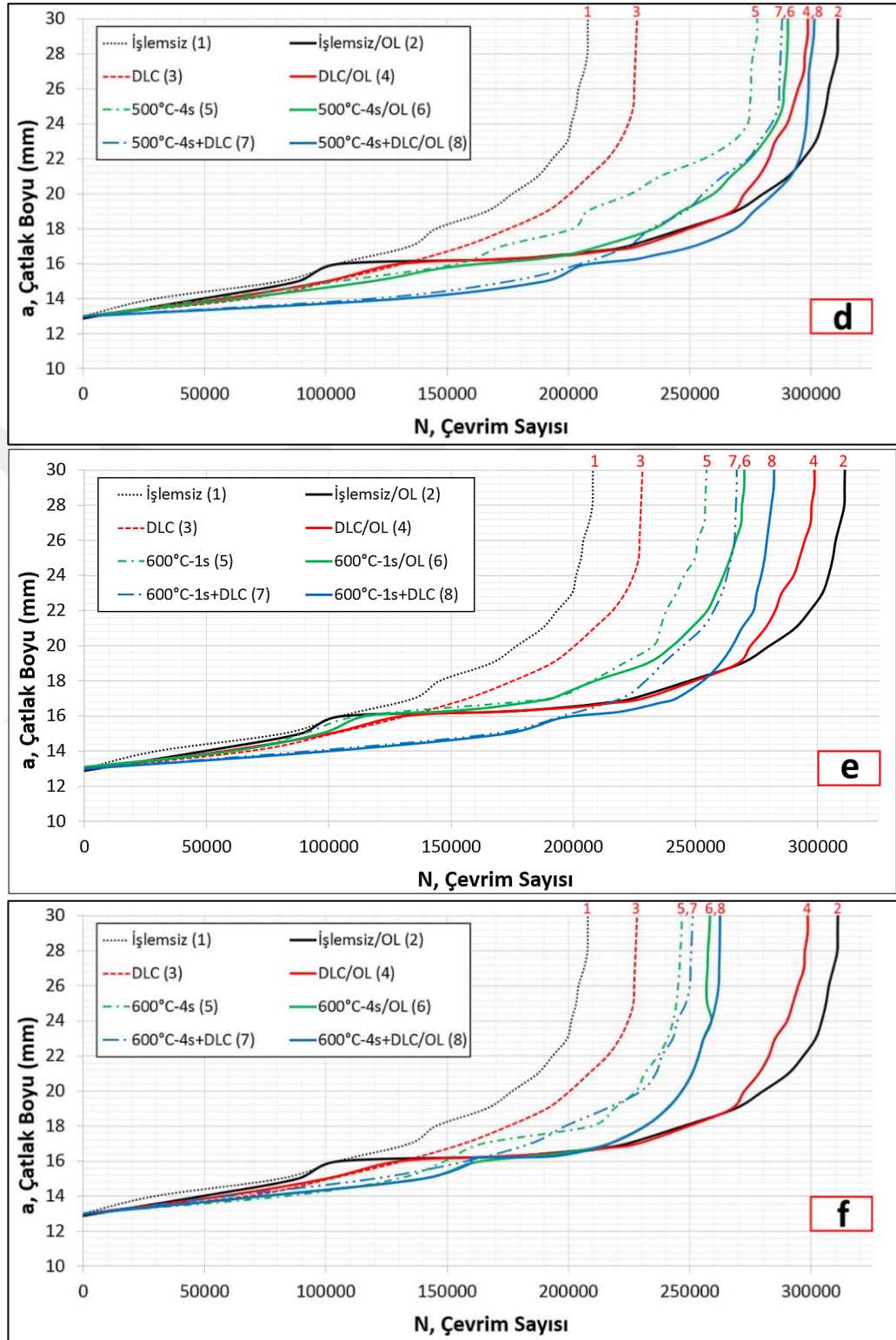


Şekil 4.37. DLC filmin OL bölgesinden alınan SEM görüntüsü

4.2.2.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması

Dupleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve OL durumunda a-N eğrileri Şekil 4.38’de verilmiştir. OL sonrasında her ne kadar her bir işlem grubu için YÇİ ömründe artış tespit edilmiş olsa da, işlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin, plazma nitrürlenmiş ve dupleks işlem uygulanmış numunelere kıyasla daha yüksek çatlak gecikmesi periyodu göstererek daha yüksek YÇİ ömrüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum daha önce belirtildiği üzere, çatlak ucu plastisitesi ile ilgilidir. İşlemsiz malzeme, OL durumunda malzeme yüzeyinde plastik bölge oluşumu için herhangi bir engel olmadığından maksimum plastik bölge boyutuna sahiptir. DLC kaplama, nitrürleme ve dupleks işlem sonrasında ise malzeme yüzeyinde plastik bölge oluşumunu engelleyen sert tabaka/tabakalar ve bası artık gerilmeleri oluşmuştur. Bunun sonucunda ise, bu numunelerin çatlak ucunda daha küçük plastik bölgeler oluşmuş ve engellenen çatlak ucu plastisitesi sebebiyle de çatlak gecikme periyodu azalmıştır.

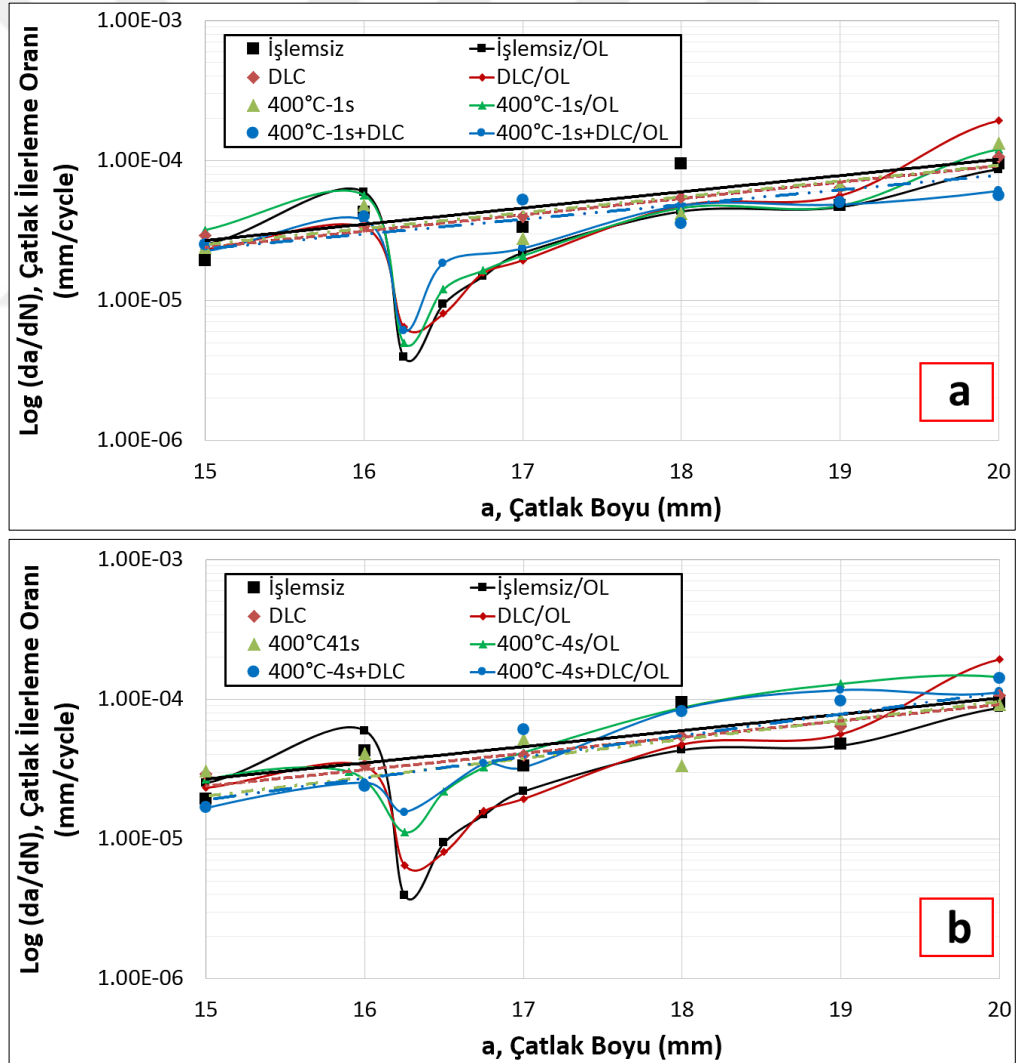




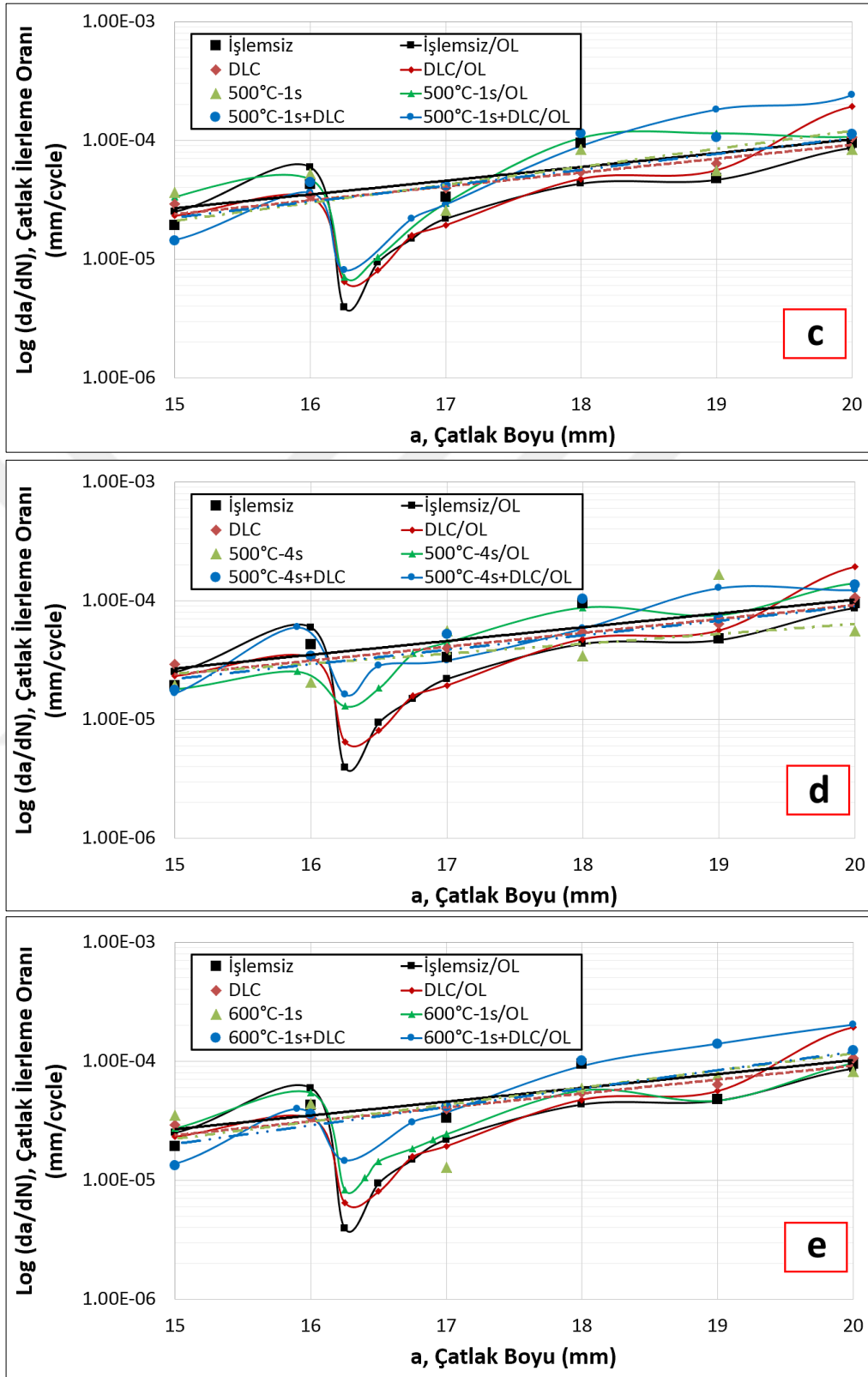
Şekil 4.38. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri

(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

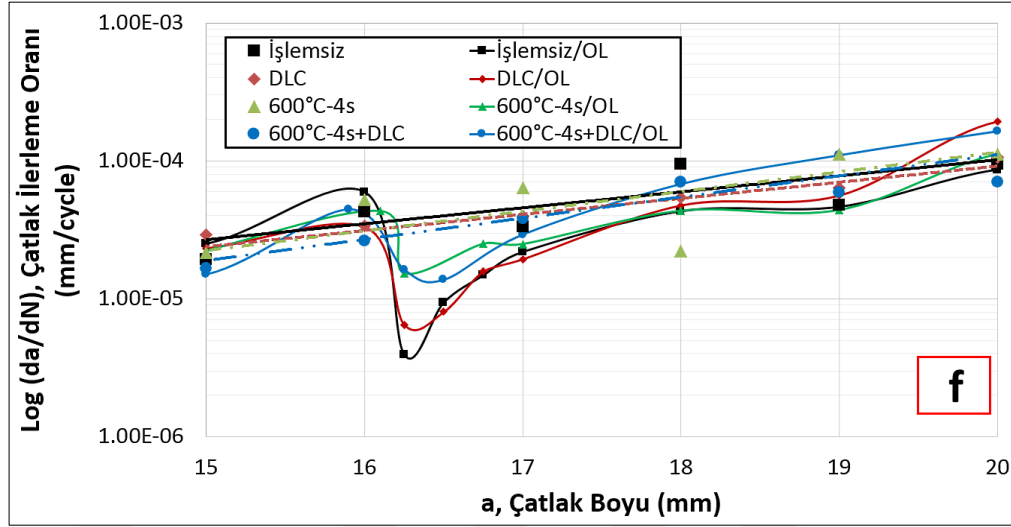
İşlemsiz, plazma nitrürlenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks işlem görmüş numunelerin da/dN-a grafikleri Şekil 4.39’da gösterilmiştir. Burada, Şekil 4.38’de verilen YÇİ eğrileri ile bağlantılı olarak, DLC kaplanmış, plazma nitrürlenmiş ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin OL durumunda çatlak ilerleme oranlarının işlemsiz numuneye oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Numuneler ani çatlak hızlanması ve ertelenmiş çatlak gecikmesi gösterdikten sonra minimum çatlak ilerleme oranına ulaşmış ve belirli bir periyot sonunda normal davranışa ulaşmıştır. Ayrıca, dubleks işlem görmüş malzemelerin çatlak ilerleme oranı her bir işlem parametresi için sadece nitrürlenmiş olan numunelere oldukça yakındır.



Şekil 4.39. (devam)



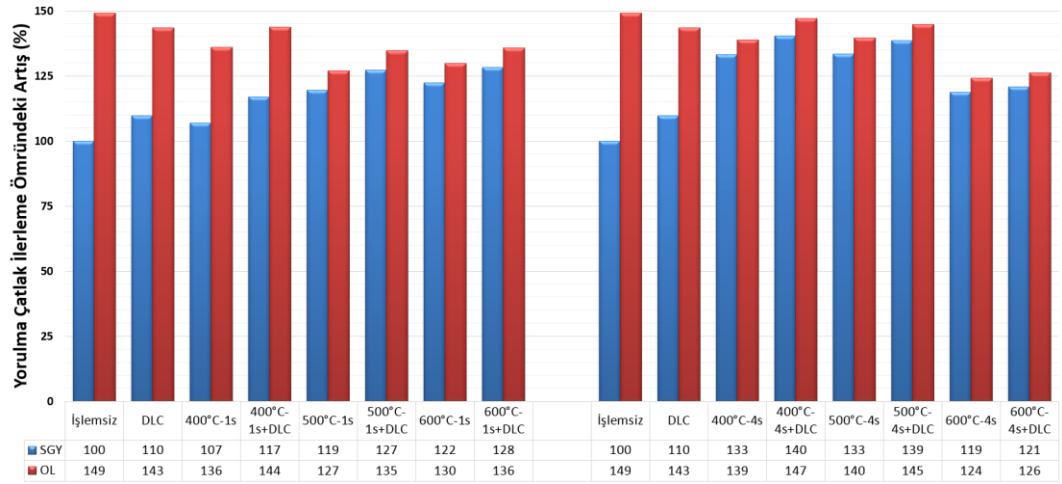
Şekil 4.39. (devam)



Şekil 4.39. OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

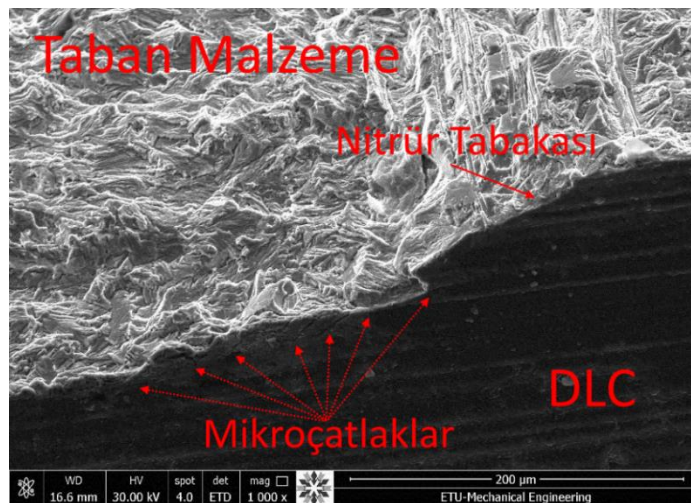
(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

OL sonrasında, numunelerin YÇİ ömürlerindeki değişim, işlemsiz malzemenin SGY durumundaki YÇİ ömrü baz alınarak Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. DLC kaplanmış malzemenin nitrürlenmiş malzemelere oranla daha yüksek çatlak gecikme periyodu gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi, plazma nitrüleme işleminin difüzyonal bir proses olmasıdır. DLC film her ne kadar yüzeyde plazma nitrürlenmiş numunelere oranla daha yüksek bası artık gerilmelerine ve bu numunelerden daha yüksek sertliğe sahip olsa da, filmin kalınlığı yaklaşık 2 μm 'dir. DLC filme en yakın yorulma çatlak gecikme periyodunu gösteren 400°C-1s numunesi ise yaklaşık 1-2 μm beyaz tabaka ve 120-130 μm difüzyon tabakasına sahiptir. Bu sebeple, plazma nitrürlenmiş numuneler her ne kadar DLC filminden daha düşük sertlik ve bası artık gerilmesine sahip olsa da, OL sonrasında oluşan plastik bölge için DLC filminden daha büyük bir engel oluşturmıştır. Ayrıca, plazma nitrüleme sıcaklık ve süresindeki artışa bağlı olarak artan beyaz tabaka kalınlığı sebebiyle OL sonrasında çatlak gecikme periyodu azalmıştır. Bununla birlikte, dubleks işlem görmüş numunelerin SGY ve OL durumları arasındaki ömür değişimleri incelendiğinde, dubleks işlem görmüş numunelerin aynı şartlarda sadece nitrürlenmiş olan malzemelere yakın ömür artışı gösterdikleri belirlenmiştir. Bunun sebebi, SGY deneylerinde de gözlemlendiği üzere, dubleks işlem sonrasında çatlak ilerlemesini kontrol eden mekanizmanın plazma nitrüleme olmasıdır.



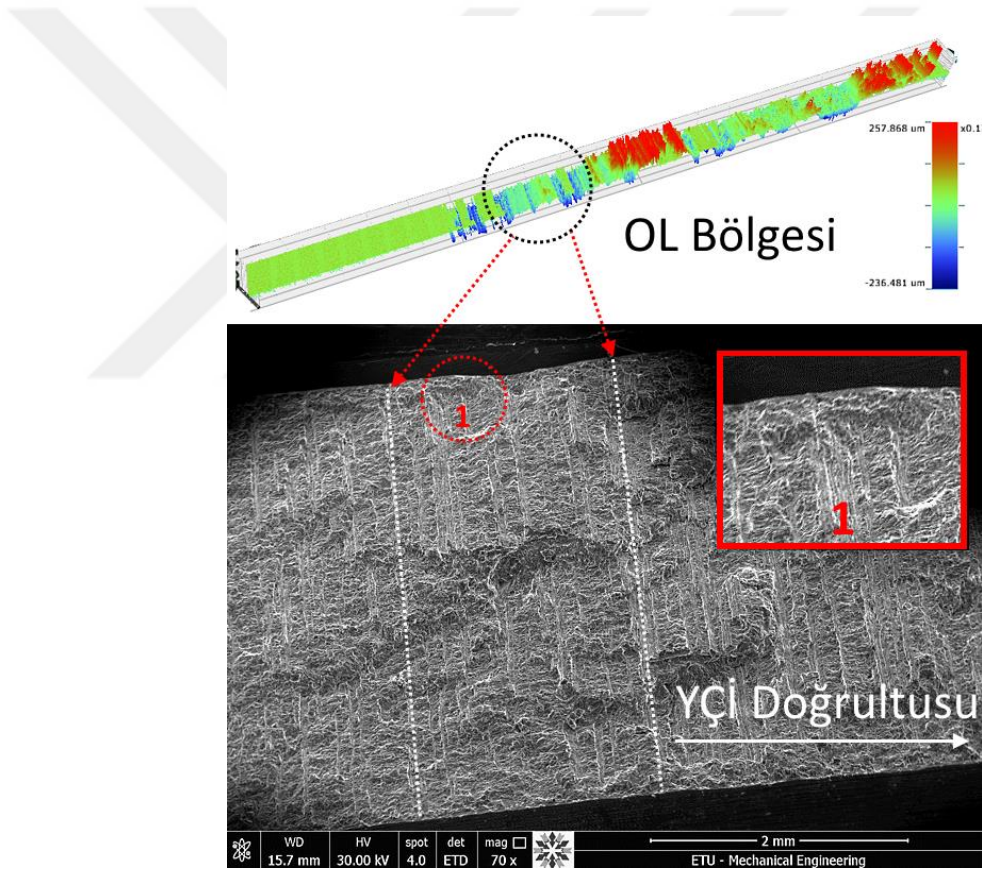
Şekil 4.40. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve OL durumunda işlemsiz numuneye göre ömür artışları

Şekil 4.41’de 500°C-1s+DLC numunesinin OL bölgesinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Burada, OL anında nitrür tabakasında ve buna bağlı olarak da DLC filmde birden çok noktada ikincil çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bu durum, zaten OL esnasında kırılğan özellik gösteren DLC filmin plastik bölgeyi sınırlamasını engellemiştir. Bunlarla birlikte, OL sonrasında dubleks işlem görmüş numunelerden, plazma nitrülenmiş numunelerle hemen hemen aynı plastik bölgeler elde edilmiştir. Bu durumda, SGY deneylerinde belirtildiği üzere, artan nitrür tabakası kalınlığı sonucunda DLC filmin etkinliğinin azaldığı sonucunu desteklemektedir.



Şekil 4.41. OL bölgesinde 500°C-1s+DLC numunesinin SEM görüntüsü

Dubleks işlem uygulanmış malzemenin örnek kırılma görüntüsü Şekil 4.42’de verilmiştir. Numunenin kırılma şekli ve OL bölgesinin görünümü aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş numune (Şekil 4.31) ile benzer özelliktedir. OL bölgesinde malzemenin yüzey pürüzlülüğü artmıştır ve sadece plazma nitrürlenmiş numuneye benzer şekilde, 1 numaralı detay görüntüsünde gösterildiği gibi, yüzeyde oluşan sert nitrür tabakalarının çatlak ilerlemesine engel olması ve plastik bölgeyi sınırlandırması sonucunda, numunenin yüzeyi ile merkezi arasında homojen olmayan bir çatlak ilerleme davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

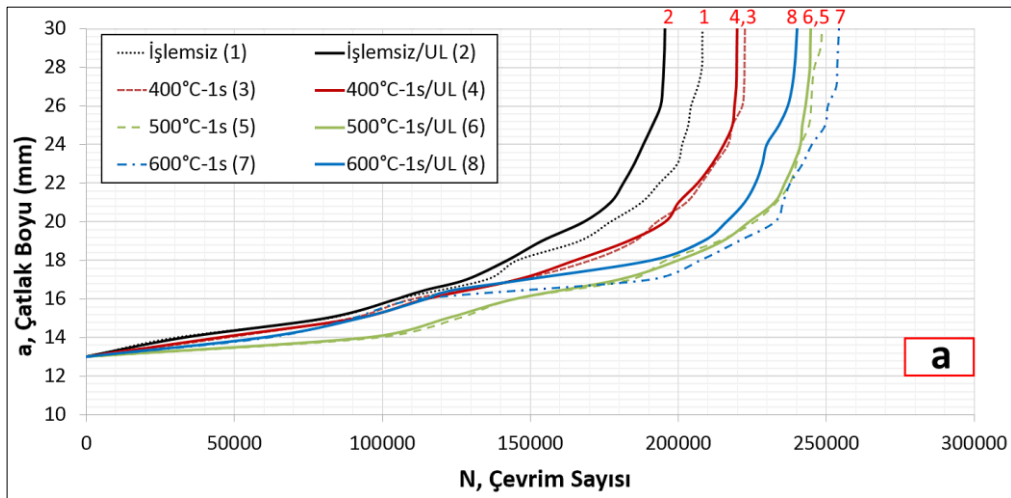


Şekil 4.42. 500°C-1s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü

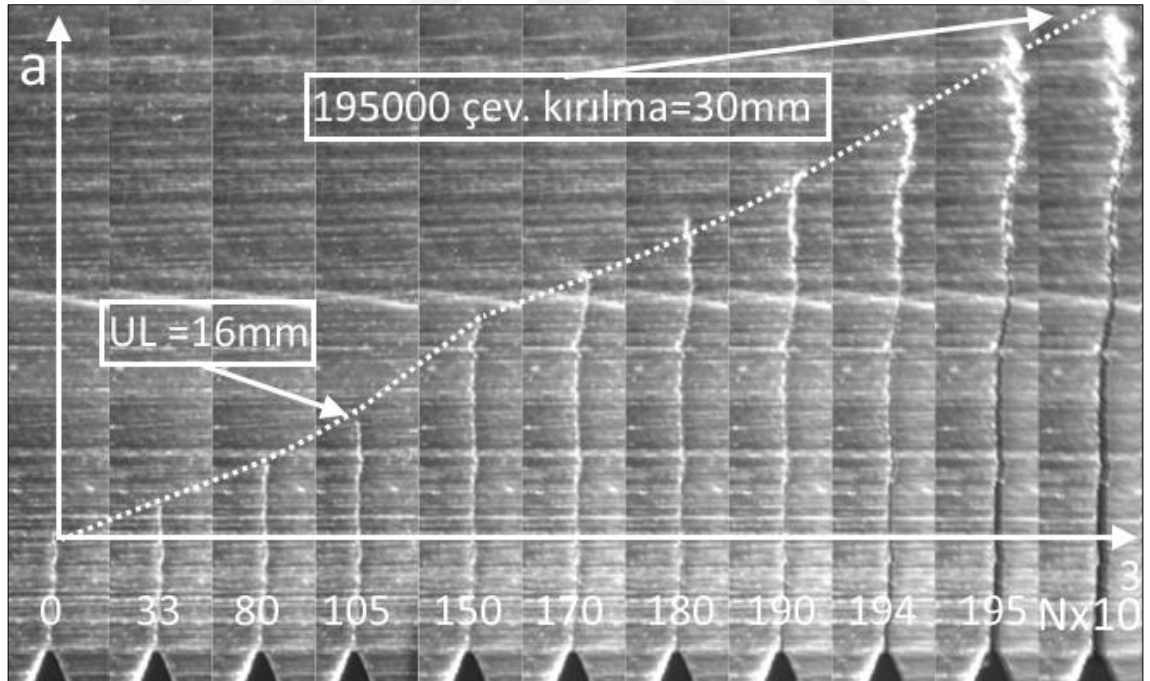
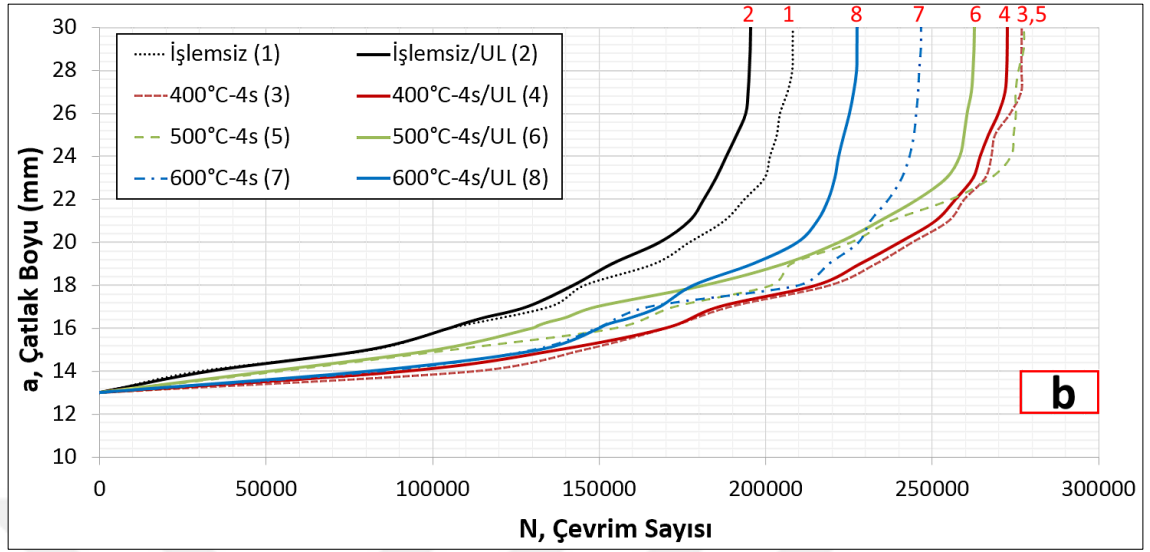
4.2.3. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Bası aşırı yüklemesi (Underload-UL)

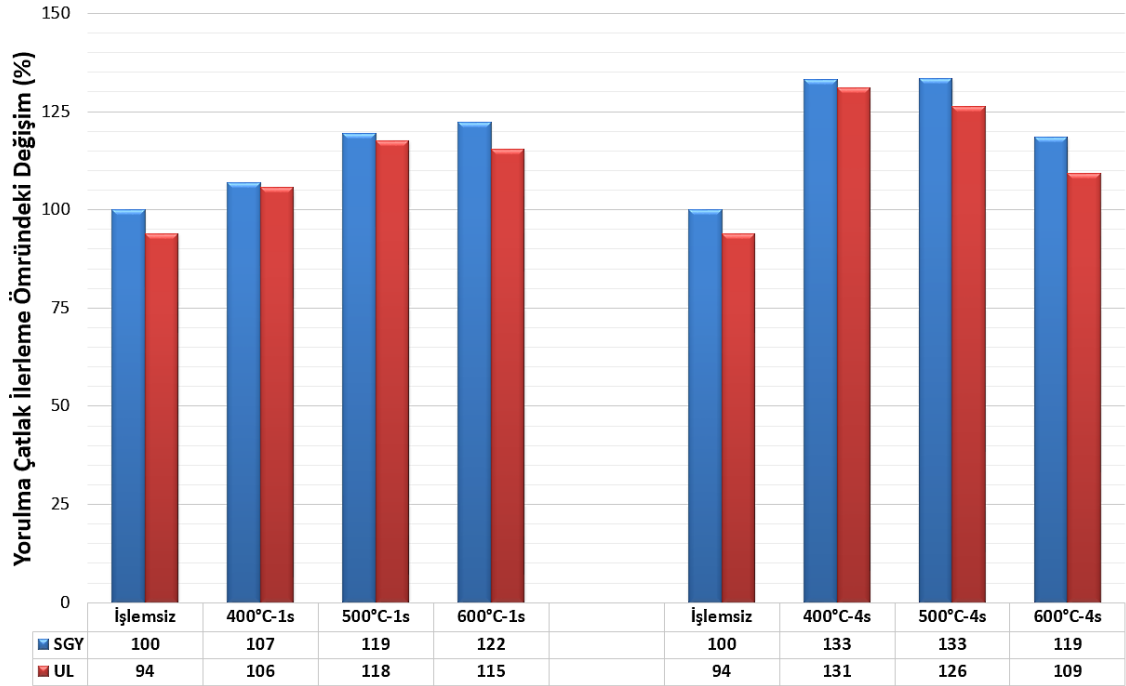
4.2.3.a. Plazma nitrürleme

İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerin bası aşırı yüklemesi (UL) durumunda a-N eğrileri Şekil 4.43'te verilmiş ve örnek YÇİ görüntüsü Şekil 4.44'te gösterilmiştir. Ayrıca, YÇİ ömründeki değişim işlemsiz numunenin SGY durumundaki ömrü baz alınarak Şekil 4.45'te verilmiştir. UL sonrasında işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemenin ömrü SGY durumuna göre azalmıştır. Buradan elde edilen sonuç OL durumu ile karşılaştırıldığında, her bir numune grubu için SGY ve UL sonrası ömür değişimleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde; 400°C-1s, 500°C-1s ve 400°C-4s numunelerinde SGY yükleme durumuna yakın ömür değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu numunelerin YÇİ ömründeki değişim işlemsiz numunede elde edilenden daha düşüktür. Bu işlem süreleri ve sıcaklıklarında UL etkisi neredeyse ortadan kalkmıştır. Ancak, 600°C-1s, 500°C-4s ve 600°C-4s numunelerinde ise tam tersi bir durum söz konusudur. Bu numunelerde işlemsiz numuneye oranla YÇİ ömrünün daha fazla azaldığı gözlemlenmiştir. Bunlarla birlikte, literatürde de belirtildiği üzere (Bannantine 1990; Skorupa 1998), UL sonrasındaki ömür değişimi OL durumuna göre çok daha düşük seviyede gerçekleşmiştir.



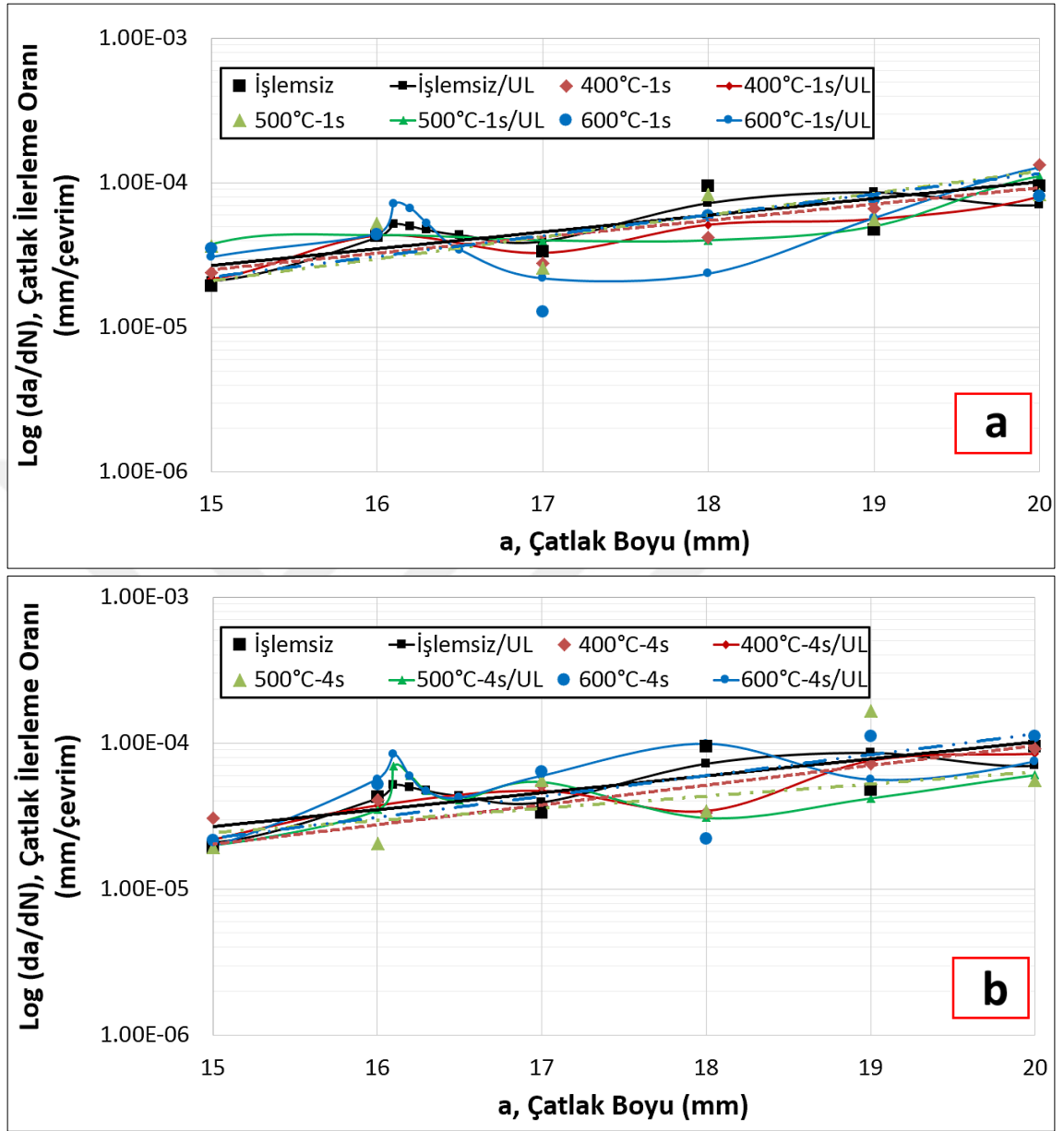
Şekil 4.43. (devam)





Şekil 4.45. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde SGY ve UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim

İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin da/dN grafikleri Şekil 4.46'da verilmiştir. Burada, UL uygulandığında çatlak ilerleme oranının bütün numuneler için anlık olarak artış gösterdiği ve kısa bir çatlak hızlanmasından sonra SGY durumundaki davranışa geri döndüğü görülmektedir. 400°C-1s, 500°C-1s ve 400°C-4s numunelerinin çatlak ilerleme oranındaki artış işlemsiz numunede belirlenenenden daha azdır. Ancak, 600°C-1s, 500°C-4s ve 600°C-4s numunelerinde, UL anında çatlak ilerleme oranı işlemsiz numuneden daha fazla artış göstermiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar OL durumunda belirlenen çatlak ilerleme oranları ile karşılaştırıldığında; UL sonrasında çatlak ilerleme oranının OL yüklemesine göre daha az değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, OL esnasında plastik bölge oluşumundan dolayı çatlak ilerleme oranı UL'ye göre daha büyük bir periyot sonunda normal çatlak ilerleme davranışına dönmektedir. UL durumunda, sadece ani bir çatlak hızlanması olmuş ve malzeme kısa sürede SGY durumundaki çatlak ilerleme oranına dönmüştür.



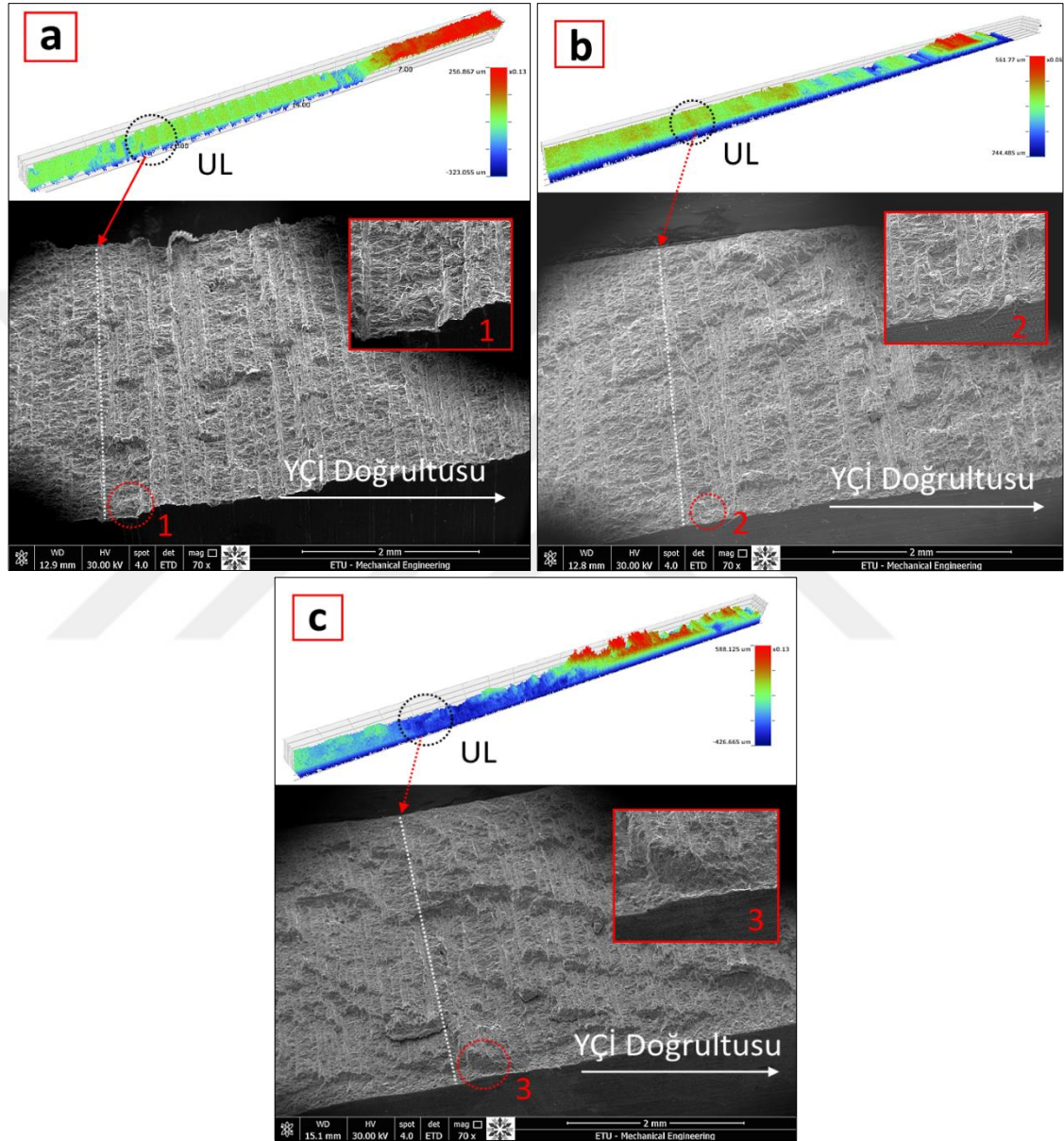
Şekil 4.46. UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi
(a) 1 saat plazma nitrölleme ve (b) 4 saat plazma nitrölleme

UL durumunda çatlak ilerleme oranının anlık artışı ve dolayısıyla da YÇİ ömrünün SGY durumuna göre azalması literatürde farklı çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda UL anında çatlak ilerleme oranının artmasına, UL anında çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerinin sebep olduğu öne sürülmüştür (Fleck *et al.* 1985; Kasaba *et al.* 1998; Lee *et al.* 2010a). Çatlak ucunda çeki gerilmelerinin oluşması durumuna göre, elde edilen sonuçlar ele alındığında; plazma nitrölleme işlemi sonucunda yüzeyde

oluşan bası artık gerilmelerinin ve sert nitrür tabakalarının çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerinin etkisini ortadan kaldırdığı sonucuna varılmıştır. Ancak, bu durum her işlem parametresi için geçerli değildir. Bir saatlik işlemler için 600°C-1s numunesinde ve dört saatlik işlemler için 500°C-4s ve 600°C-4s numunelerinde çatlak ilerleme hızı diğer numunelere kıyasla büyük ölçüde artış göstermiştir (Şekil 4.48). Bu artışın sebebi, nitrür tabakalarının faz yapısı, kalınlığı ve nitrürleme işlemi sonrasında kırılma karakterlerinde oluşan değişimdir. Yapısal analizler ve SGY incelemeleri kapsamında incelendiği üzere, artan proses sıcaklığı ve süresine bağlı olarak nitrür tabakalarının (beyaz tabaka ve/veya braunite tabakası) kalınlığı artmıştır. Bu kalınlık artışı ile de hem nitrür tabakalarının hem de taban malzemenin kırılmalığında artış gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bakımından da düşük nitrür tabaka kalınlıklarına sahip olan ve diğer numunelere kıyasla daha kararlı YÇİ davranışı gösteren numunelerde, UL etkisinin ortadan kalktığı görülmektedir. Ancak, yüksek tabaka kalınlıklarına sahip olan ve yapısında kırılmalık Braunite fazını bulunduran numunelerde ise hem bu fazın kırılmalığı hem de yapının genel kırılmalığı sebebiyle UL esnasında çatlak ilerleme oranı işlemsiz numuneyle karşılaştırıldığında büyük ölçüde artmıştır. Bu durum gerçekleştirilen fraktografik incelemeler ile de desteklenmiştir.

Şekil 4.47’de işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelere ait örnek kırılma görüntüleri verilmiştir. İşlemsiz numunenin 3D ve SEM görüntüsünden, UL sırasında çok küçük bir bölgenin etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca, SEM görüntüsünden UL anında işlemsiz numunede çatlak düzleminin bir miktar değiştiği belirlenmiştir (1 numaralı detay görüntüsü). 500°C-1s numunesinde ise, işlemsiz numunedekine benzer çatlak düzlemin değişmesi veya belirgin bir UL bölgesi tespit edilememiştir. Ayrıca, malzemenin kenar kısımlarındaki nitrür tabakasında herhangi bir kırılma görülmemiştir (2 numaralı detay görüntüsü). Bu durum, plazma nitrürleme işlemi sonrasında oluşan sert nitrür tabakalarının ve bası artık gerilmelerinin UL ile oluşan çatlak ucu çeki artık gerilmelerinden daha baskın olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak, artan beyaz tabaka kalınlığının kırılmalığı da beraberinde getirmesi sebebiyle 500°C-4s numunesi, UL uygulandıktan sonra kararsız çatlak ilerleme davranışı göstermiştir (benzer davranış

600°C-1s ve 600°C-4s numunelerinde de gözlemlenmiştir). Bununla birlikte, bu numunede diğer numunelere kıyasla daha belirgin bir UL bölgesi olduğu görülmüştür.

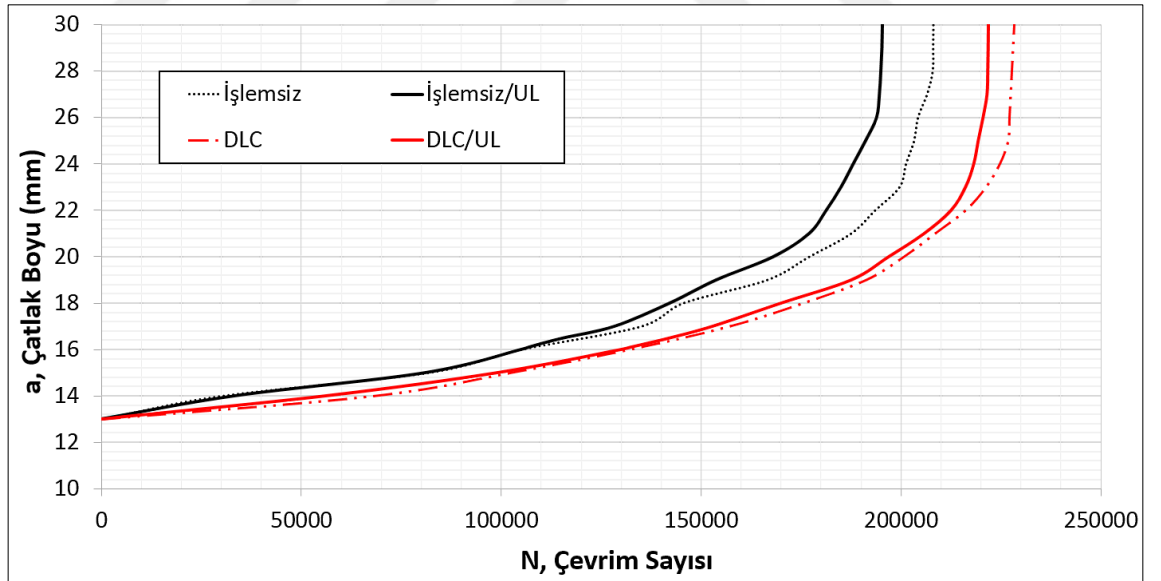


Şekil 4.47. Kırılma yüzey görüntüleri

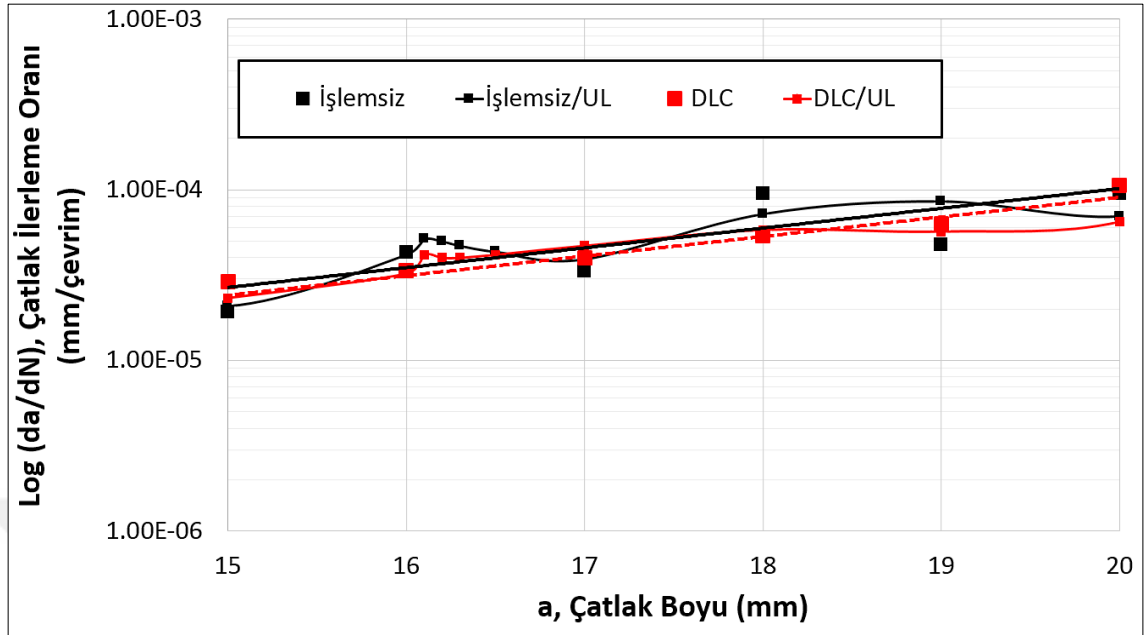
(a) işlemsiz numune, (b) 500°C-1s plazma nitrülenmiş numune ve (c) 500°C-4s plazma nitrülenmiş numune

4.2.3.b. DLC kaplama

İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin a - N eğrileri Şekil 4.48’de ve da/dN - a grafikleri Şekil 4.49’da gösterilmiştir. Burada, DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömründeki azalmanın işlemsiz numuneden daha düşük olduğu ve benzer şekilde DLC kaplanmış numunenin UL esnasındaki çatlak ilerleme oranının işlemsiz numuneden daha düşük olduğu belirlenmiştir. DLC kaplamanın YÇİ ömründeki azalmayı düşürmesinin sebebi daha önce de belirtildiği üzere, çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerinin etkisini azaltmasıdır. DLC kaplama sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan bası artık gerilmeleri, UL esnasında çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerinin etkisini azaltmıştır. Bununla birlikte, DLC film her ne kadar YÇİ ömründeki azalmayı düşürücü yönde etki etse de, çatlak ömründeki azalmayı/çatlak hızlanmasını tamamen ortadan kaldıramamıştır.



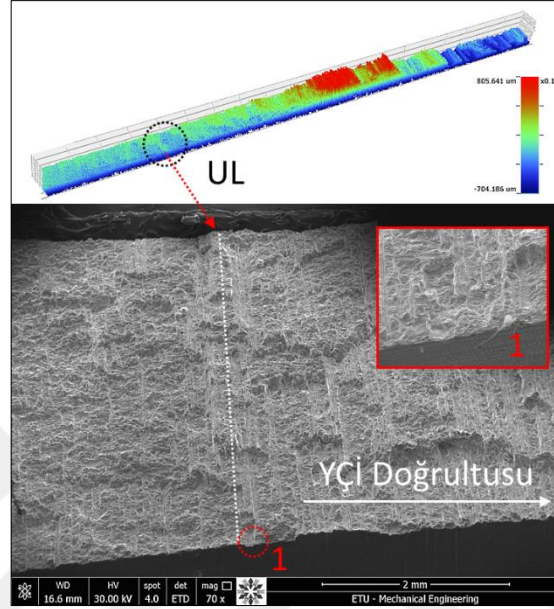
Şekil 4.48. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri



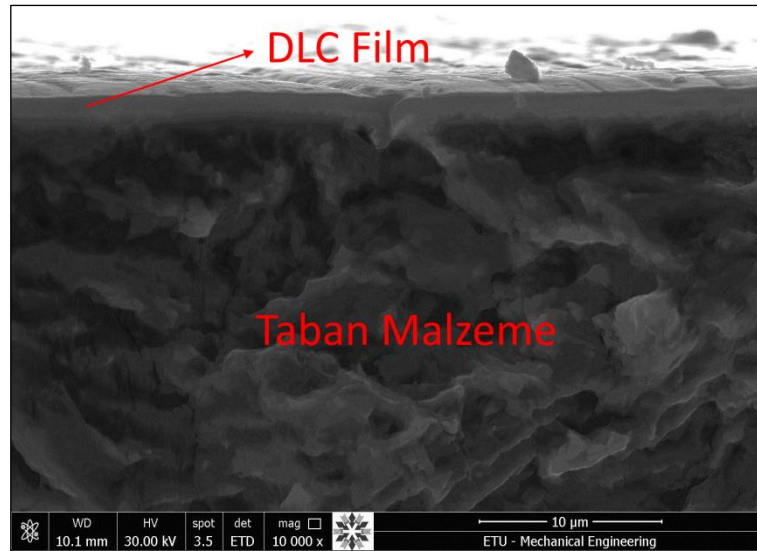
Şekil 4.49. UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

Şekil 4.50’de DLC kaplanmış numunenin kırılma yüzey görüntüsü verilmiştir. DLC kaplanmış numune, işlemsiz numune ile benzer kırılma davranışı göstermiştir. 1 numaralı detay görüntüsünden UL anında çatlak ilerleme düzleminin bir miktar değiştiği görülmektedir. Ancak buradaki değişim işlemsiz numuneyle karşılaştırıldığında oldukça azdır. Bu durum, DLC filmin çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerini engelleyici yönde etki etmesini desteklemektedir. İşlemsiz malzemede çatlak ucunda lokal olarak artan çeki gerilmesi malzemenin yüzeyinde çatlak düzleminin değişmesine sebep olmuştur. Ancak, DLC film çeki gerilmesinin etkisini azaltarak çatlak düzleminin değişmesini bir miktar engellemiştir. Ayrıca, DLC filmin UL esnasındaki detay görüntüsü Şekil 4.51’de verilmiştir. Burada, DLC filmin malzeme yüzeyinde herhangi bir çatlak oluşmadan veya kırılmadan tutunduğu görülmektedir. DLC film, UL anında stabil bir davranış göstermesine rağmen filmin çatlak ilerleme ömründeki azalmayı tamamen ortadan kaldıramamasının sebebi, malzemenin iç kısmında oluşan değişimleri engelleyememesidir. UL anında malzemenin sadece yüzeyinde değil aynı zamanda yüzeyin hemen altında da çatlaklar oluşmaktadır. DLC film malzeme yüzeyindeki çatlakları engellemesine rağmen, malzemenin yüzey

altındaki çatlakların etkisiyle yorulma çatlak ilerleme ömrü bir miktar azalma göstermiştir.



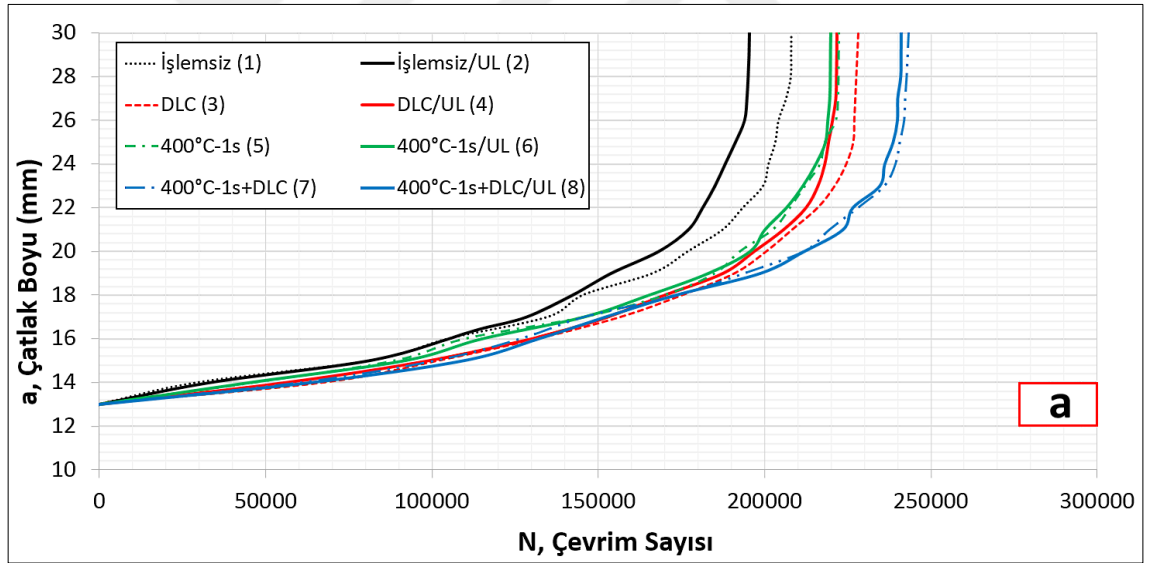
Şekil 4.50. DLC kaplanmış numunenin UL durumunda kırılma yüzey görüntüsü



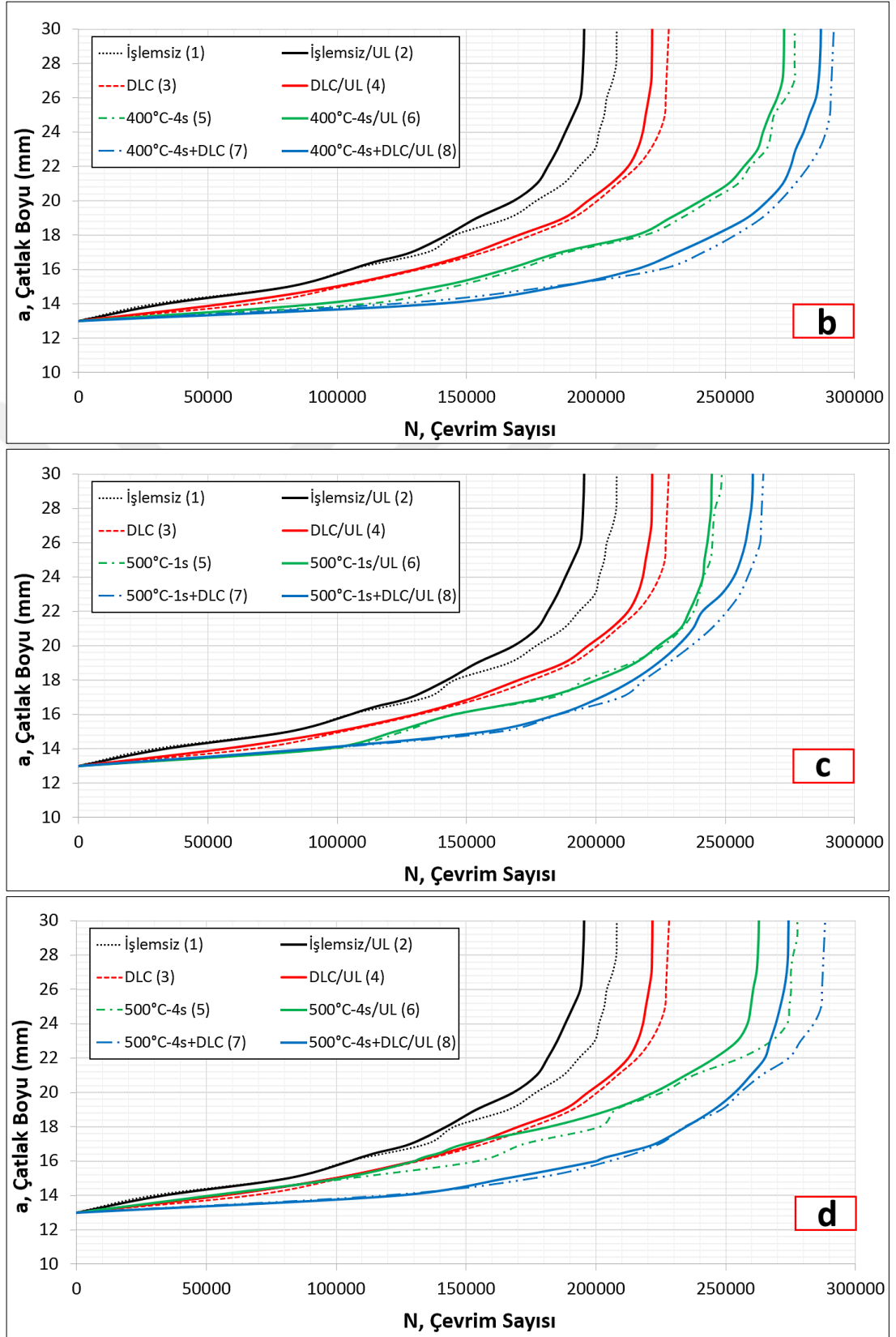
Şekil 4.51. UL durumunda DLC filmin detay görüntüsü

4.2.3.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması

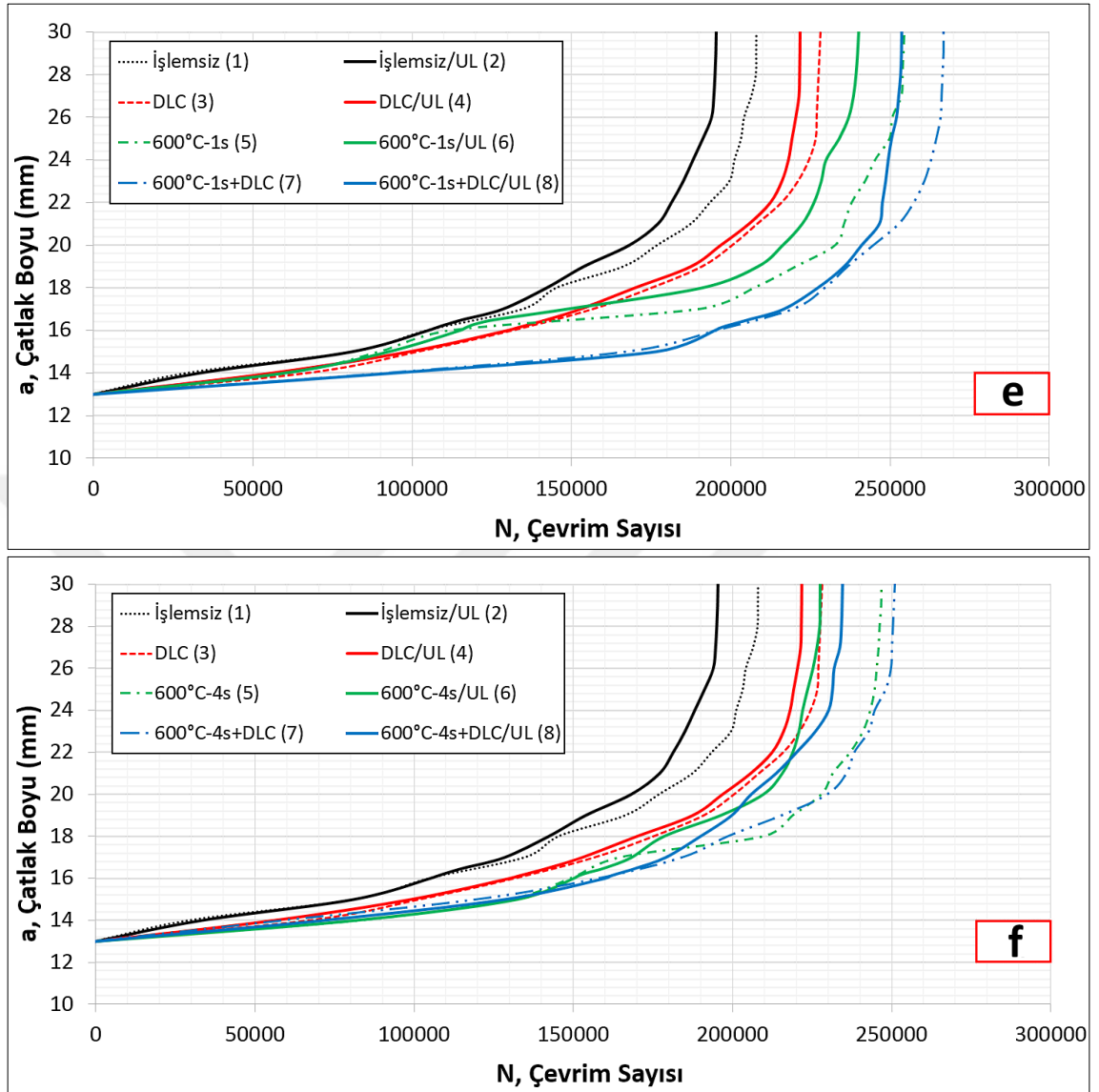
Dupleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve UL durumunda a-N eğrileri Şekil 4.52’de verilmiştir. Buradan, dupleks işlem görmüş numunelerde her bir işlem parametresi için YÇİ ömründeki azalmanın işlemsiz malzemeden daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. 400°C-1s+DLC, 500°C-1s+DLC ve 400°C-4s+DLC numunelerinde YÇİ ömründeki azalma miktarı işlemsiz ve DLC kaplanmış numuneden daha düşük seviyededir. Diğer numune gruplarında ise YÇİ ömrü işlemsiz ve DLC kaplanmış numuneye oranla daha fazla düşüş göstermiştir. Bu bakımdan, dupleks işlem görmüş malzemenin aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş malzeme ile benzer çatlak ilerleme davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.52. (devam)



Şekil 4.52. (devam)

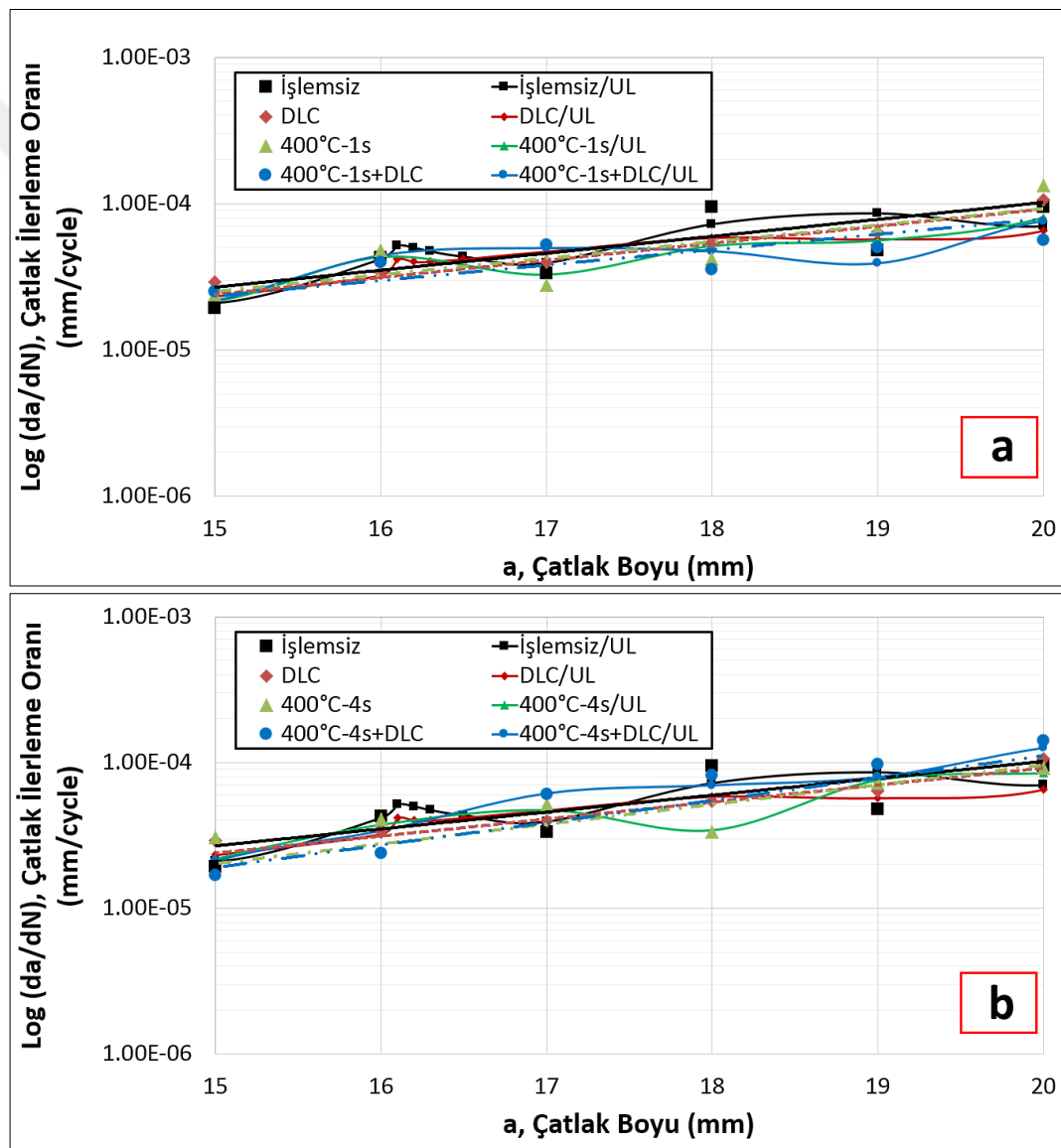


Şekil 4.52. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri

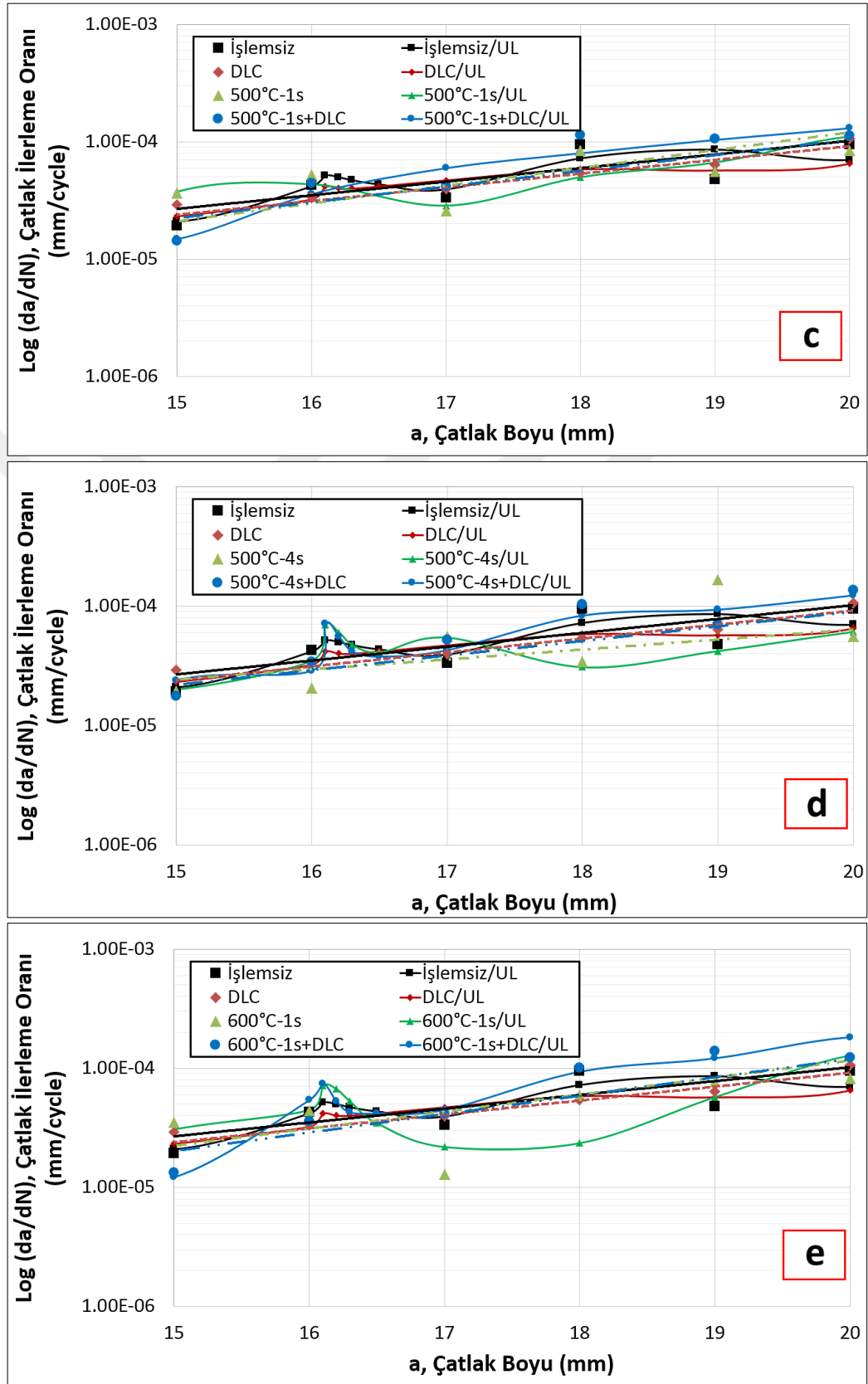
(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

İşlemsiz, plazma nitrürlenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin da/dN grafikleri Şekil 4.53'te verilmiştir. UL uygulandığında çatlak ilerleme oranı bütün numuneler için anlık olarak artış göstermiş ve kısa bir çatlak hızlanmasından sonra SGY davranışa geri dönmüştür. 400°C-1s, 500°C-1s ve 400°C-4s'lik numunelerin ve aynı şartlarda dubleks işlem görmüş numunelerin UL esnasındaki çatlak ilerleme oranı işlemsiz numuneden daha düşüktür ve sadece DLC kaplanmış

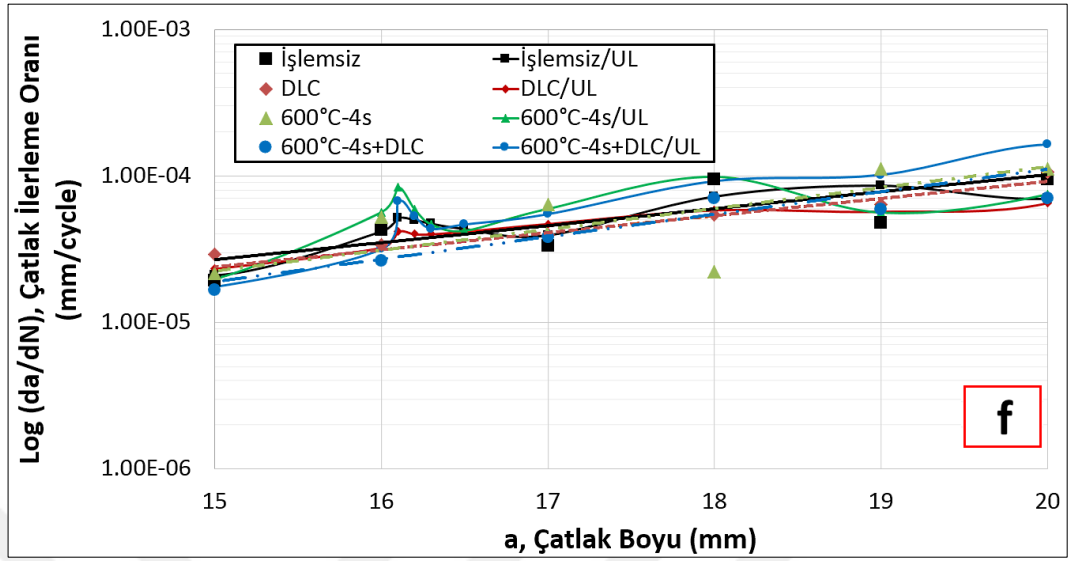
malzeme ile neredeyse aynı seviyededir. 600°C-1s, 500°C-4s ve 600°C-4s numuneleri ve aynı şartlarda dubleks işlem görmüş numunelerde ise, çatlak ilerleme oranı hem işlemsiz hem de sadece DLC kaplanmış numuneden daha fazla artış göstermiştir. Özellikle de YÇİ ömründe SGY durumuna göre en fazla azalma gösteren 600°C-4s ve 600°C-4s+DLC numunelerinde UL anında maksimum çatlak hızlanması gözlemlenmiştir.



Şekil 4.53. (devam)



Şekil 4.53. (devam)

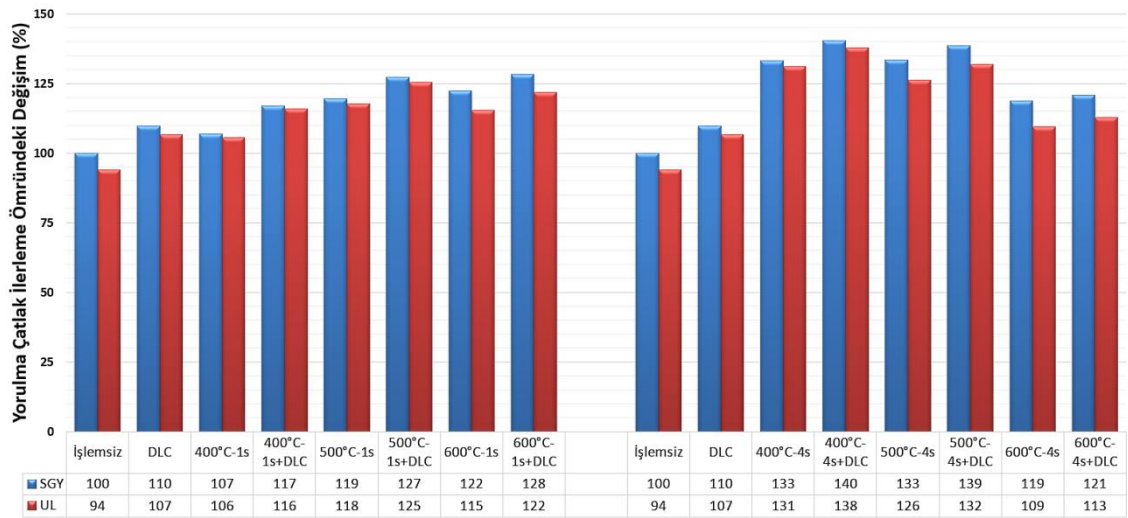


Şekil 4.53. UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

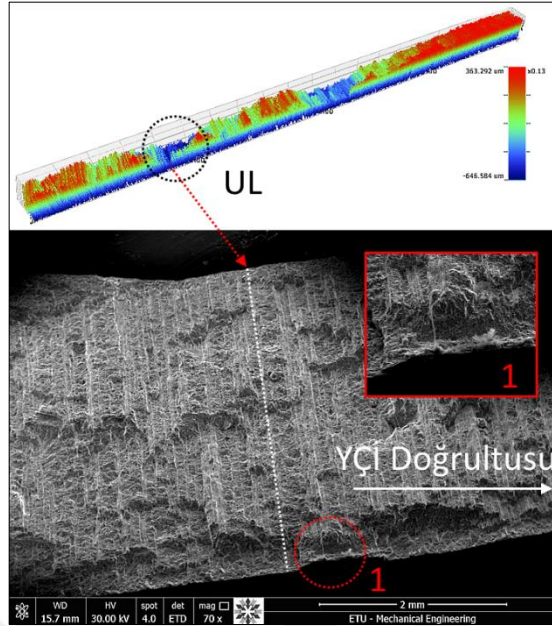
UL sonrasında, numunelerin YÇİ ömürlerindeki değişim, işlemsiz malzemenin SGY durumundaki YÇİ ömrü referans alınarak Şekil 4.54'te gösterilmiştir. UL sonrasında DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömründeki değişim işlemsiz numuneden daha azdır. Ayrıca, 400°C-1s, 500°C-1s ve 400°C-4s plazma nitrülenmiş ve aynı şartlarda dubleks işlem görmüş malzemenin YÇİ ömründeki azalmanın işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemeden daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Burada, plazma nitrüleme işleminin YÇİ ömründeki azalmayı DLC filminden daha fazla engellediği görülmüştür. Bunun sebebi, daha öncede açıklandığı üzere plazma nitrüleme işleminin difüzyon esaslı bir işlem olmasıdır. DLC film her ne kadar yüzeyde plazma nitrülenmiş numunelerden daha yüksek basınçta gerilmeleri oluştursa da filmin kalınlığı plazma nitrülenmiş numunelere kıyasla oldukça düşüktür. Plazma nitrülenmiş numunelerde en düşük işlem şartında dahi malzeme yüzeyinde DLC film kalınlığından çok daha fazla difüzyon tabakası oluşmaktadır. Bunun sonucunda, plazma nitrülenmiş numuneler UL esnasındaki değişimleri DLC filme kıyasla daha büyük oranda engellemiştir. Ancak bu durum her işlem parametresi için geçerli değildir. 600°C-1s, 500°C-4s ve 600°C-4s şartlarında sadece plazma nitrülenmiş ve dubleks işlem görmüş numunelerin; diğer tüm numune gruplarından daha fazla ömür değişimi gösterdiği tespit edilmiştir. Daha önce açıklandığı üzere, bu numune gruplarında UL esnasında malzeme yüzeyindeki

tabaka/tabakalar kırılarak YÇİ ömrünün diğer numunelere oranla daha fazla azalmasına sebep olmuştur. Bunlarla birlikte, dubleks işlem görmüş numuneler; çatlak ilerleme ömrünü kontrol eden mekanizmanın DLC filminden ziyade plazma nitrürleme olmasından dolayı, aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş numunelerle benzer ömür değişimi göstermişlerdir.



Şekil 4.54. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve UL durumunda işlemsiz numuneye göre ömür değişimi

Şekil 4.55'te dubleks işlem görmüş malzemeye ait örnek kırılma görüntüsü verilmiştir. Malzemenin UL sonrasındaki kırılma karakteri aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş numune ile benzerdir. Malzemenin çok büyük bir kısmı UL'den etkilenmiş ve UL sonrasında malzemede kararsız çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir. Ayrıca, plazma nitrürlenmiş numuneye benzer şekilde, nitrür tabakası UL sonrasında kırılmıştır (1 numaralı detay görüntüsü).



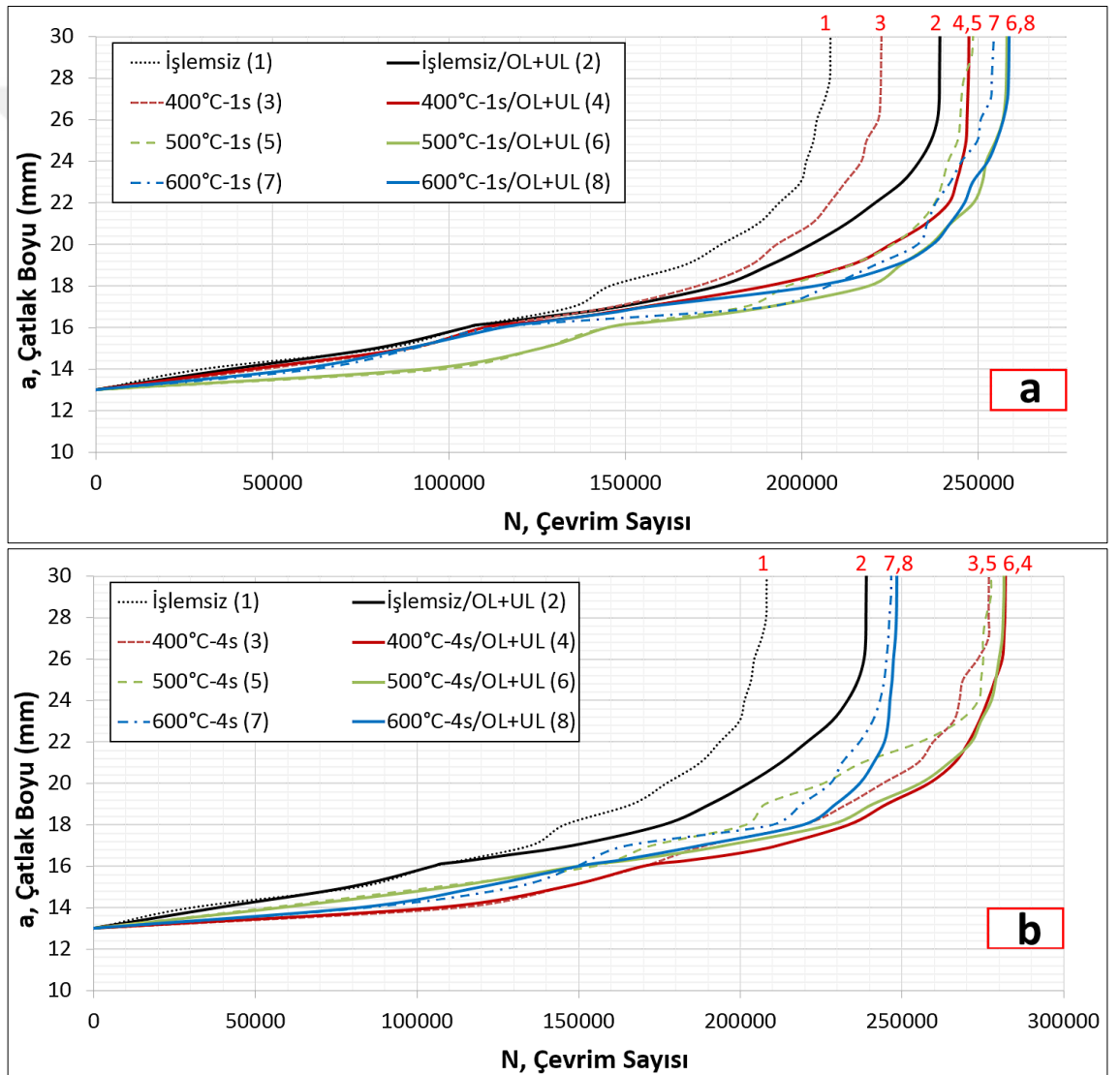
Şekil 4.55. 500°C-4s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü

4.2.4. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Çeki-Bası aşırı yüklemesi (Overload+Underload/OL+UL)

4.2.4.a. Plazma nitrürleme

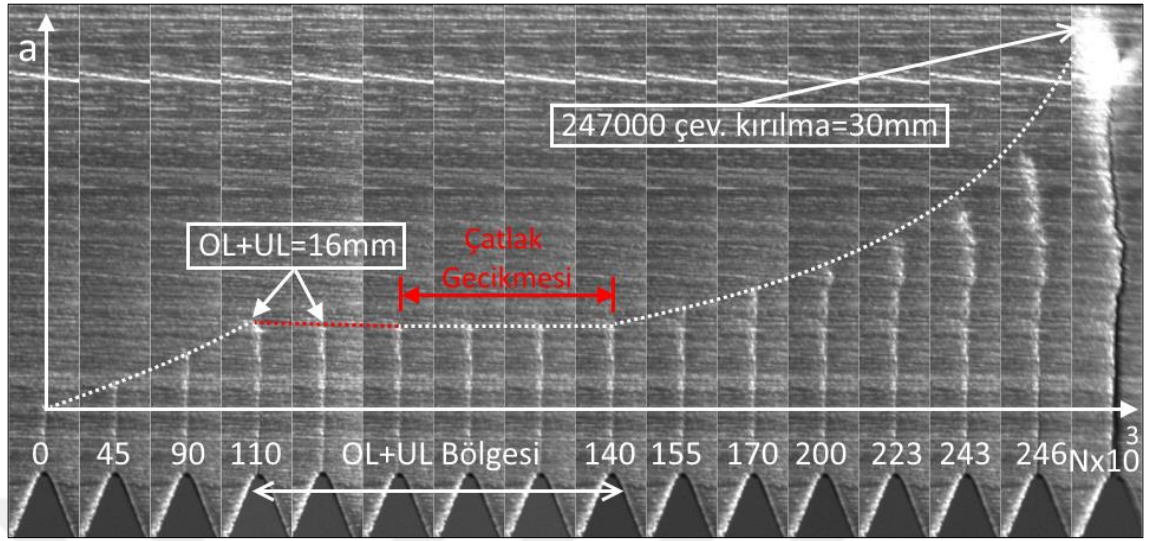
İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemenin OL+UL durumunda a-N grafikleri Şekil 4.56'da gösterilmiş ve uygulanan yükleme tipine ait çatlak ilerleme görüntüsü Şekil 4.57'de verilmiştir. OL+UL sonrasında malzemenin YÇİ ömrü hem işlemsiz hem de plazma nitrürlenmiş numunelerde artmıştır. Ayrıca, numunelerin YÇİ ömründeki değişim işlemsiz numunenin SGY durumundaki ömrü referans alınarak Şekil 4.58'de verilmiştir. OL+UL sonrasında işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemenin ömrü SGY durumuna göre artmıştır. Ancak, OL+UL durumunda elde edilen ömür artışı tekil OL durumunda elde edilenden düşüktür. OL'yi takiben uygulanan UL'nin YÇİ ömrünü tekil OL'ye göre düşürdüğü farklı çalışmalarda gözlemlenmiştir (Stephens *et al.* 1976; Skorupa 1998; Beden *et al.* 2009). Benzer şekilde, gerçekleştirilen testler sonrasında OL+UL sonrasında malzemenin YÇİ ömrü SGY durumuna göre artış göstermiş fakat bu artış tekil OL durumundan daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, elde

edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde; işlemsiz malzemedeki ömür artışının plazma nitrülenmiş malzemedan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İşlemsiz malzemedan sonra en yüksek ömür artışı 400°C-1s numunesinden elde edilmiş ve diğer numunelerde artan proses sıcaklığı ve süresi ile ömür artış oranı azalmıştır. Özellikle, 500°C-4s, 600°C-1s ve 600°C-4s numunelerinde SGY ömrüne yakın değerler elde edilmiştir.

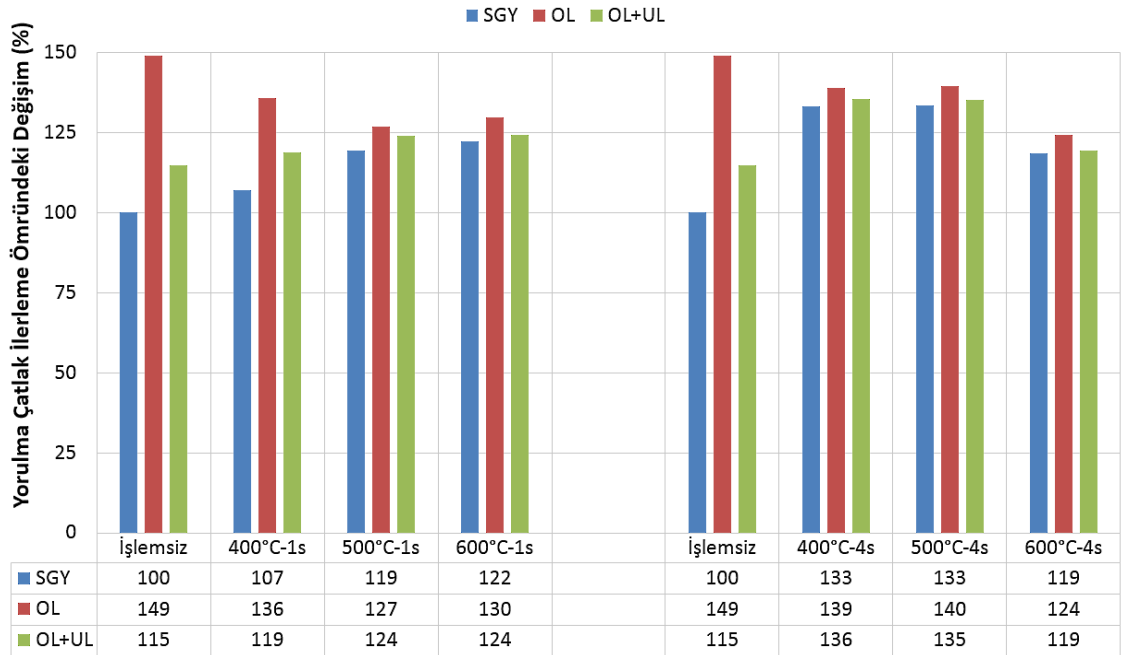


Şekil 4.56. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri

(a) 1 saat süre ile plazma nitrüleme ve (b) 4 saat süre ile plazma nitrüleme



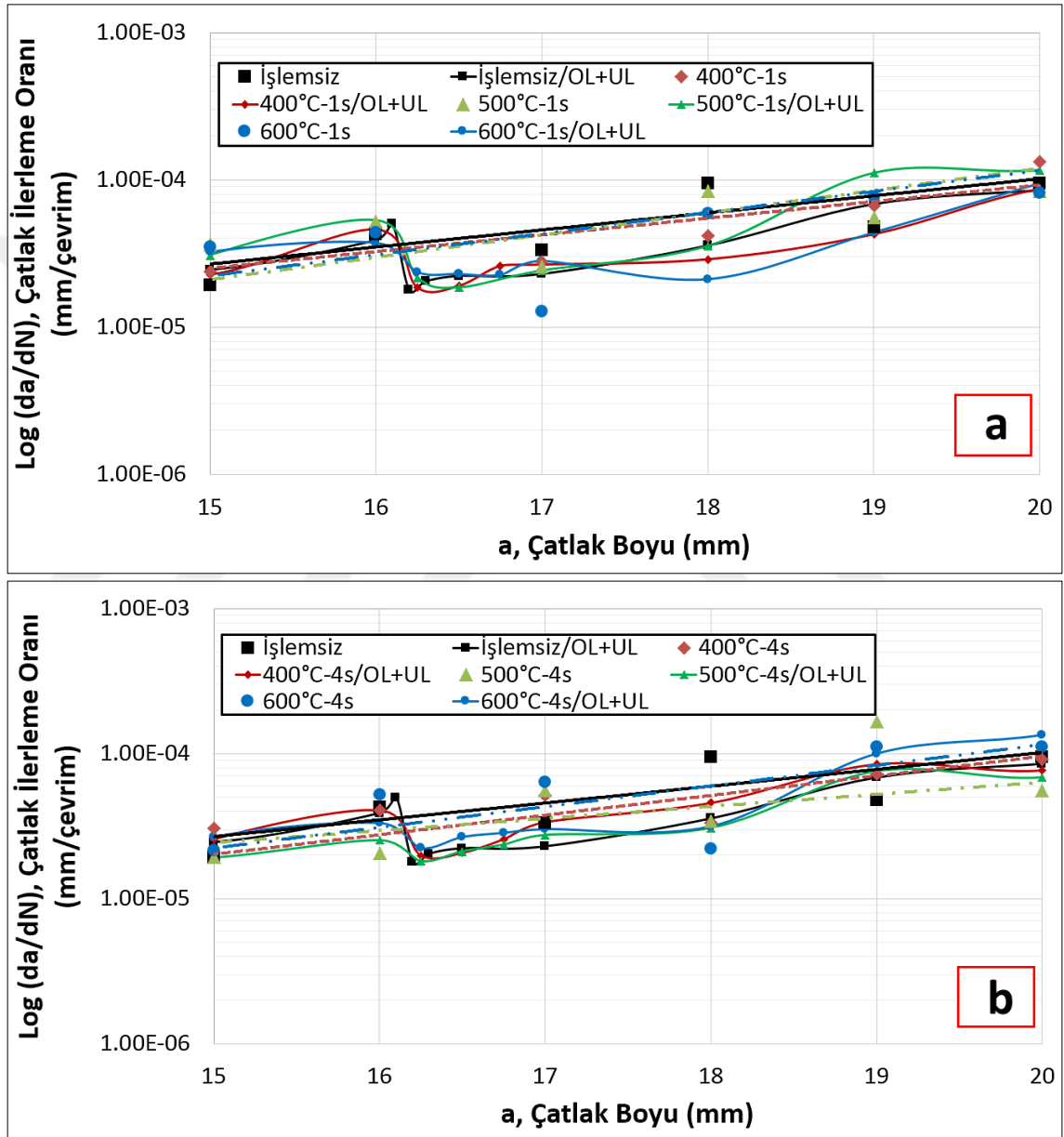
Şekil 4.57. OL+UL durumunda 400°C-1s numunesinin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü



Şekil 4.58. İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş numunelerde SGY, OL ve OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim

İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemenin da/dN-a grafikleri Şekil 4.59’da verilmiştir. Burada, OL+UL sonrasında tekil OL durumuna benzer şekilde malzemelerin çatlak ilerleme oranının belirli bir periyot boyunca azaldığı görülmektedir. Ancak çatlak

ilerleme oranındaki azalma tekil OL'ye kıyasla oldukça düşüktür. Bununla birlikte, çatlak ilerleme oranı işlemsiz numunede en düşük seviyeye ulaşmış ve diğer numunelerde işlemsiz numuneden daha yüksek çatlak ilerleme oranı elde edilmiştir.

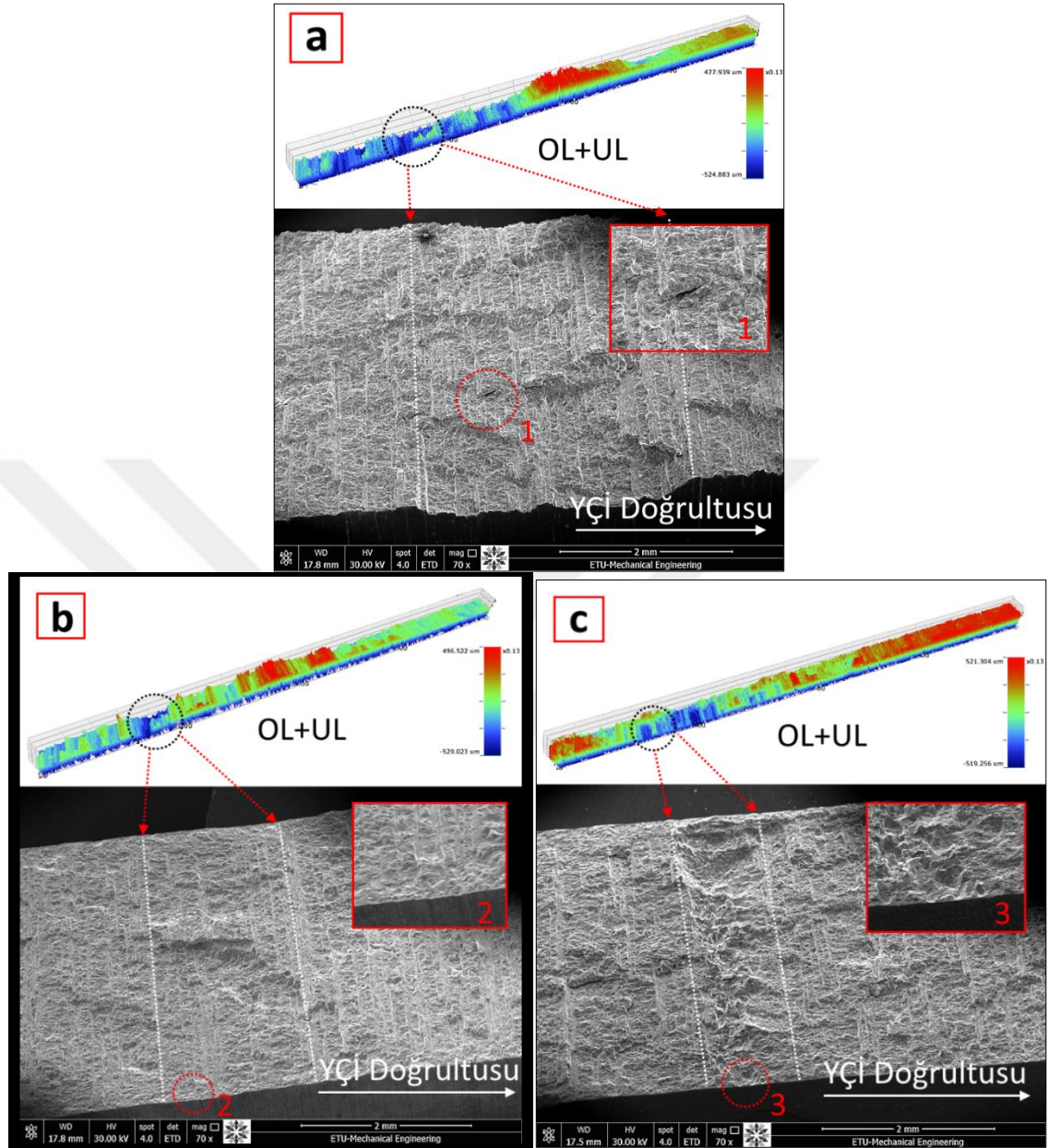


Şekil 4.59. OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi
(a) 1 saat plazma nitrürleme ve (b) 4 saat plazma nitrürleme

OL+UL durumunda çatlak ilerleme ömründeki değişimi belirleyen temel mekanizma OL'dir. Şayet, UL durumu daha önce de belirlendiği üzere malzemelerin YÇİ ömrü

üzerinde OL'den çok daha az etkilidir. Bu bakımdan, tekil OL durumunda elde edilen sonuçlarla orantılı olarak, OL+UL durumunda en yüksek YÇİ ömrü işlemsiz numuneden elde edilmiştir. Plazma nitrülenmiş malzemelerde ise azalan çatlak ucu plastisitesi sebebiyle işlemsiz numuneden daha düşük YÇİ ömür artışı gerçekleşmiştir. Burada, dikkat çekici nokta; ömür artış oranlarının artan plazma nitrüleme sıcaklığı ve süresi ile azalmasıdır. Bunun sebebi de, OL sonuçlarında gösterildiği üzere, plazma nitrüleme sonrasında yapının gevrekleşmesi ve SGY durumunda nitrür tabaklarının kırılgan özellikte olmasıdır. OL+UL durumunda numunelerin kırılma görüntüleri Şekil 4.60'ta gösterilmiştir. Burada, OL+UL sonrasında malzemelerde belirgin bölgeler boyunca yüzey pürüzlülüğünün değiştiği görülmektedir fakat elde edilen sonuçlarla orantılı olarak işlemsiz numunede çatlak gecikme periyodu boyunca diğer numunelerden daha büyük bir OL+UL bölgesi oluşmuştur. Ayrıca, OL+UL sırasında işlemsiz malzeme çatlak ilerleme düzlemi malzemenin kenarı ve merkezi boyunca değişmiş ve malzemenin iç/merkez kısmında çatlak oluşumu gözlemlenmiştir (1 numaralı detay görüntüsü).

Plazma nitrülenmiş malzemelerde ise, malzemenin kenarında/yüzeyinde ve hemen yüzey altında bulunan sert nitrür tabaklarından dolayı; malzemenin yüzeyinde çatlak ilerleme düzlemleri OL+UL bölgesinde çok küçük değişimler göstermiştir. Ancak, malzemenin merkezinde, yüzeye göre sertliğin nispeten daha düşük olması sebebiyle çatlak ilerleme düzleminin değiştiği belirlenmiştir. Özellikle, diğer numunelere kıyasla daha yüksek nitrür tabakası kalınlıklarına sahip olan 600°C-4s numunesi OL+UL bölgesi boyunca tamamen gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Bunlarla birlikte, 2 ve 3 numaralı detay görüntülerinden görüleceği üzere, nitrür tabakaları her ne kadar YÇİ ilerlemesi için engel oluşturup çatlak ilerleme düzleminin değişmesini engellese de, OL+UL durumunda bu tabakalar birden fazla noktadan kırılmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, plazma nitrüleme işleminin; artan gevrek kırılma eğilimi ve sert nitrür tabakalarının kırılganlığı sebebiyle, YÇİ ömrünü işlemsiz numuneye oranla daha az artırdığı sonucuna varılmıştır.



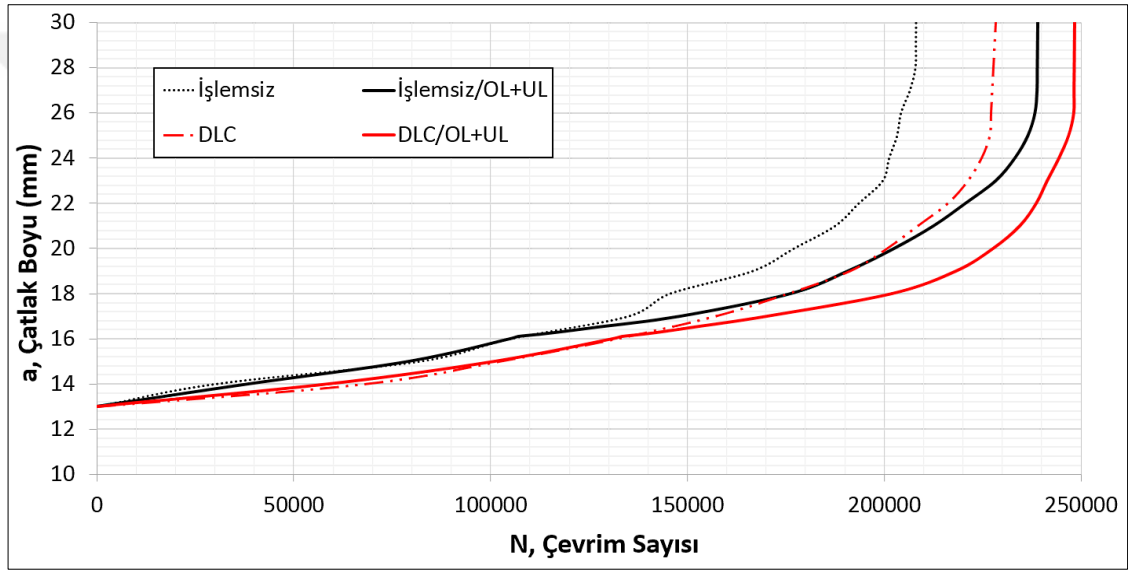
Şekil 4.60. Kırılma yüzey görüntüleri

(a) işlemsiz numune, (b) 500°C-4s plazma nitrülenmiş numune ve (c) 600°C-4s plazma nitrülenmiş numune

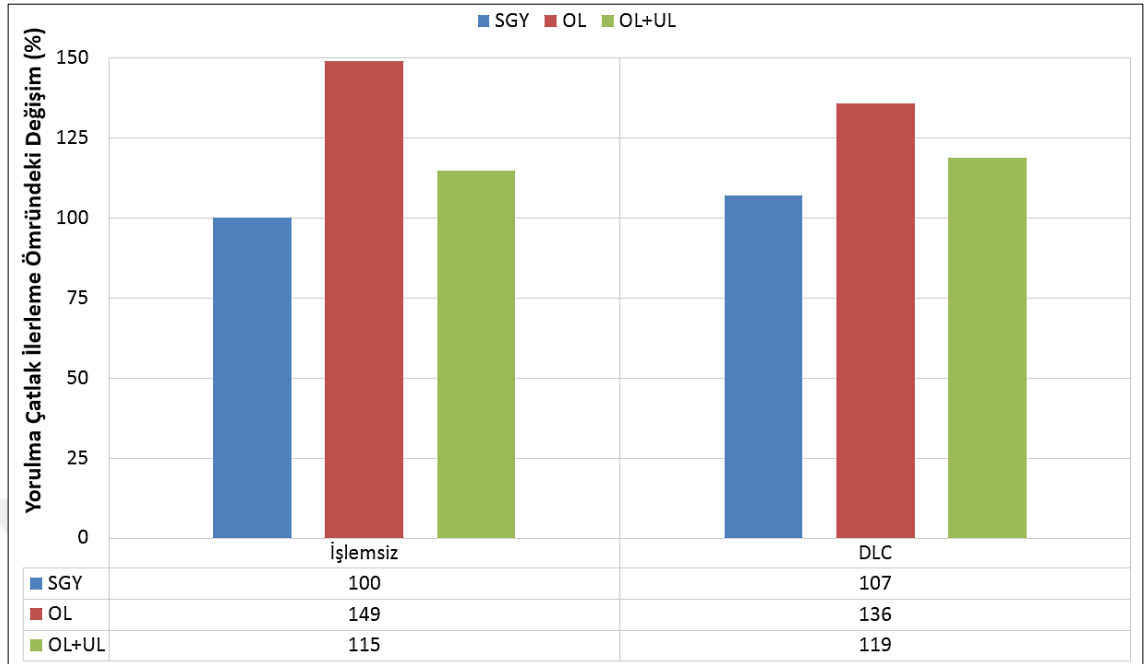
4.2.4.b. DLC kaplama

İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin a-N grafiği ve YÇİ ömründeki yüzde değişim sırasıyla Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de verilmiştir. OL+UL sonrasında malzemelerin YÇİ ömürleri SGY durumuna göre artış göstermiş fakat bu artış tekil OL yüklemesinden

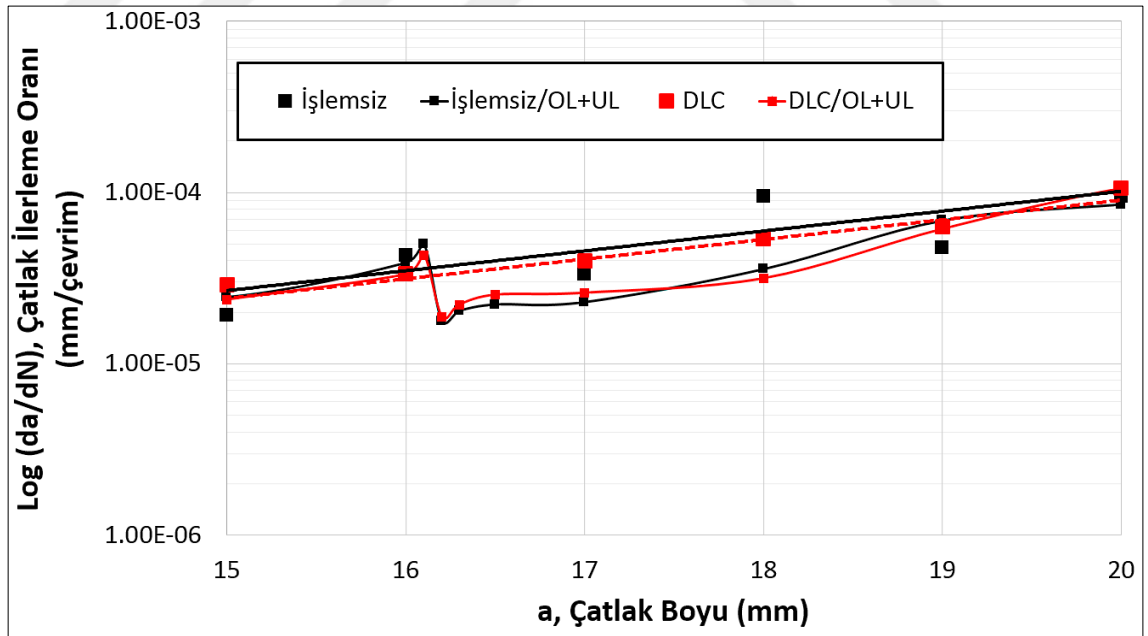
daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemelerde SGY durumuna göre ömür artış oranları oldukça yakındır. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin da/dN -a grafiği Şekil 4.63'te verilmiştir. Burada, işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin OL+UL sırasında benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Her iki malzeme, anlık bir çatlak hızlanmasından sonra minimum çatlak ilerleme oranına ulaşmış ve akabinde belirli bir periyot sonunda SGY durumundaki YÇİ oranına ulaşmıştır.



Şekil 4.61. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri

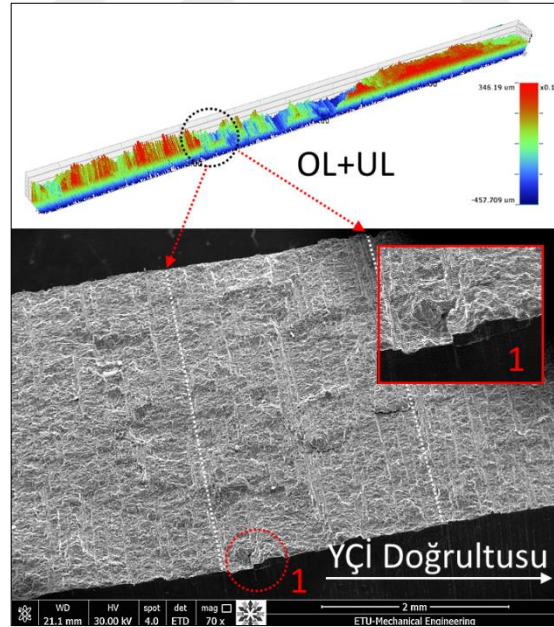


Şekil 4.62. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemede SGY, OL ve OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim



Şekil 4.63. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

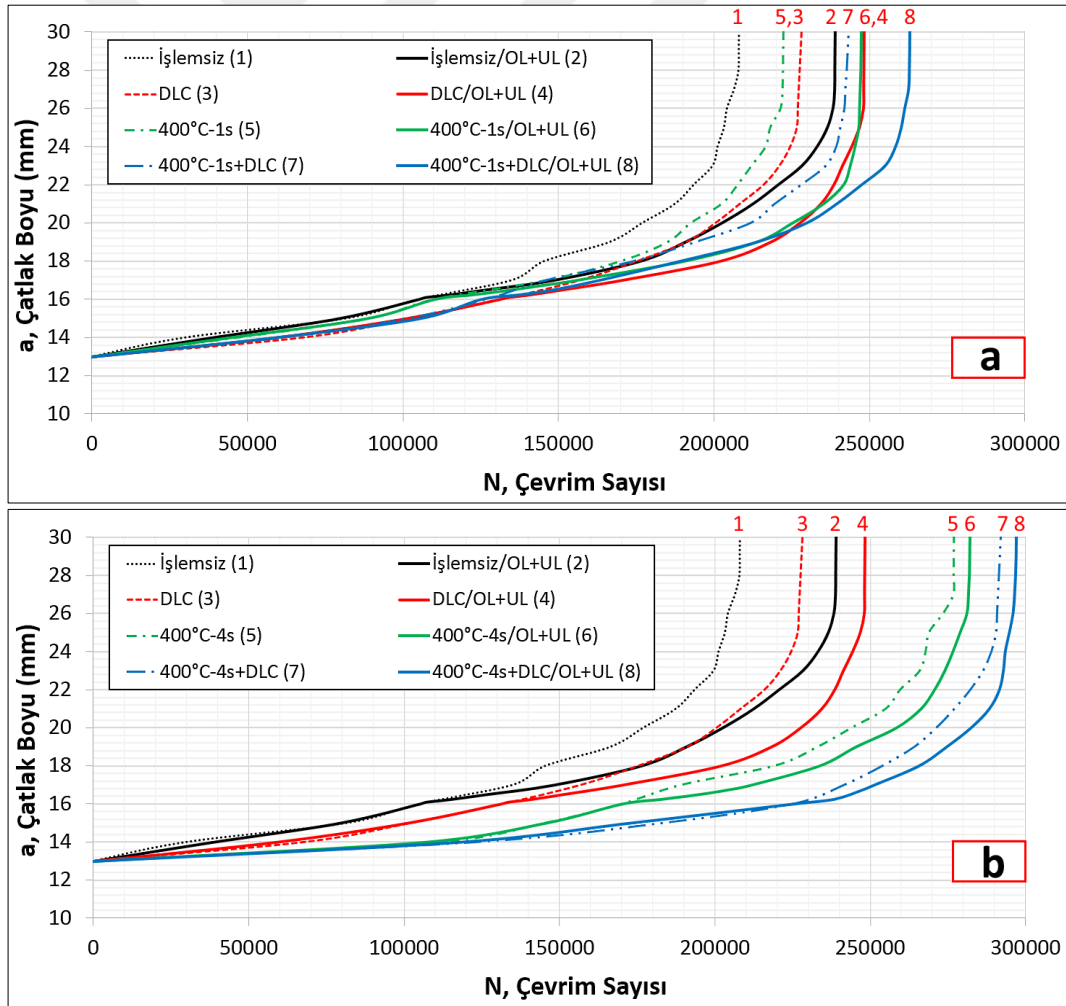
DLC kaplanmış malzemenin kırılma yüzey görüntüsü Şekil 4.64'te verilmiştir. Burada, OL+UL durumunda malzemenin işlemsiz malzemeye benzer kırılma davranışı gösterdiği görülmektedir. OL+UL bölgesi boyunca yüzey pürüzlüğü değerleri büyük ölçüde değişmiştir. İşlemsiz numuneden farklı olarak DLC kaplanmış malzemede, DLC filmin YÇİ için engel teşkil etmesi sebebiyle, malzemenin kenar kısımlarında işlemsiz numuneye oranla daha düzgün bir kırılma düzlemi olduğu gözlemlenmiştir. DLC film her ne kadar malzeme yüzeyinde YÇİ için engel teşkil etse de, OL+UL anında taban malzemenin kenar kısmında büyük bir kırılma bölgesi olduğu gözlemlenmiştir (1 numaralı detay görüntüsü). Buradan görüleceği gibi, DLC filmde bu kırılmanın etkisi ile taban malzeme ile birlikte kırılmıştır. Bu durum OL+UL durumunda; işlemsiz malzeme ile DLC kaplanmış malzemenin benzer oranda YÇİ ömür artışı gösterdiğini açıklamaktadır. DLC film her ne kadar YÇİ için engel oluştursa da OL+UL anında taban malzeme ile benzer davranış göstermiş ve bu sebeple işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemede birbirine oldukça yakın oranda ömür artışı elde edilmiştir.



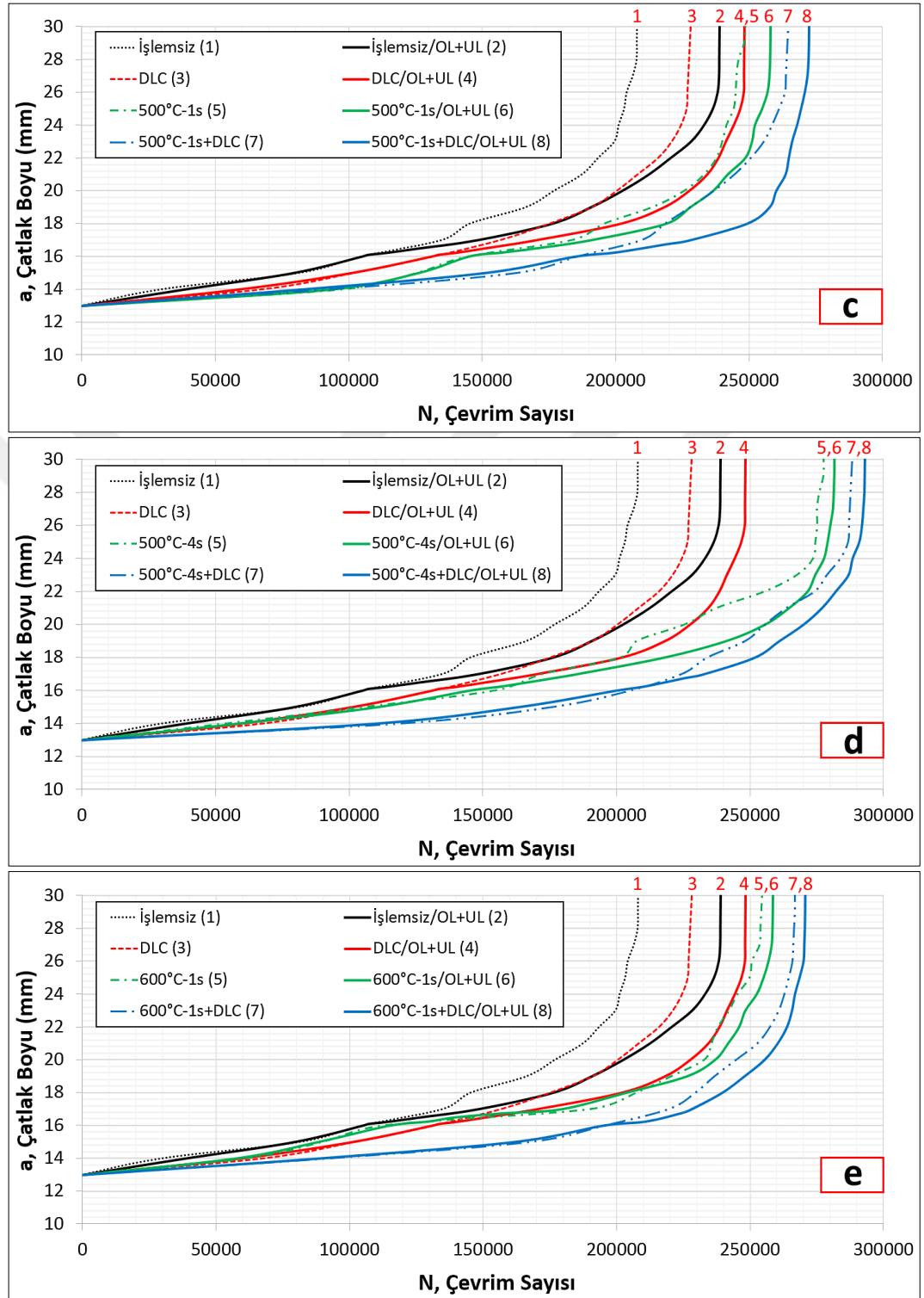
Şekil 4.64. DLC kaplanmış numunenin OL+UL durumunda kırılma yüzey görüntüsü

4.2.4.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması

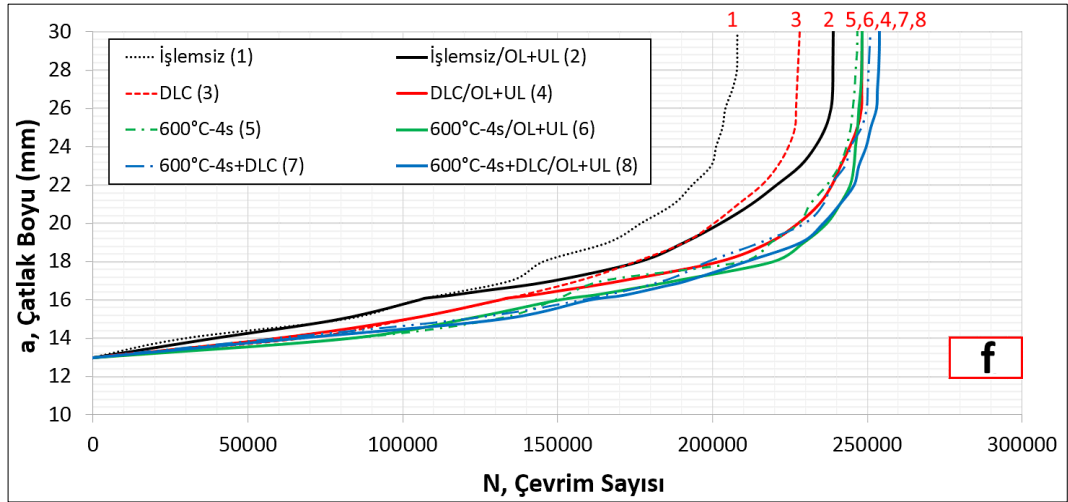
Dupleks işlem uygulanmış malzemenin SGY ve OL+UL durumunda a-N grafikleri Şekil 4.65'te verilmiştir. Dupleks işlem görmüş numunelerde her bir işlem için YÇİ ömründeki artışın, işlemsiz malzemeden daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Her bir işlem parametresi için grafikler incelendiğinde, işlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin YÇİ ömürlerinin plazma nitrürlenmiş ve dupleks işlem uygulanmış malzemeden daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, her bir dupleks işlem parametresi için; YÇİ ömründeki artış aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş malzemedekine yakın seviyede gerçekleşmiştir.



Şekil 4.65. (devam)



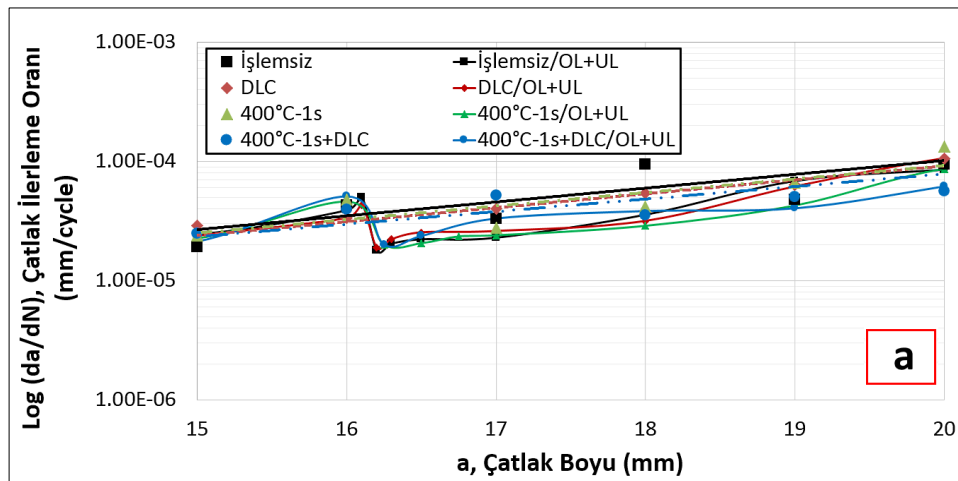
Şekil 4.65. (devam)



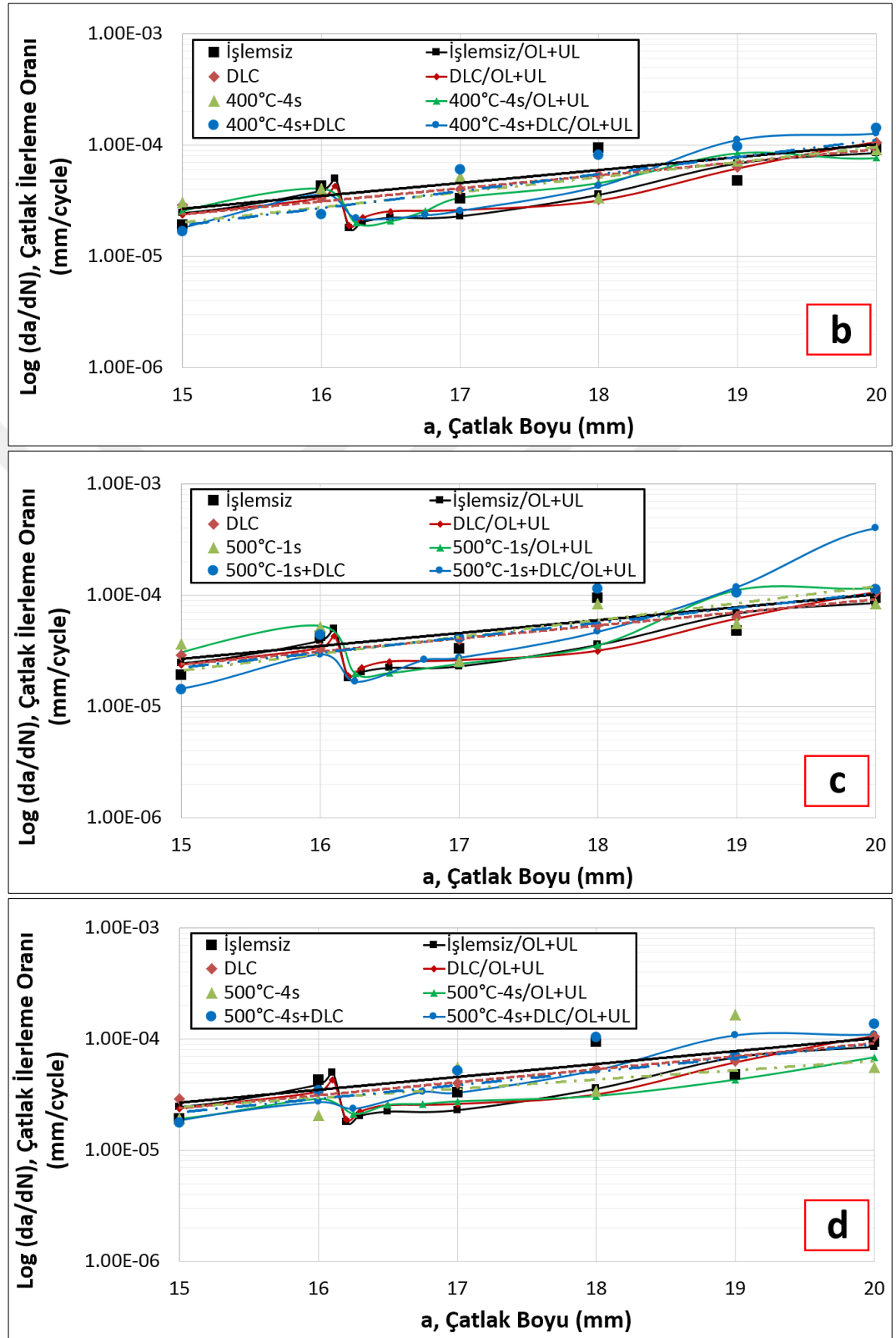
Şekil 4.65. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri

(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

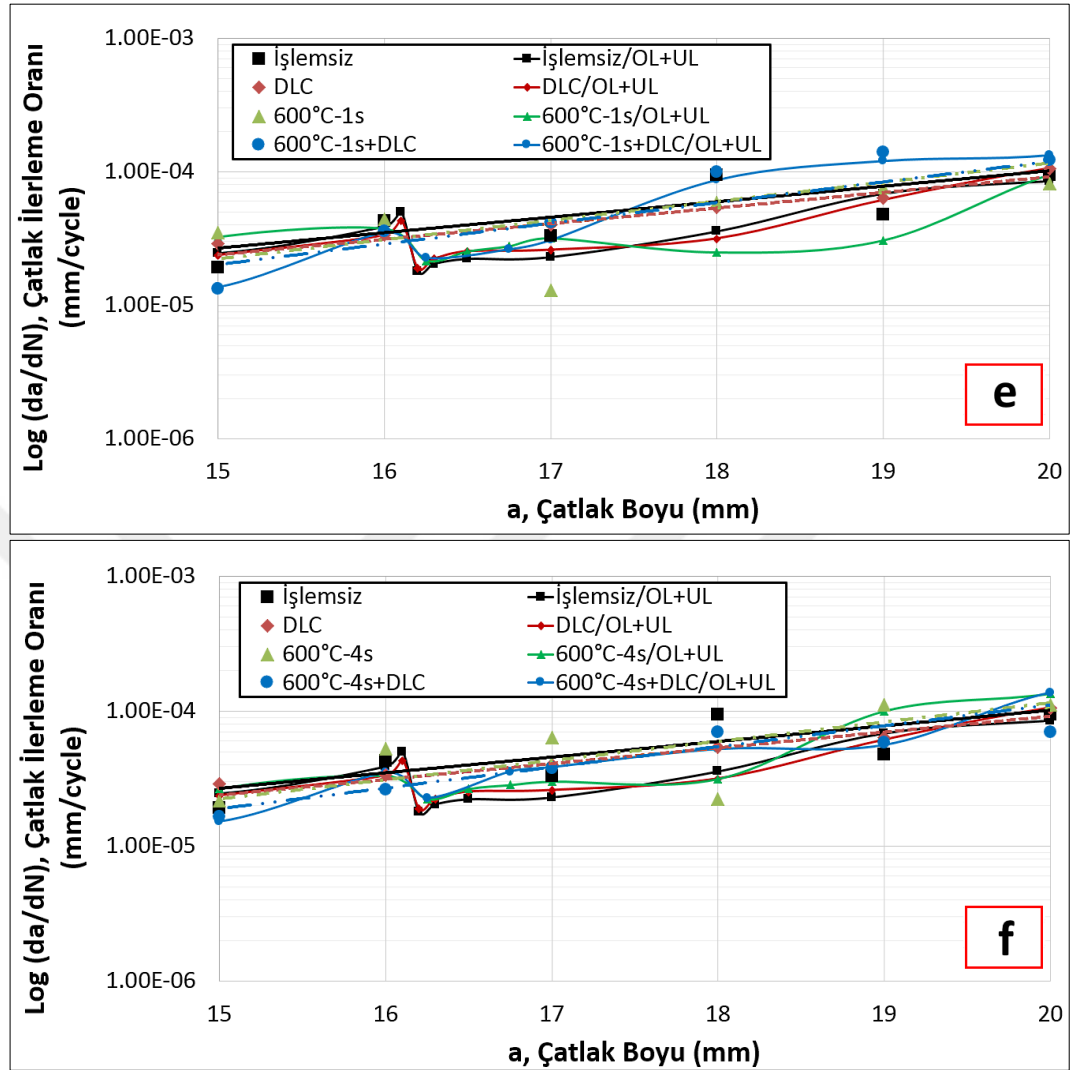
İşlemsiz, plazma nitrürlenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin da/dN -a grafikleri Şekil 4.66'da verilmiştir. OL+UL durumunda çatlak ilerleme oranı bütün numuneler için anlık olarak artış göstermiş ve kısa bir çatlak gecikmesinde sonra SGY seviyesindeki çatlak ilerleme oranına geri dönmüştür. Bununla birlikte, çatlak ilerleme oranındaki azalma tekil OL'ye nazaran oldukça düşük seviyededir. Ayrıca, her bir dubleks işlem için çatlak ilerleme oranındaki değişim aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş malzeme ile benzerdir.



Şekil 4.66. (devam)



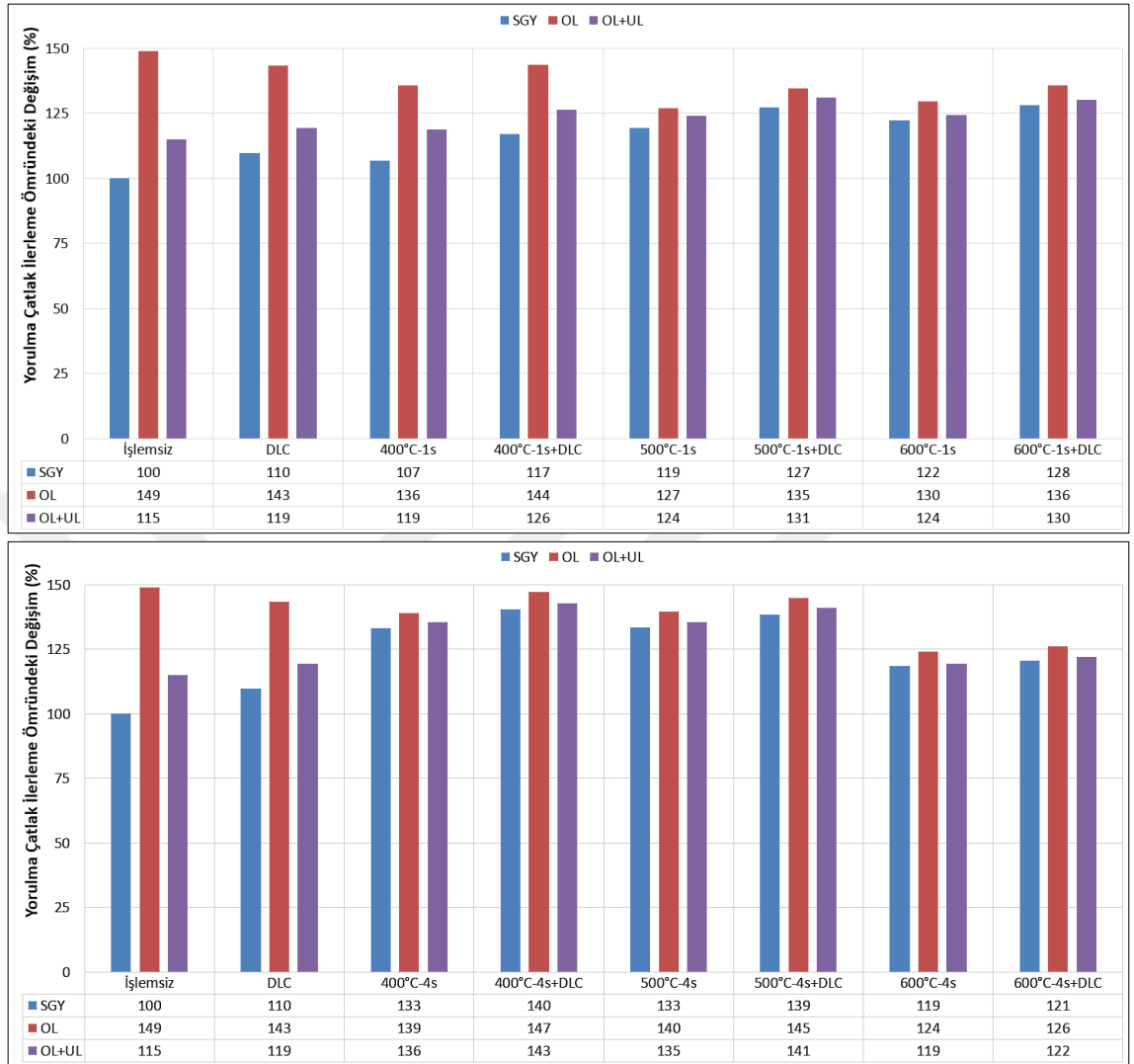
Şekil 4.66. (devam)



Şekil 4.66. OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

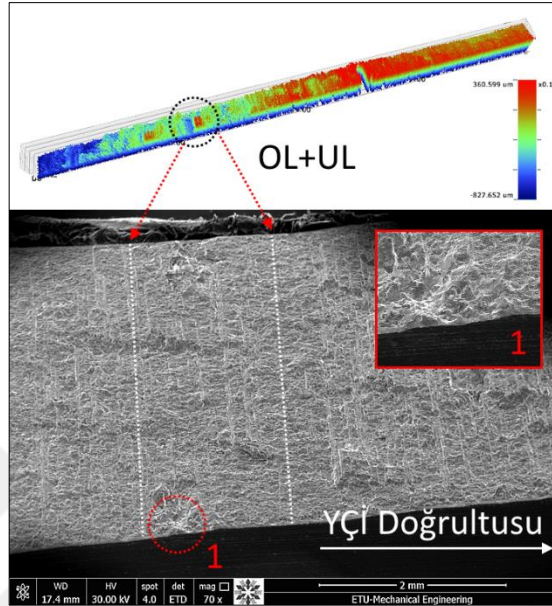
OL+UL durumunda, malzemenin YÇİ ömürlerindeki yüzde değişim, işlemsiz malzemenin SGY durumundaki YÇİ ömrü referans alınarak Şekil 4.67’de gösterilmiştir. OL+UL sonrasında bütün numuneler için YÇİ ömründeki artış tekil OL durumundan daha düşüktür. Ayrıca, işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömründeki artış oranı, plazma nitrülenmiş ve dubleks işlem uygulanmış malzemelerden daha yüksektir. Ayrıca, dubleks işlem görmüş numuneler; YÇİ olayını kontrol eden mekanizmanın DLC filminden ziyade plazma nitrüleme olması sebebiyle, aynı şartlarda sadece plazma nitrülenmiş numunelerle benzer ömür değişimi göstermişlerdir.



Şekil 4.67. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemede SGY, OL ve OL+UL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim

Dubleks işlem uygulanmış malzemeye ait örnek kırılma görüntüsü Şekil 4.68’de verilmiştir. Buradan, dubleks işlem uygulanmış numunenin aynı şartlarda sadece plazma nitrülenmiş malzeme (500°C-4s) ile benzer kırılma davranışı gösterdiği görülmektedir. OL+UL esnasında malzemenin yüzey pürüzlülüğü değeri değişmiştir. Sadece plazma nitrülenmiş malzemeye benzer şekilde, dubleks işlem uygulanmış malzemede de yüzeydeki sert nitrür tabakaları ve DLC filmin ortak etkisi sonucunda malzemede çatlak ilerleme düzleminin çok değişmediği tespit edilmiştir. Ancak, dubleks işlem görmüş numunede de malzemenin yüzeyine oranla daha sünek davranış gösteren merkez kısmında çatlak düzlemi bir miktar değişmiştir. Ayrıca, aynı şartlarda

sadece plazma nitrürlenmiş malzemede gözlemlenen nitrür tabakalarının kırılması burada da görülmüştür (1 numaralı detay görüntüsü).



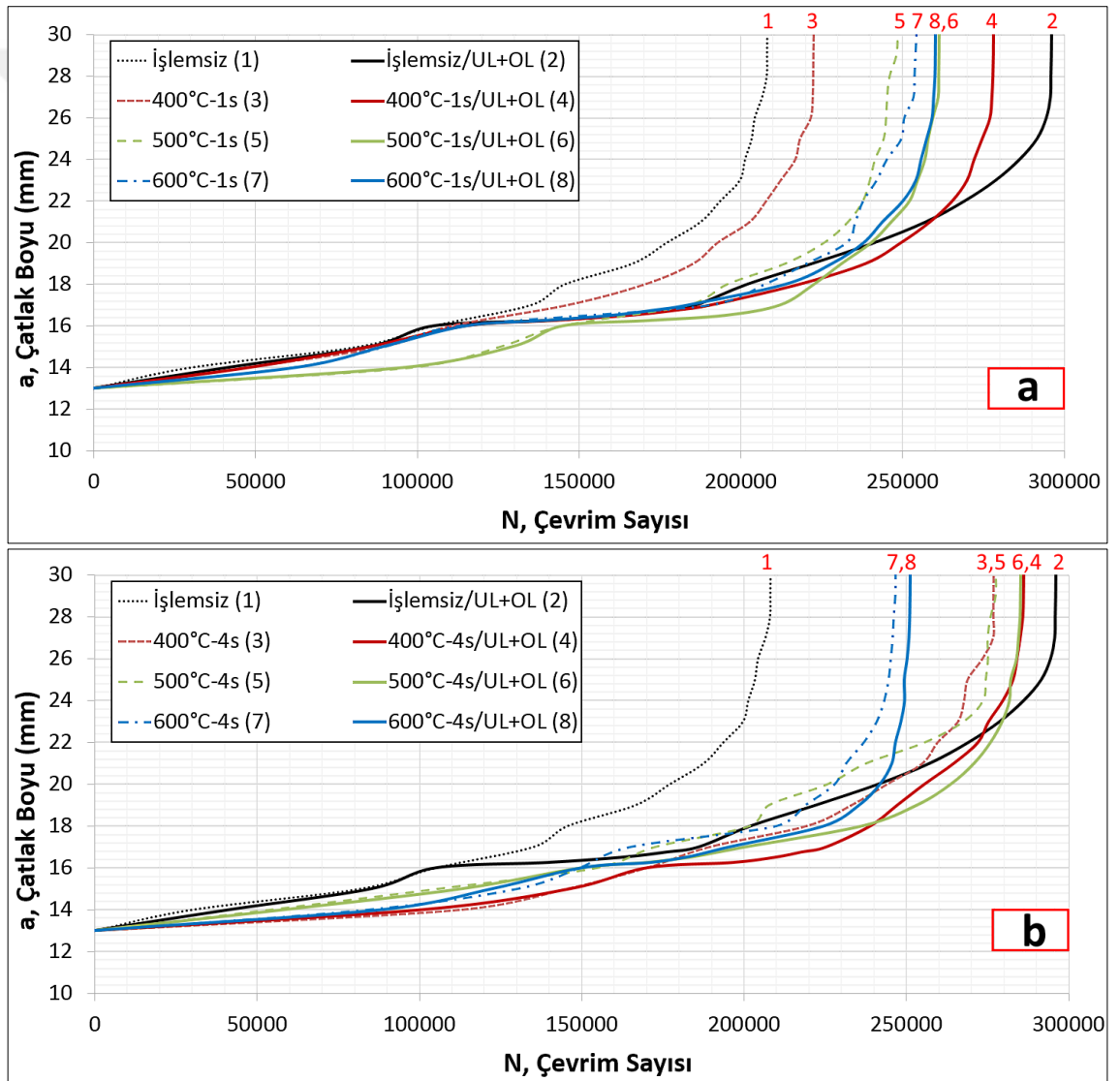
şekil 4.68. 500 C-4s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü

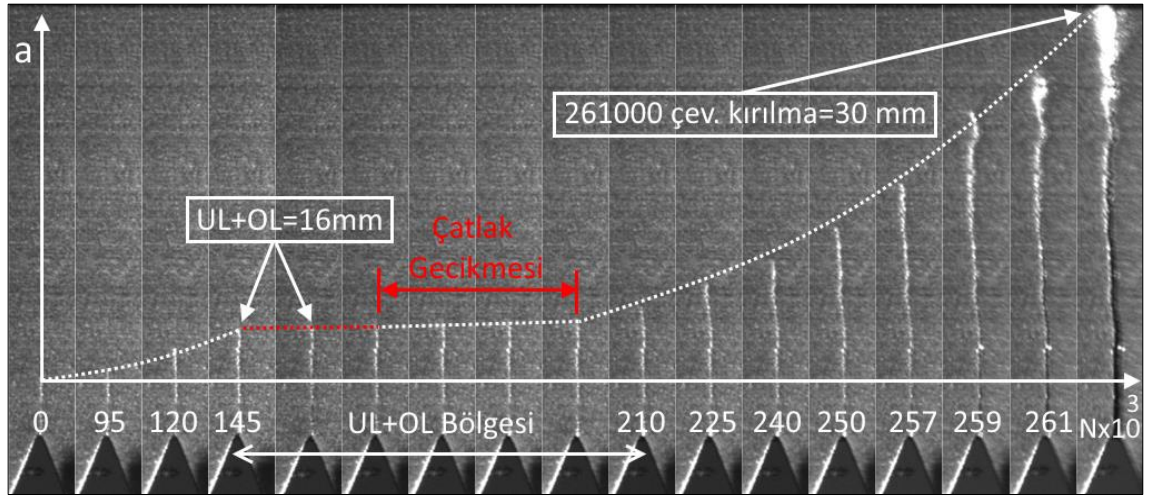
4.2.5. Değişken genlikli yükleme durumunda yorulma çatlak ilerlemesi analizleri: Bası- eki aşırı yüklemesi (Underload+Overload/UL+OL)

4.2.5.a. Plazma nitrürleme

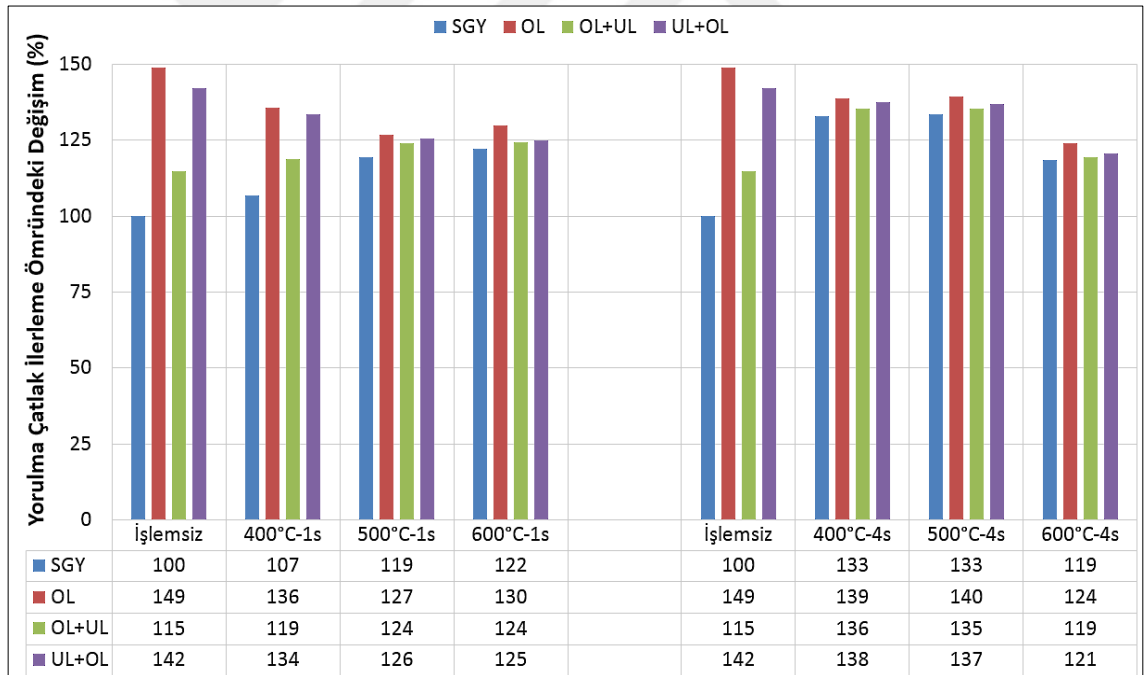
UL+OL durumunda işlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemenin a-N grafikleri şekil 4.69'da gösterilmiş ve yorulma çatlak ilerleme görüntüsü şekil 4.70'te verilmiştir. Ayrıca, numunelerin Y İ  mr ndeki değişim işlemsiz numunenin SGY durumundaki ömrü referans alınarak şekil 4.71'de verilmiştir. UL+OL sonrasında Y İ  mr  hem işlemsiz hem de plazma nitrürlenmiş numunelerde artmıştır. UL+OL yüklemesi sonrasında numunelerin Y İ  mr  SGY ve OL+UL durumlarına göre artış göstermiş fakat numunelerden tekil OL yüklemesinden daha düşük Y İ  mr  elde edilmiştir. Bu durum literatürde farklı çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Stephens *et al.* 1976; Skorupa 1998; Beden *et al.* 2009). Tekil OL deneylerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde,

bütün numune grupları içerisinde en yüksek YÇİ ömrü işlemsiz numuneden elde edilmiştir. Bununla birlikte, plazma nitrürlenmiş malzemelerde artan proses sıcaklığı ve süresi ile YÇİ ömründeki artış oranında azalma gözlemlenmiştir. 400°C ve 500°C sıcaklıklarda plazma nitrürlenmiş malzemeler, UL+OL sonrasında, tekil OL yüklemesine oldukça yakın YÇİ ömürlerine sahiptirler. Ancak 600°C’de plazma nitrürlenmiş numunelerin UL+OL durumundaki YÇİ ömrü, tekil OL durumundan daha düşüktür.





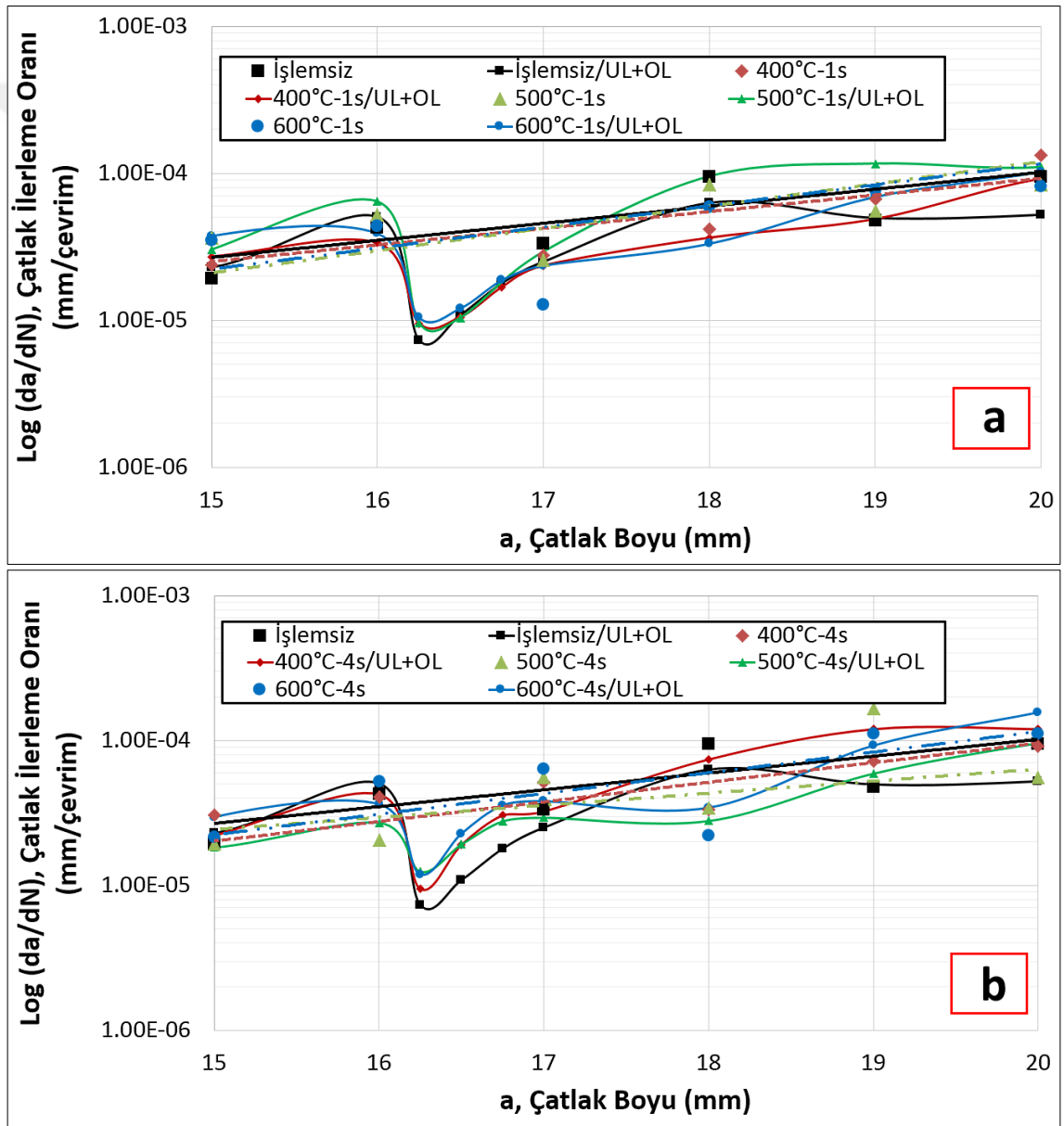
Şekil 4.70. UL+OL durumunda 500°C-1s numunesinin yorulma çatlak ilerlemesi görüntüsü



Şekil 4.71. İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş numunelerde SGY, OL, OL+UL ve UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim

İşlemsiz ve plazma nitrülenmiş malzemelerin da/dN-a grafikleri Şekil 4.72’de verilmiştir. UL+OL sonrasında numunelerin YÇİ oranı anlık olarak artış göstermiş, minimum çatlak ilerleme oranına ulaştıktan sonra ise belirli bir periyot sonunda SGY

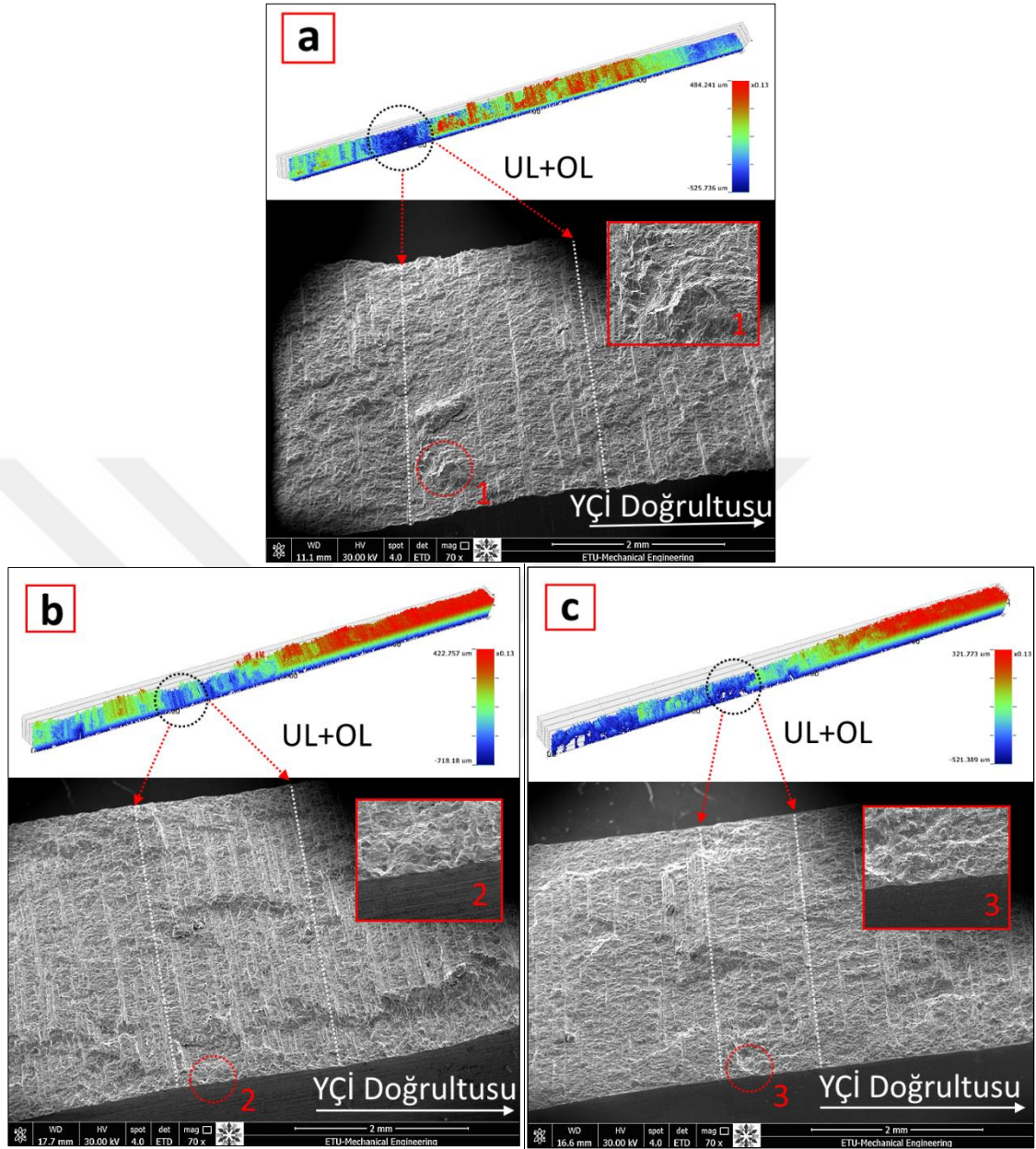
durumundaki çatlak ilerleme oranına ulaşmıştır. Ayrıca, burada elde edilen çatlak gecikme periyotları tekil OL durumuna oldukça benzerdir. Gecikme periyodu esnasında ulaşılan en düşük çatlak ilerleme oranları bakımından, işlemsiz numune diğer numunelerden daha düşük çatlak ilerleme oranına sahiptir. Artan plazma nitrürleme sıcaklığı ve süresi ile diğer numunelerin minimum çatlak ilerleme oranları işlemsiz malzemeye oranla artış göstermiştir.



Şekil 4.72. UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi
(a) 1 saat plazma nitrürleme ve (b) 4 saat plazma nitrürleme

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, plazma nitrürleme işlemi sonrasında diğer numunelere kıyasla daha düşük kalınlıklarda nitrür tabakası içeren ve Braunite fazı içermeyen numunelerin YÇİ ömrü tekil OL durumunda elde edilen ömür değerlerine oldukça yakındır. Başka bir deyişle bu numuneler UL+OL durumunda sanki sadece tekil OL'a maruz kalmış gibi davranmışlardır. Bu durumun sebebi, nitrür tabakalarının UL yüklemesi durumunda malzemenin YÇİ direncini artırmasıdır. UL araştırmalarında belirlendiği üzere, diğer numunelere kıyasla daha düşük nitrür tabaka kalınlıklarına sahip olan numuneler, UL esnasında çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerinin etkisini azaltarak YÇİ ömründeki azalmayı engelleyici yönde etki etmektedirler. Burada da, benzer bir durum söz konusudur. 400°C ve 500°C sıcaklıklarda işlem görmüş numuneler UL etkisini engelleyici yönde etki etmişlerdir ve bu sebeple de bu numuneler UL+OL'ye maruz kalmalarına rağmen sanki sadece tekil OL uygulanmış gibi davranarak malzemenin YÇİ ömründeki azalmayı engellemişlerdir. Ancak, daha önce de belirlendiği üzere, UL yüklemesi durumunda diğer numunelere oranla daha yüksek tabaka kalınlıklarına sahip olan ve yapısında kırılğan Braunite fazını içeren 600°C'de işlem gören numuneler ise UL+OL durumunda, yapının genel kırılğanlığı sebebiyle diğer numunelere oranla daha düşük YÇİ ömür artışı göstermişlerdir. Bu numunelerde, yapının genel kırılğanlığı sebebiyle OL+UL durumuna yakın YÇİ ömürleri elde edilmiştir. Bu durum gerçekleştirilen fraktografik incelemeler ile de desteklenmiştir.

UL+OL sonrasında elde edilen örnek kırılma yüzey görüntüleri Şekil 4.73'te gösterilmiştir. UL+OL uygulandıktan sonra bütün numunelerin yüzey pürüzlülüğü, tekil OL yüklemesine benzer şekilde artış göstermiştir. İşlemsiz numunede OL+UL sonrasında malzemenin merkezinde tamamen gevrek kırılan bölgeler tespit edilmiştir (1 numaralı detay görüntüsü). Plazma nitrürlenmiş numunelerde malzeme yüzeyindeki sert nitrür tabakalarının YÇİ için engel oluşturması sebebiyle malzemenin yüzey/kenar kısımlarında malzemenin merkezine oranla daha stabil bir çatlak ilerlemesi gerçekleşmiştir. Ayrıca, 2 ve 3 numaralı detay görüntülerinden görüleceği üzere malzeme yüzeyindeki sert nitrür tabakaları birden çok noktadan kırılmıştır.

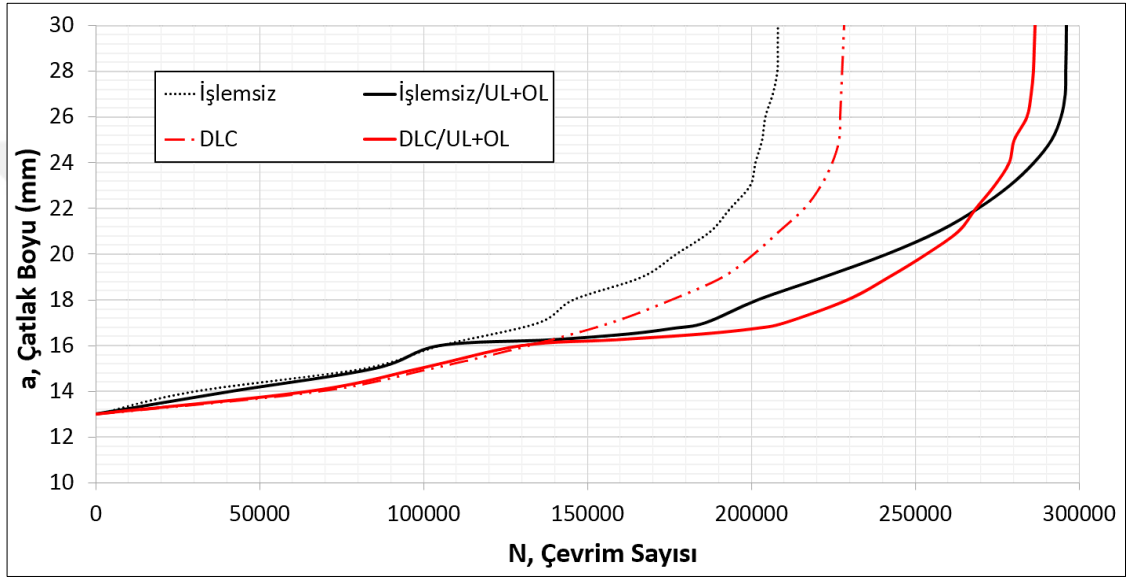


Şekil 4.73. Kırılma yüzey görüntüleri
(a) işlemsiz numune, (b) 500°C-4s plazma nitrülenmiş numune ve (c) 600°C-4s plazma nitrülenmiş numune

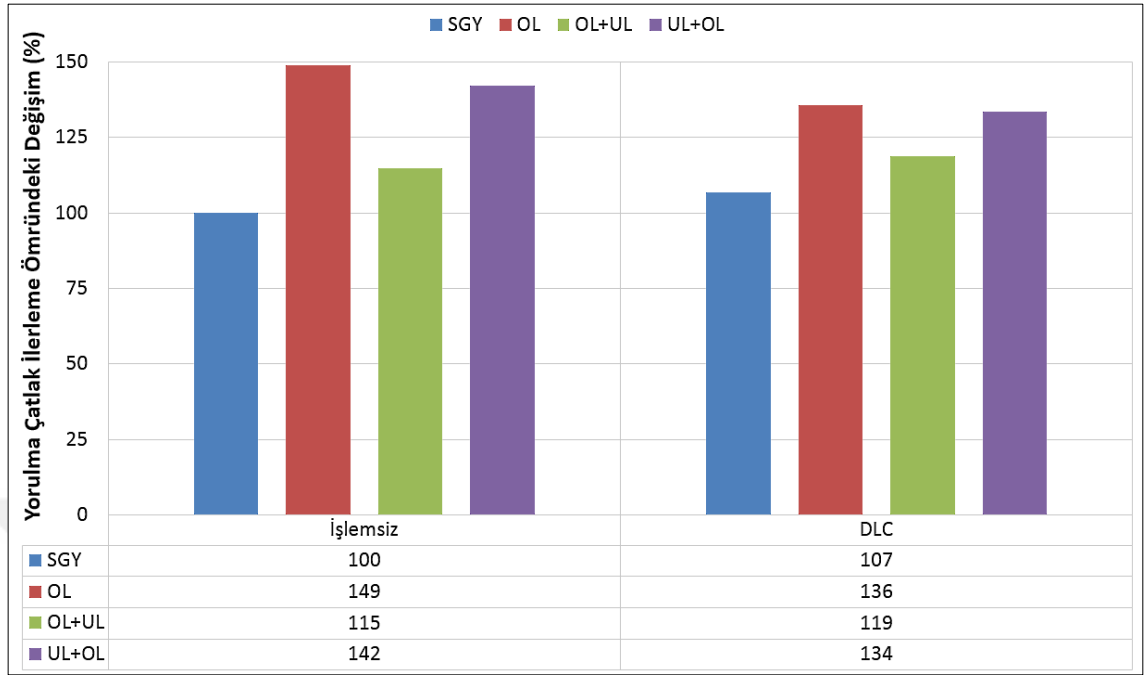
4.2.5.b. DLC kaplama

İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin a-N grafiği ve YÇİ ömürlerindeki yüzde değişim sırasıyla Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te verilmiştir. UL+OL sonrasında malzemelerin YÇİ ömürleri SGY durumuna göre artmıştır. Bu artış, SGY ve OL+UL

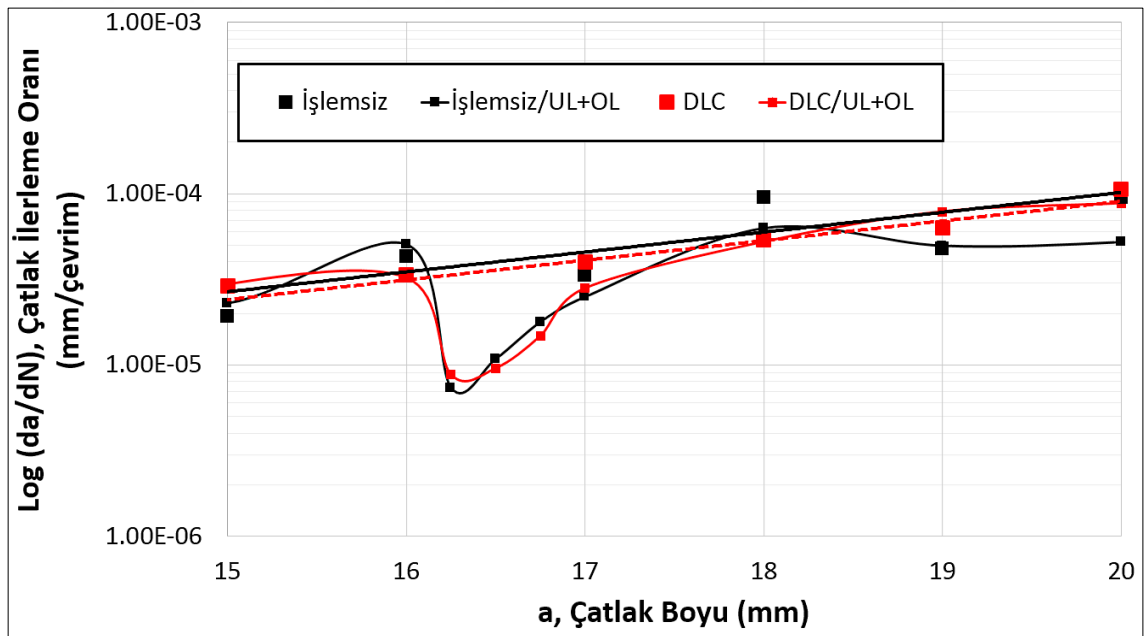
durumunda elde edilenden daha yüksek ve tekil OL durumundan ise daha düşüktür. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin da/dN -a grafiği Şekil 4.76'da verilmiştir. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzeme benzer davranış göstermiştir. Her iki malzeme, anlık bir çatlak hızlanmasından sonra minimum çatlak ilerleme oranına ulaşmış ve sonrasında ise SGY durumundaki YÇİ oranına geri dönmüştür.



Şekil 4.74. İşlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri



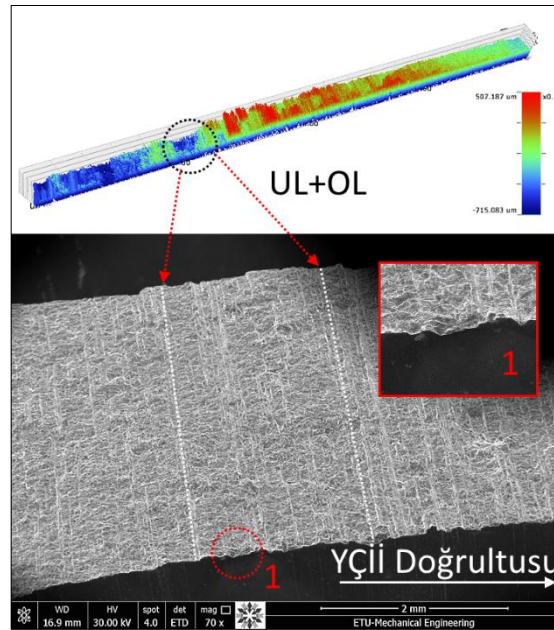
Şekil 4.75. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemede SGY, OL, OL+UL ve UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim



Şekil 4.76. İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi

İşlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömründeki değişim tekil OL durumu referans alınarak kıyaslanacak olursa; DLC kaplanmış malzemedeki ömür azalmasının işlemsiz malzemeden daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, UL çalışmalarında da belirlendiği üzere, DLC filmin UL için engel oluşturarak YÇİ ömründeki azalmayı engelleyici yönde etki etmesi sebebiyledir. UL+OL durumunda, yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturan DLC film UL anında çatlak ucunda oluşan çeki artık gerilmelerinin etkisini azaltmıştır fakat tekil UL çalışmalarında belirlendiği üzere, bu etkiyi tamamen ortadan kaldıramamıştır.

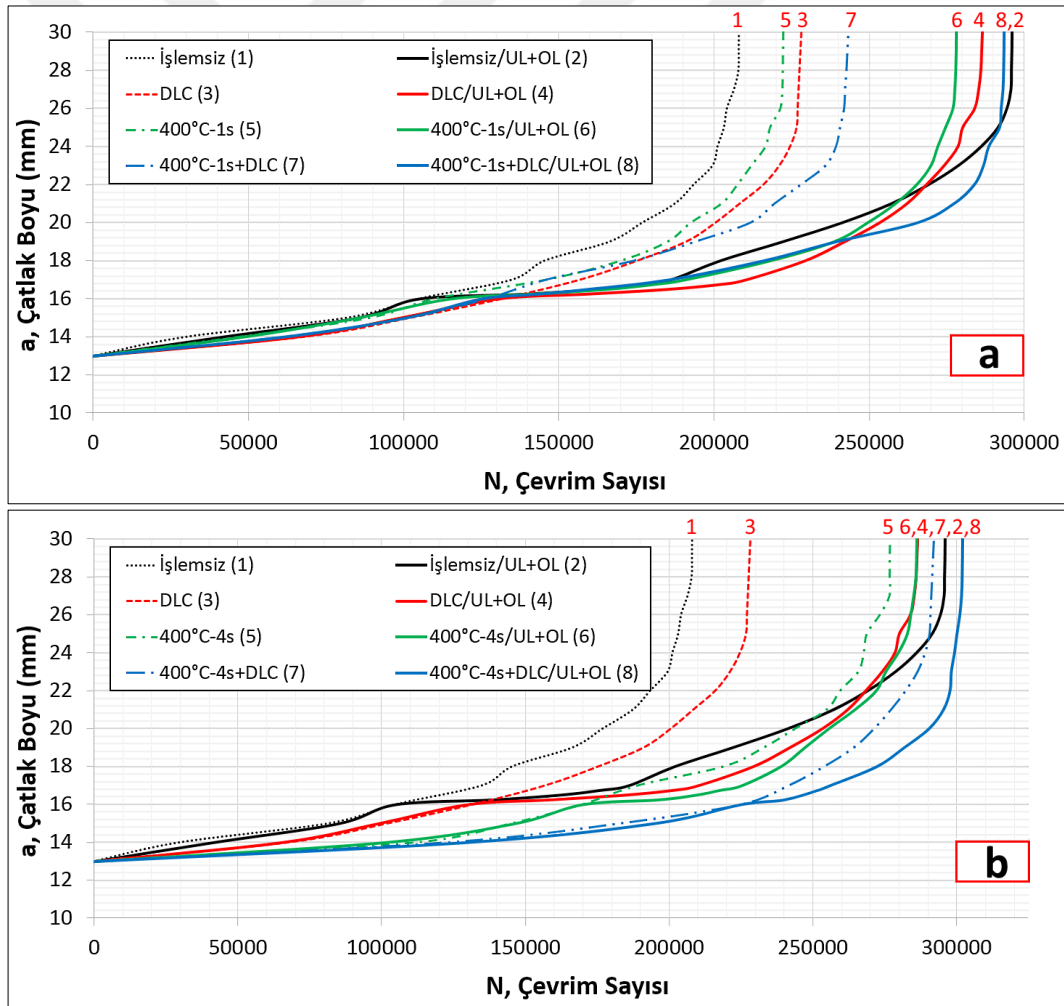
DLC kaplanmış malzemenin UL+OL sonrasındaki kırılma yüzey görüntüsü Şekil 4.77'de verilmiştir. Malzemenin genel kırılma karakteri işlemsiz malzeme ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. UL+OL bölgesinde malzemenin yüzey pürüzlülüğü, OL öncesi duruma göre artış göstermiştir. Bununla birlikte, yüzeyden alınan SEM görüntüsünden (1 numaralı detay görüntüsü) görüleceği üzere, DLC film taban malzeme ile birlikte bir bütün olarak davranmış ve UL+OL bölgesi boyunca taban malzeme düzlemi ile benzer kırılma davranışı göstermiştir.



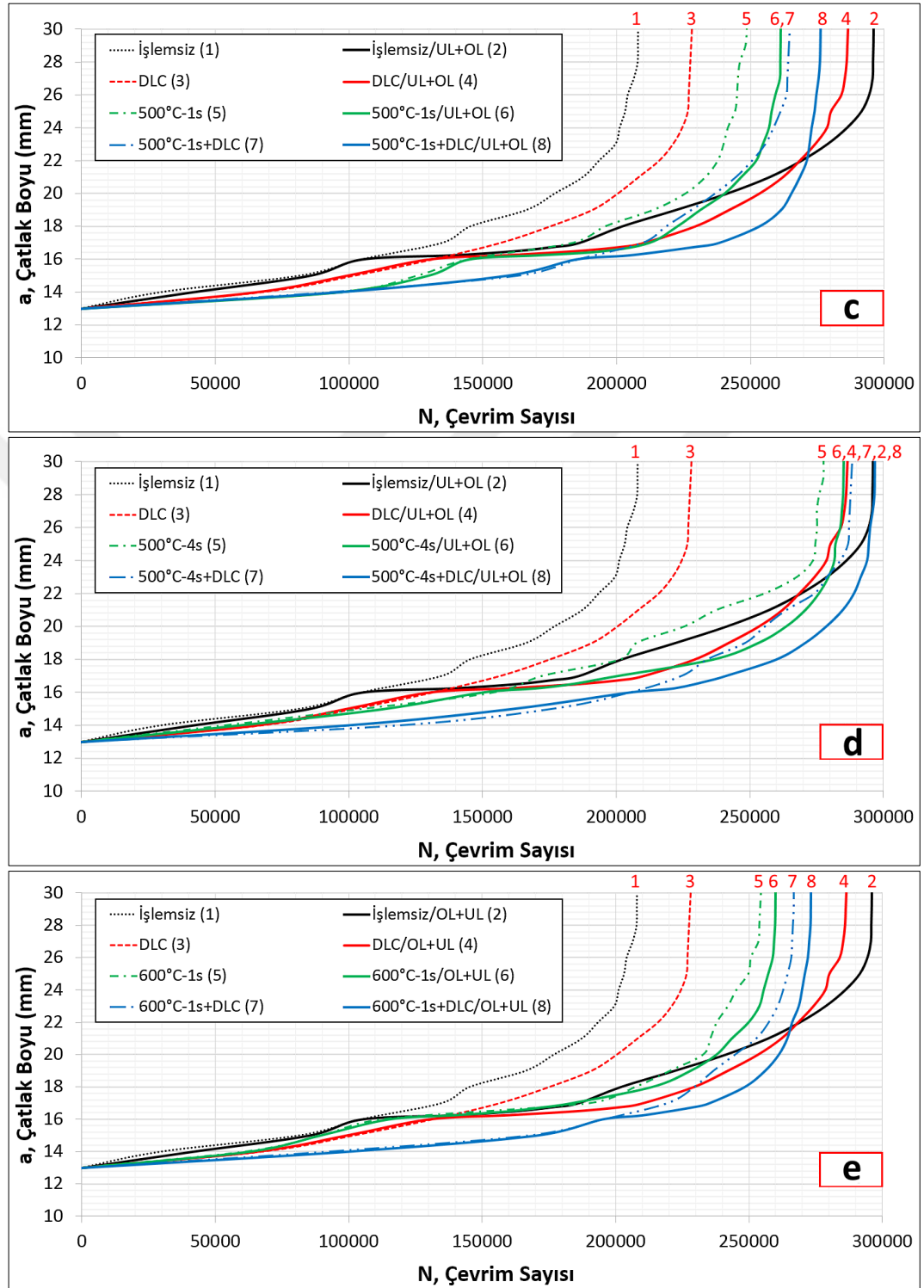
Şekil 4.77. DLC kaplanmış numunenin UL+OL durumunda kırılma yüzey görüntüsü

4.2.5.c. Dupleks yüzey işlemi ve uygulanan yüzey işlemlerinin karşılaştırılması

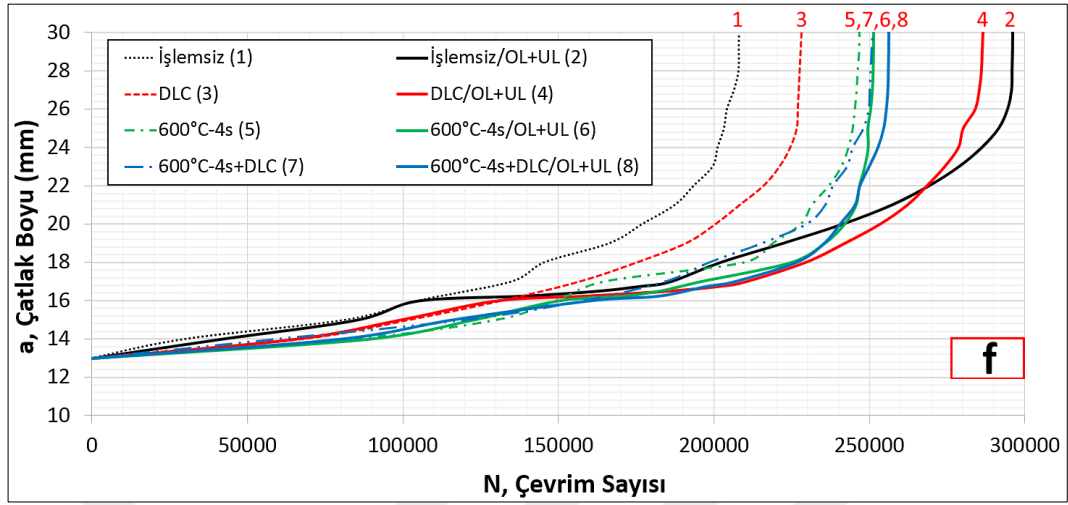
İşlemsiz, plazma nitrürlenmiş, DLC kaplanmış ve dupleks işlem uygulanmış numunelerin SGY ve UL+OL durumundaki a-N grafikleri Şekil 4.78’de verilmiştir. Her bir işlem parametresi için grafikler incelenecek olursa, işlemsiz ve DLC kaplanmış numunelerin YÇİ ömürlerindeki artışın plazma nitrürlenmiş ve dupleks işlem uygulanmış numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, her bir dupleks işlem parametresi için; YÇİ oranlarından elde edilen artış miktarı aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş olana oldukça yakındır.



Şekil 4.78. (devam)



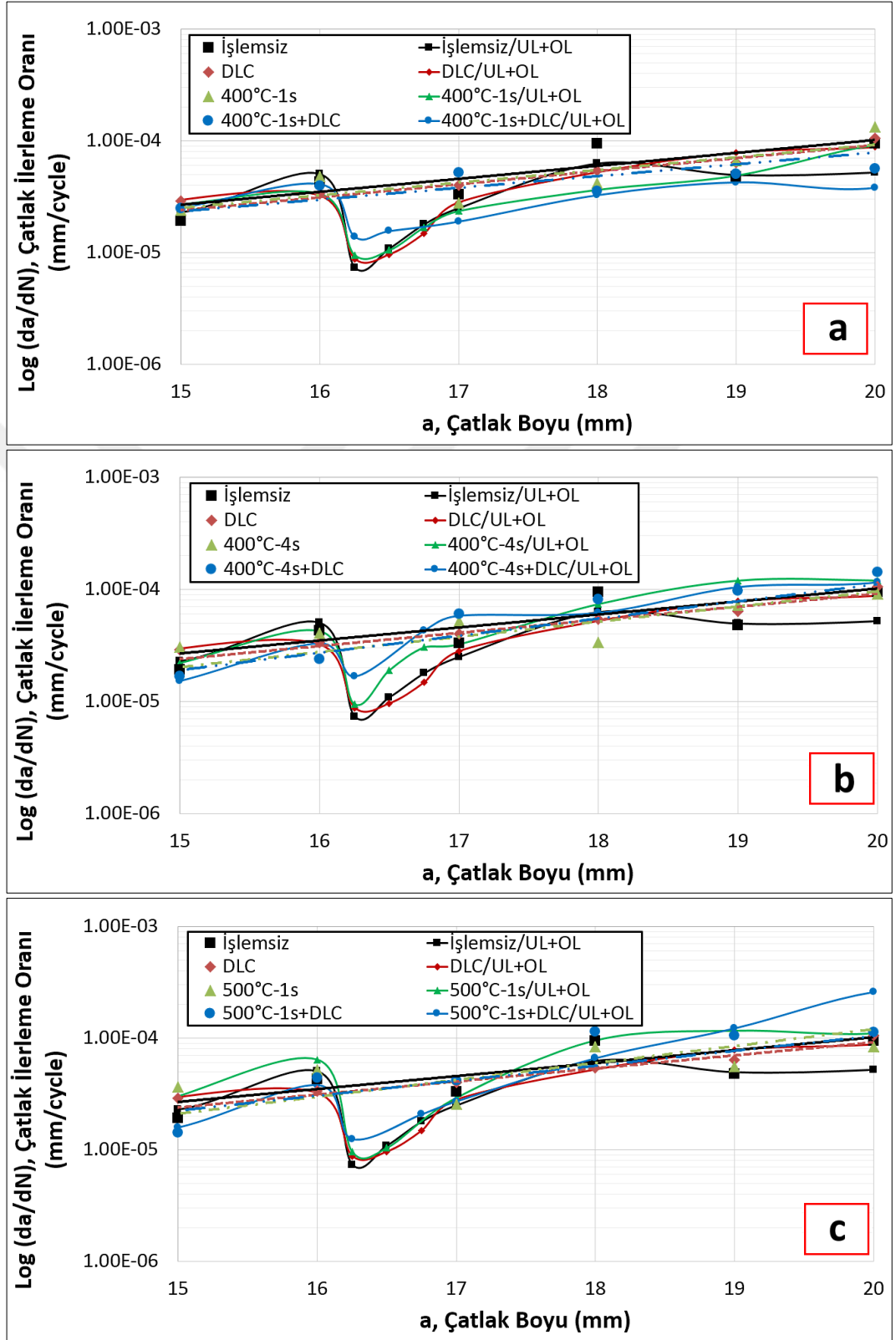
Şekil 4.78. (devam)



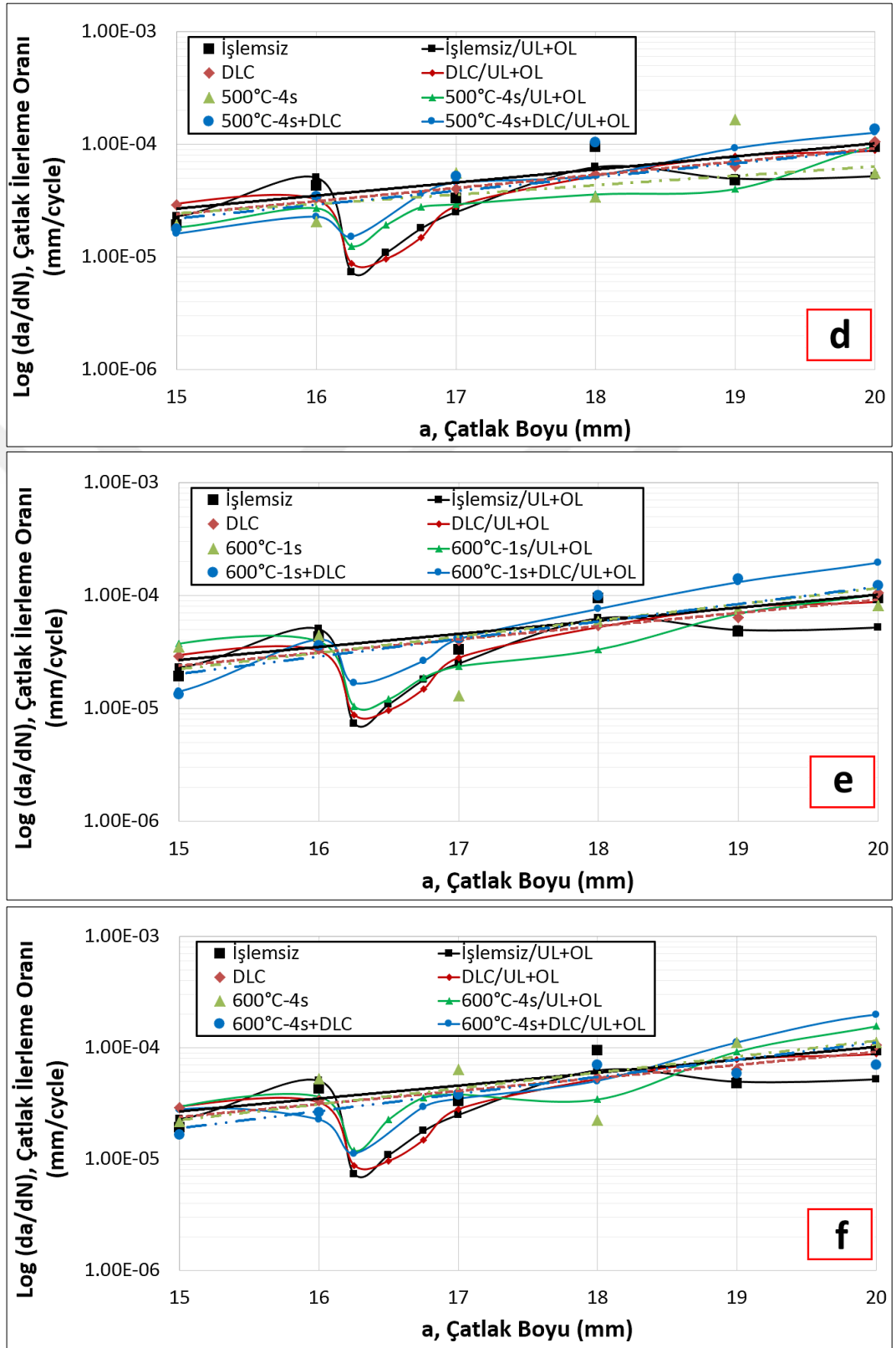
Şekil 4.78. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme eğrileri

(a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve (f) 600°C-4s+DLC

İşlemsiz, plazma nitrülenmiş, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış numunelerin da/dN -a grafikleri Şekil 4.79’da gösterilmiştir. Numunelerin UL+OL sonrasında elde edilen çatlak gecikme davranışları, tekil OL yüklemesinden elde edilen değerlere oldukça yakındır. Her bir işlem için, YÇİ oranları UL+OL sonrasında anlık olarak artış göstermiş ve minimum çatlak gecikme oranına indikten sonra SGY durumundaki çatlak ilerleme oranına ulaşmıştır. Ayrıca, bütün işlem şartlarında işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemeler, plazma nitrülenmiş ve dubleks işlem uygulanmış malzemelerden daha düşük yorulma çatlak ilerleme oranlarına ulaşmıştır.

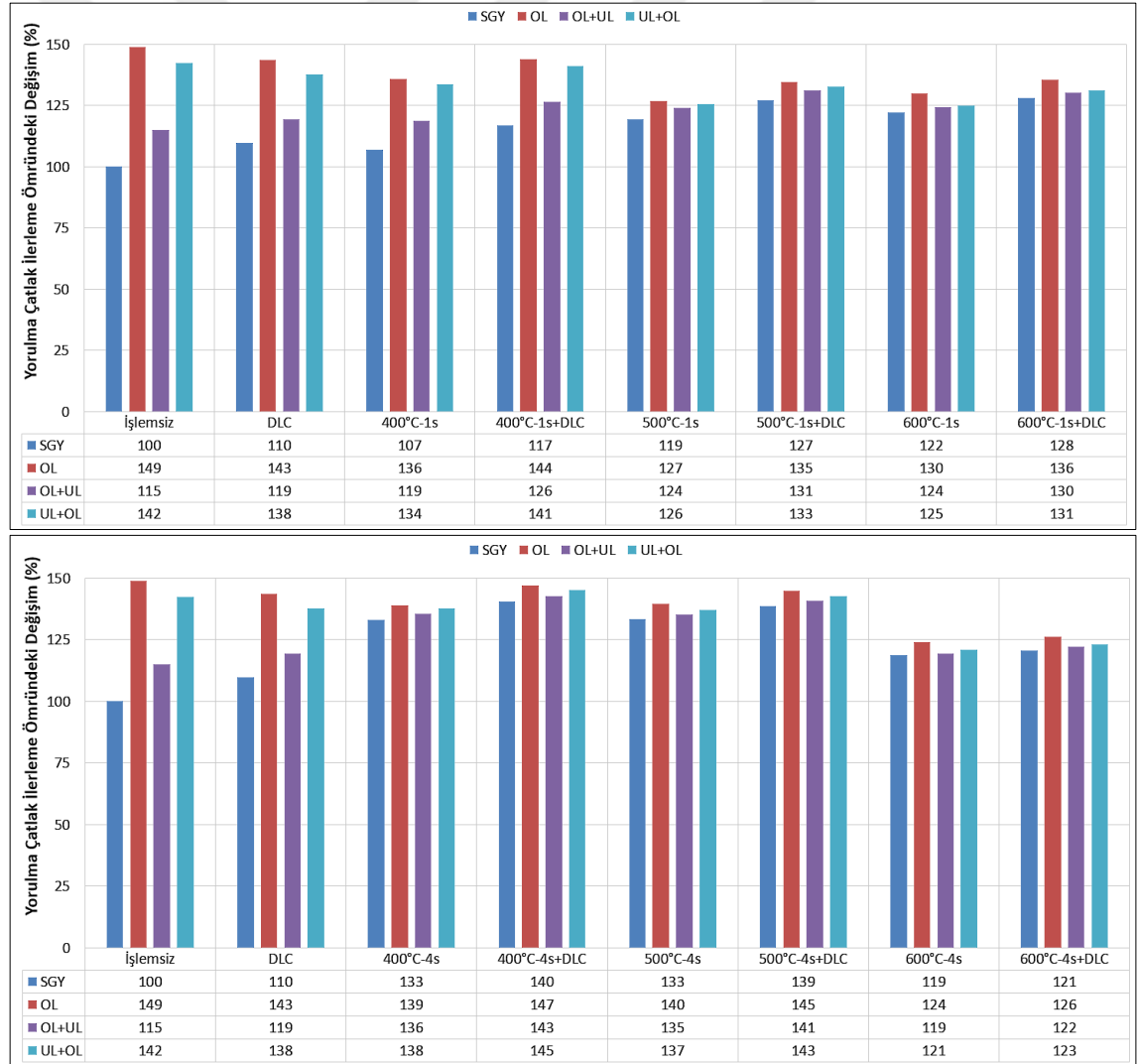


Şekil 4.79. (devam)



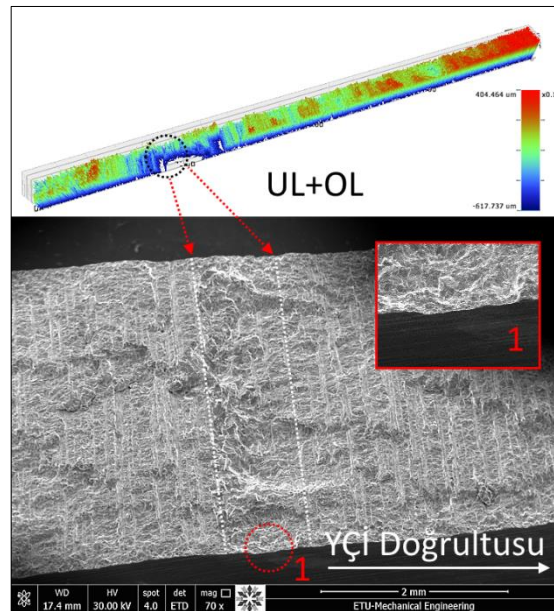
Şekil 4.79. UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu değişimi
 (a) 400°C-1s+DLC, (b) 400°C-4s+DLC, (c) 500°C-1s+DLC, (d) 500°C-4s+DLC, (e) 600°C-1s+DLC ve
 (f) 600°C-4s+DLC

UL+OL durumunda, numunelerin YÇİ ömürlerindeki değişim, işlemsiz malzemenin SGY durumundaki YÇİ ömrü referans alınarak Şekil 4.80'de gösterilmiştir. Bütün numuneler için YÇİ ömründeki artış SGY ve OL+UL durumundan yüksek fakat tekil OL durumundan daha düşüktür. Ayrıca, dubleks işlem görmüş numuneler; YÇİ olayını kontrol eden mekanizmanın plazma nitrürleme olmasından dolayı, aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş numunelere yakın ömür değişimi göstermişleridir. Bununla birlikte, 600°C-1s+DLC ve 600°C-4s+DLC numuneleri, sadece plazma nitrürlenmiş numunelere benzer şekilde UL+OL yüklemesi sonrasında OL+UL yüklemesine yakın ömür değişimi göstermiştir.



Şekil 4.80. İşlemsiz, DLC kaplanmış ve dubleks işlem uygulanmış malzemede SGY, OL, OL+UL ve UL+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömründeki değişim

Dubleks işlem uygulanmış malzemeye ait örnek kırılma görüntüsü Şekil 4.81’de gösterilmiştir. Dupleks işlem uygulanmış numune, aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş malzeme ile benzer kırılma davranışı göstermiştir. Malzemede, OL+UL bölgesinde yüzey pürüzlülüğü değeri UL+OL öncesi duruma göre büyük ölçüde artmıştır. Malzemenin merkez kısmında çatlak ilerleme düzlemleri değişmiş ancak malzeme yüzeyindeki sert nitrür tabaklarının engel olması sebebiyle malzemenin kenar kısımlarında çatlak ilerleme düzlemleri çok fazla değişmemiştir (1 numaralı detay görüntüsü). Bununla birlikte, malzemenin UL+OL bölgesi; Şekil 4.60’ta gösterilen aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş numuneye ait OL+UL bölgesi ile benzerlik göstermektedir. Bu durum 600°C’de işlem görmüş numunelerin UL+OL sonrasındaki YÇİ ömürlerinin OL+UL sonrasında elde edilen ömür değerlerine yakın olmasını açıklamaktadır. Çünkü yapısında kırılğan Braunit fazını içeren ve genel itibarıyla gevrek kırılma eğiliminde olan bu numuneler; her iki yükleme durumunda da kararsız bir çatlak ilerleme davranışı göstermişlerdir. Bu sebeple de, bu numuneler için her iki yükleme tipinde de yakın YÇİ ömür değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.81. 600°C-4s+DLC numunesinin kırılma yüzey görüntüsü

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yüzey işlemlerinin, AISI 4140 çeliğinin kırılma ve yorulma çatlak ilerleme davranışlarına etkilerinin incelendiği bu çalışmada: AISI 4140 çelik malzemeden üretilen CT numuneleri üzerine plazma nitrüleme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemleri (plazma nitrüleme+DLC kaplama) uygulanmış ve bu numuneler, sabit ve değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak ilerlemesi testlerine tabi tutulmuşlardır. Gerçekleştirilen yapısal analizler ve yorulma çatlak ilerlemesi analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

5.1. Yapısal Analiz Sonuçları

AISI 4140 çeliğine uygulanan plazma nitrüleme işlemleri sonrasında, malzeme yüzeyinde; işlem parametrelerine bağlı olarak 400°C ve 500°C nitrürlenmiş numunelerde ϵ -Fe₂₋₃N (HSP) ve γ' -Fe₄N (YMK) nitrürlerinden oluşan beyaz tabaka ve bu tabakanın hemen altında difüzyon tabakası oluşmuştur. 600°C nitrürlenmiş numunelerde ise bu tabakalara ek olarak, beyaz tabakanın hemen altında α -ferrit ve γ' -Fe₄N fazlarının karışımı olan braunite tabakası oluşmuştur. Düşük sıcaklıklarda (400°C ve 500°C) ϵ -Fe₂₋₃N fazının, yüksek sıcaklıklarda ise γ' -Fe₄N fazının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Plazma nitrürlenmiş numunelerde yapılan artık gerilme ölçümleri sonrasında, yüzeyde bası tipi artık gerilmelerinin olduğu ve artan işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak elde edilen artık gerilme değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, plazma nitrüleme süresi ve zamanındaki artışa bağlı olarak, beyaz tabaka ve difüzyon tabakası kalınlıklarının ve malzeme yüzeyinden iç kısımlarına doğru azalan yönde mikrosertlik değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Düşük sıcaklıklarda nitrürlenmiş numunelerden farklı olarak, 600°C sıcaklıkta nitrürlenmiş numunelerde oluşan braunite tabakasının hem bir hem de dört saat işlem görmüş numunelerde hemen hemen aynı kalınlıkta olduğu tespit edilmiştir.

İşlemsiz ve plazma nitrürlenmiş malzemelere uygulanan DLC kaplama işlemleri için; gerçekleştirilen XRD analizleri sonrasında yüzeyde büyütülen DLC filmlerin tamamen C atomlarından oluştuğu ve DLC filmlerin yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturduğu belirlenmiştir. Kaplama işlemleri sonrasında, yüzeyde yaklaşık 2 µm kalınlığında film büyütülmüştür. Ayrıca dubleks yüzey işlemi uygulanmış malzemelerden, sadece DLC kaplanmış numunelere oranla daha yüksek yüzey sertliği elde edilmiştir. Bunun sebebi, plazma nitrüleme sonrasında yüzey sertliğinin artarak malzemede yük taşıma kapasitesini artırmasıdır. Mikrosertlik artışına benzer şekilde; gerçekleştirilen çizme testleri sonrasında dubleks yüzey işlemi uygulanmış malzemelerin, sadece DLC kaplanmış numunelere oranla daha iyi adezyon gösterdiği belirlenmiştir.

5.2. Yorulma Çatlak İlerlemesi Sonuçları

5.2.1. Plazma nitrüleme

SGY altında gerçekleştirilen çatlak ilerlemesi testleri sonucunda, plazma nitrüleme işleminin, malzeme yüzeyinde oluşan sert nitrür fazları ve bu fazların oluşturduğu tabakaların dislokasyon hareketini engellemesi sebebiyle, YÇİ ömrünü işlemsiz numuneye oranla artırdığı belirlenmiştir. YÇİ ömründe en fazla artış 400°C ve 500°C dört saat nitrürlenmiş numunelerden elde edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek yüzey sertliği ve artık gerilmelerine sahip olan 600°C dört saat nitrürlenmiş numuneden elde edilen YÇİ ömrünün diğer dört saat nitrürlenmiş numunelerden düşük olması sebebiyle, YÇİ ömür artışının artan yüzey sertliği ve bası artık gerilmeleri ile doğru orantılı olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, plazma nitrüleme işlemi sonrasında artan beyaz tabaka kalınlığı ve braunite fazı oluşumuna bağlı olarak, numunelerde yüzey ve yüzey altı çatlakların oluştuğu belirlenmiş ve bu çatlakların YÇİ ömrünü azaltıcı yönde etki yaptığı tespit edilmiştir. Numunelerde yapılan fraktografik incelemeler sonucunda ise, işlemsiz numunede ve plazma ile nitrürlenmiş numunelerde taban malzemenin transgranüler kırılma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, plazma nitrüleme sıcaklığı ve süresindeki artışla numunelerin gevrek kırılma eğilimi artmıştır.

Çeki aşırı yüklemesi (OL) durumunda; hem işlemsiz hem de plazma nitrürlenmiş numunelerin çatlak gecikmesi sebebiyle YÇİ ömürlerinin SGY durumuna göre arttığı belirlenmiştir. OL durumunda en yüksek YÇİ ömrü işlemsiz numuneden elde edilmiş ve plazma nitrürlenmiş numunelerin YÇİ ömrünün bu değerden düşük olduğu belirlenmiştir. OL altında, işlemsiz numunede plazma nitrürlenmiş numuneye kıyasla daha büyük plastik bölge oluştuğu gözlemlenmiş ve çatlak gecikmesini belirleyen temel parametrenin çatlak ucu plastik bölge büyüklüğü olduğu tespit edilmiştir. Plazma nitrürleme işlemi sonucunda oluşan bası artık gerilmeleri ve sert nitrür tabakalarının çatlak ucunda oluşan plastik bölgeyi işlemsiz numuneye göre küçülttüğü gözlemlenmiş ve azalan plastik bölge boyutunun çatlak gecikme periyodunu azalttığı belirlenmiştir. Plazma nitrürlenmiş numunelerde OL anında nitrür tabakasının birden çok yerden kırıldığı belirlenmiş ve bu durumda YÇİ ömrünü azaltıcı yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Bası aşırı yüklemesi (UL) durumunda; bası artık gerilmeleri ve sert nitrür tabakalarının, UL anında çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerini engellemesi sebebiyle, plazma nitrürleme işleminin çatlak hızlanmasını azaltıcı yönde etki ettiği belirlenmiştir. Beyaz tabaka kalınlığının ve dolayısıyla da tabaka kırılabilirliğinin artması ve yapıda braunite fazının bulunması nedeniyle, çatlak hızlanmasının arttığı gözlemlenmiştir. Bu sebeplerle, düşük sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen plazma nitrürleme işleminin; UL sebebiyle oluşan çatlak hızlanmasını azalttığı belirlenmiştir.

Çeki-Bası aşırı yüklemesi (OL+UL) durumunda; plazma nitrürlenmiş numunelerde YÇİ ömrü SGY durumuna göre artmıştır. Ancak, plazma nitrürleme işlemi sonrasında azalan çatlak ucu plastisitesi sebebiyle, plazma nitrürlenmiş numunelerin YÇİ ömründeki artış işlemsiz numuneden daha düşüktür. Artan tabaka kalınlıkları ve/veya yapıda kırılabilir Braunite fazının bulunmasının, YÇİ ömrünü azalttığı gözlemlenmiştir.

Bası-Çeki aşırı yüklemesi (UL+OL) durumunda; plazma nitrürlenmiş ve işlemsiz malzemelerin YÇİ ömrü SGY durumuna göre artmıştır. Ancak bu yükleme durumunda da, plazma nitrürlenmiş numuneler çatlak ucu plastisitesinin azalması sebebiyle işlemsiz

numuneden daha düşük YÇİ ömrüne sahip olmuşlardır. Ayrıca, düşük nitrür tabakası kalınlıklarına sahip olan ve/veya yapısında Braunit fazı bulundurmeyen numuneler, UL'nin sebep olduğu ömür azalmasını engelledikleri için; bu numunelerden, tekil OL durumuna yakın ömür değerleri elde edilmiştir.

5.2.2. DLC kaplama

DLC kaplanmış numunelerin SGY altında gerçekleştirilen testleri sonucunda, malzeme yüzeyinde oluşan bası artık gerilmeleri ve DLC filmin; dislokasyon hareketlerini engellemesi sebebiyle, kaplanmış malzemenin YÇİ ömrünün işlemsiz numuneye oranla arttığı belirlenmiştir. YÇİ sonrasında elde edilen kırılma yüzeylerinde yapılan incelemeler sonrasında ise, DLC kaplamanın malzemenin kırılma karakterini değiştirmedığı görülmüştür. Ayrıca DLC filmin, YÇİ esnasında taban malzemedan herhangi bir ayrılma ve kırılma olmaksızın kararlı çatlak ilerlemesine müsaade ettiği tespit edilmiştir.

Çeki aşırı yüklemesi durumunda (OL); işlemsiz malzeme DLC kaplanmış malzemedan daha yüksek çatlak gecikme periyodu göstermiştir. Yüksek sertliğe sahip olan ve yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturan DLC filmin, çatlak ucu plastik bölgesini sınırlandırdığı ve bunun sonucunda da çatlak gecikme periyodunun azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, DLC film OL esnasında kırılarak YÇİ ömrünü azaltıcı yönde etki etmiştir.

Bası aşırı yüklemesi (UL) durumunda; DLC film, UL anında çatlak ucunda oluşan çeki artık gerilmelerini engelleyerek çatlak hızlanmasını azaltmıştır. Bunun sonucunda ise DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömründeki azalma, işlemsiz malzemedekinden daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. UL esnasında her ne kadar DLC filmin yapısında kırılma veya çatlak oluşumu gözlenmemiş olsa da, yüzey altı çatlakların oluşumunu kısıtlamadığı için, DLC film çatlak hızlanmasını tamamen engelleyememiştir.

Çeki-Bası aşırı yüklemesi (OL+UL) durumunda; işlemsiz ve DLC kaplanmış malzemenin YÇİ ömrü SGY durumuna göre artış göstermiştir. Ancak, DLC kaplama sonrasında azalan çatlak ucu plastisitesi sebebiyle işlemsiz malzemenin YÇİ ömründeki artış oranının, DLC kaplanmış malzemedan daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Bası-Çeki aşırı yüklemesi (UL+OL) durumunda; hem işlemsiz hem de DLC kaplanmış numunenin YÇİ ömürleri SGY durumuna göre artmıştır. Bunun sebebi, DLC filmin UL anında çatlak ucunda oluşan çeki gerilmelerinin etkisini azaltmasıdır.

5.2.3. Doubleks işlem

Plazma nitrüleme ve DLC kaplama prosesleri ile oluşturulan doubleks işlem görmüş numunelerin SGY altında gerçekleştirilen YÇİ analizleri sonrasında, doubleks yüzey işleminin AISI 4140 malzemenin YÇİ ömrünü işlemsiz, sadece plazma nitrülenmiş ve sadece DLC kaplanmış malzemeye kıyasla artırdığı belirlenmiştir. Doubleks işlem sonucunda YÇİ ömründe gözlemlenen artışın, plazma nitrüleme ve DLC kaplama işlemleri sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan artık gerilmelerin bileşik etkisi sebebiyle olduğu sonucuna varılmıştır. Fraktografik araştırmalar sonucunda ise doubleks işlem görmüş numunelerin kırılma özellikleri ve karakteristiklerinin sadece nitrülenmiş numunelerle benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, DLC filmlerin düşük nitrür tabaka kalınlığına sahip numunelerde, YÇİ ömrü üzerinde daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Çeki aşırı yüklemesi durumunda (OL); doubleks işlem görmüş numunelerin azalan çatlak ucu plastik bölge boyutu sebebiyle işlemsiz numuneden daha düşük YÇİ gösterdiği belirlenmiştir. Doubleks işlem görmüş numunelerde, plazma nitrülenmiş malzemeler ile hemen hemen aynı plastik bölge büyüklükleri elde edilmiştir. Düşük nitrür tabaka kalınlıklarının elde edildiği plazma nitrülenmiş numuneler üzerinde büyütülen DLC filmin malzemenin YÇİ ömrü üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Bası aşırı yüklemesi (UL) durumunda; dubleks işlem uygulanmış malzeme, plazma nitrürleme ve DLC filmin ortak etkisi sonucunda YÇİ ömründeki azalmayı azaltıcı yönde etki göstermiştir. Düşük sıcaklık ve sürelerde işlem görmüş malzemelerin, YÇİ ömründeki değişimi işlemsiz ve DLC kaplanmış numuneye kıyasla daha fazla engellediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüksek işlem sıcaklığı ve sürelerinde nitrürlendikten sonra DLC film büyütülen numuneler; beyaz tabaka ve/veya braunite tabaklarının kırılma davranışı artırması sebebiyle, diğer bütün numune gruplarından daha fazla ömür değişimi göstermiştir.

Çeki-Bası aşırı yüklemesi (OL+UL) durumunda; dubleks işlem görmüş numunelerde YÇİ oranının SGY durumuna göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Dubleks işlem uygulanmış numuneler, YÇİ olayını kontrol eden temel mekanizmanın plazma nitrürleme olması sebebiyle, plazma nitrürlenmiş numunelere yakın ömür değişimi göstermiştir. Bununla birlikte, dubleks işlem sonrasında azalan çatlak ucu plastisitesi sebebiyle, işlemsiz malzemenin YÇİ ömründeki değişimin dubleks işlem uygulanmış malzemelerden daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Bası-Çeki aşırı yüklemesi (UL+OL) durumunda; bütün numuneler için YÇİ ömründeki artışın SGY ve OL+UL durumundan yüksek fakat tekil OL durumundan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Dubleks işlem görmüş numuneler; YÇİ olayını kontrol eden mekanizmanın plazma nitrürleme olmasından dolayı, aynı şartlarda sadece plazma nitrürlenmiş numunelere yakın ömür artışı göstermişlerdir. Ayrıca, yapısında Braunite fazı bulunduran numunelerde, kararsız çatlak ilerlemesi davranışı sergilemelerinden dolayı, OL+UL durumuna yakın YÇİ ömürleri elde edilmiştir.

5.3. Genel Değerlendirme ve Öneriler

Uygulanan yüzey işlemleri, plazma destekli işlemler olup; malzemelerin yüzey sertliğini artırmakta ve malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri oluşturmaktadır. Bu sebeplerle de metalik malzemelerin yorulma dayanımını artıran birer proses olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar. Teorik olarak, artan yüzey sertliği ve bası artık gerilmeleri

malzemelerin yorulma çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme ömürlerini artırmaktadır ve bu özelliklerde sağlanacak sürekli bir artış yorulma ömrünün de artmasını sağlayacaktır. Ancak, araştırma sonuçları göstermiştir ki malzemelerin YÇİ ömründeki artış sadece sertlik ve bası artık gerilmelerindeki artışa bağlı olmayıp uygulanan yüzey işleminin karakteristiklerinden de güçlü bir biçimde etkilenmektedir. Yüzey işlemleri sonrasında, malzemelerin YÇİ ömrü; taban malzeme ve yüzey işlemleri sonrasında oluşan yüzey/yüzey altı yapıların (tabaka ve fazlar) mekanik özelliklerinden, nitrür tabakalarının faz içeriğinden ve kalınlığından büyük ölçüde etkilenmektedir. Plazma nitrürleme ve DLC kaplama işlemleri sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan tabakalar/fazların sertliği ve elastisite modülü, çalışmada kullanılan taban malzemeden daha yüksektir. Bu sebeple de, yorulma yükleri altında bu tabakalar taban malzemeden daha önce kırılarak YÇİ ömrünün azalmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple, YÇİ ömrünü artırmak için hem taban malzeme hem de yüzey işlemi sonrasında oluşacak yüzey tabakalarının mekanik özelliklerinin uyumunun sağlanması gerekmektedir. Beyaz tabaka ve braunite fazı, bu yapıların kırılma özelliği olması sebebiyle hem SGY hem de DGY durumunda malzemenin YÇİ ömrünün azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca artan beyaz tabaka kalınlıkları da YÇİ ömrünü azaltmaktadır. Malzemelerin YÇİ ömrünün plazma nitrürleme işlemi ile artırılması gereken durumlarda, bu fazın ve tabakanın yapıda minimum seviyede bulunması ve/veya oluşumunun engellenmesi gerekmektedir.

Dubleks işlem uygulamalarında DLC filmin etkinliği büyük oranda plazma nitrürleme işlemine bağlıdır. DLC film, ancak düşük kalınlıkta nitrür tabakaları içeren numunelerde YÇİ ömründe artış ve azalışlara sebep olmuştur. Bu sebeple, dubleks işlemlerde; DLC filmin YÇİ üzerindeki etkinliğini artırmak için nitrür tabakası kalınlıklarının minimum seviyede tutulması gerekmektedir.

YÇİ davranışını/ömrünü tayin eden en önemli faktör, uygulanan yorulma yükünün tipidir. Çeki aşırı yükleri (OL) malzemedeki yorulma çatlak gecikmesine sebep olarak malzemenin YÇİ ömrünü artırırken, bası aşırı yüklemesi (UL) çatlak hızlanmasına sebep olarak, malzemenin YÇİ ömrünü azaltmaktadır. Uygulanan yüzey işlemleri, bu

yükleme durumlarının her ikisinde de işlemsiz malzemeden farklı davranmışlardır. OL durumunda, işlemsiz malzemenin YÇİ ömrü artarken; uygulanan yüzey işlemleri bu artışı azaltıcı yönde etki etmişlerdir. UL durumunda ise; işlemsiz numunenin YÇİ ömrü SGY durumuna göre azalırken, uygulanan yüzey işlemleri YÇİ ömründeki azalmayı engellemiştir. Bu sebeplerle, uygulanacak yüzey işleminin ve/veya yüzey işlemi parametrelerinin seçiminde; malzeme veya makine elemanının maruz kaldığı yükleme tipi (çeki, bası vs.), malzemelerin YÇİ ömrü açısından en belirleyici faktörlerden biridir. Bu yüzden, uygulanacak yüzey işlemi veya işlemleri, malzemenin maruz kaldığı yorulma yükünün tipine göre seçilebilir.

Son yıllarda çatlak boyunun tespiti için dijital görüntü alma yöntemi (digital image monitoring/digital image correlation-DIM/DIC) önerilmiş ve bu amaçla da dijital kameralar kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmada kullanılan bu yöntem; hem test görüntülerinin tekrar incelenebilmesine olanak sağlamış hem de diğer çatlak boyu ölçüm yöntemleri gibi test ortamından ve test numunesindeki değişkenliklerden etkilenmemiştir. Bu sebeplerle, DIC'in YÇİ analizleri için hem pratik hem de kullanışlı bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Plazma nitrürleme, DLC kaplama ve bu işlemlerin ardıl uygulanması ile oluşturulan dubleks yüzey işlemlerinin AISI 4140 çelik malzemenin sabit ve değişken genlikli yükler altındaki YÇİ davranışına etkilerinin incelendiği bu çalışmada; özgün ve literatürde daha önce rapor edilmemiş sonuçlara ulaşılmıştır. Bununla birlikte; çalışma kapsamında ele alınamayan ancak incelenmesi hem bilimsel literatüre katkı sağlayacak hem de bu konudaki çalışmaların sürekliliğini sağlayacak bazı araştırma önerileri aşağıda sunulmuştur.

- Yüzey işlemleri sonrasında malzemede oluşan yapılar ve taban malzeme arasındaki mekanik uyum; YÇİ ömrü üzerinde direkt etkilidir. Bu sebeple, çalışma kapsamında uygulanan yüzey işlemleri farklı malzeme gruplarına (biyomalzemeler, şekil hafızalı alaşımlar vs.) uygulanarak bu malzemelerin de YÇİ davranışları incelenebilir.

- Çalışmada uygulanan yüzey işlemleri pek çok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bu sebeple, endüstriyel bir ürün üzerinde bu yüzey işlemleri uygulanarak farklı yorulma yükleri altında bu ürün/ürünlerin YÇİ özellikleri incelenebilir.
- Plazma esaslı yüzey işlemleri olan plazma nitrüleme ve DLC kaplama işlemlerinden farklı olarak; çeşitli mekanik, kimyasal vs. yüzey işlemlerinin malzemelerin YÇİ özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Yüzey işlemlerinin YÇİ üzerindeki etkileri, deney sayısının azaltılması ve farklı yükleme tiplerinin de etkilerinin incelenmesi amacıyla; sonlu elemanlar yöntemi gibi çeşitli teorik ve hesaplamalı (computational) yöntemler de kullanılabilir.
- Yüzey işlemlerinin malzemelerin YÇİ özellikleri üzerindeki etkileri, özellikle OL olayında öne sürülen ve halen teori aşamasında olan yorulma çatlak gecikmesi mekanizmaları da dikkate alınarak; matematiksel olarak modellenenbilir.
- Yüzey işlemlerinin etkisi, bu çalışmada kullanılan daha farklı dijital görüntü işleme (DIC) yöntemleri ile de incelenebilir. Örneğin; OL ve/veya UL durumunda çatlak ucunda oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler DIC tabanlı yöntemler ile incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Akbari, A., Mohammadzadeh, R., Templier, C. and Riviere, J., 2010. Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel. *Surface and Coatings Technology*, 204 (24), 4114-4120.
- Alsaran, A., 2001. Dupleks yüzey işlemi uygulanmış AISI 5140 çeliğinin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alsaran, A., Çelik, A. and Karakan, M., 2005. Structural, mechanical and tribological properties of duplex-treated AISI 5140 steel. *Materials characterization*, 54 (1), 85-92.
- Alsaran, A., Çelik, A., Karakan, M. and Yetim, F., 2011. Yüzey mühendisliğinde yeni bir yaklaşım; dupleks yüzey işlemi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 9 (1).
- Alsaran, A., Kaymaz, I., Celik, A., Yetim, F. and Karakan, M., 2004. A repair process for fatigue damage using plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 186 (3), 333-338.
- Anderson, T.L., 2005. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC press.
- ASTM-E399-12e3, 2012. ASTM E399-12e3: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. ASTM.
- ASTM-E647-13ae1, 2013. ASTM E647-13ae1: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM.
- Avelar-Batista, J., Spain, E., Fuentes, G., Sola, A., Rodriguez, R. and Housden, J., 2006. Triode plasma nitriding and PVD coating: A successful pre-treatment combination to improve the wear resistance of DLC coatings on Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 201 (7), 4335-4340.
- Bacila, A., Decoopman, X., Mesmacque, G., Voda, M. and Serban, V., 2007. Study of underload effects on the delay induced by an overload in fatigue crack propagation. *International Journal of Fatigue*, 29 (9), 1781-1787.
- Bannantine, J., 1990. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Prentice Hall, 1990, 273.
- Baragetti, S., Lusvarghi, L., Bolelli, G. and Tordini, F., 2009. Fatigue behaviour of 2011-T6 aluminium alloy coated with PVD WC/C, PA-CVD DLC and PE-CVD SiO_x coatings. *Surface and Coatings Technology*, 203 (20), 3078-3087.
- Barenblatt, G.I., 1962. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in applied mechanics*, 7 (1), 55-129.
- Barsom, J., 1976. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in various bridge steels. *Fatigue crack growth under spectrum loads*, ASTM STP, 595, 217-235.
- Bayrak, Ö., 2007. Plazma ile nitrülenmiş CoCrMo implant malzemenin yapısal ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. MsC Thesis, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayrak, Ö., Yetim, A., Alsaran, A. and Çelik, A., 2010. Fatigue life determination of plasma nitrided medical grade CoCrMo alloy. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 33 (5), 303-309.

- Beden, S., Abdullah, S. and Ariffin, A., 2009. Review of fatigue crack propagation models for metallic components. *European Journal of Scientific Research*, 28 (3), 364-397.
- Bell, T., Dong, H. and Sun, Y., 1998. Realising the potential of duplex surface engineering. *Tribology International*, 31 (1), 127-137.
- Bhushan, B. and Gupta, B.K., 1991. *Handbook of tribology: materials, coatings, and surface treatments*.
- Borrego, L., Ferreira, J., Da Cruz, J.P. and Costa, J., 2003. Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engineering fracture mechanics*, 70 (11), 1379-1397.
- Burakowski, T. and Wierzchon, T., 1999. *Surface Engineering of Metals—Principles, Equipment. Technology*. CRC Press, Boca Raton—London-New York—Washington DC.
- Campbell, F.C., 2008. *Elements of metallurgy and engineering alloys*. ASM International.
- Campbell, F.C., 2012. *Fatigue and fracture: understanding the basics*. ASM International.
- Carvalho, A. and Voorwald, H.J.C., 2009. The surface treatment influence on the fatigue crack propagation of Al 7050-T7451 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 505 (1), 31-40.
- Celik, A. and Karadeniz, S., 1995. Improvement of the fatigue strength of AISI 4140 steel by an ion nitriding process. *Surface and Coatings Technology*, 72 (3), 169-173.
- Çelik, A. and Karadeniz, S., 1996. Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 80 (3), 283-286.
- Çelik, A., 2014. *Yorulma Ders Notları*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 150.
- Çelik, A., Efeoğlu, I. and Sakar, G., 2001. Microstructure and structural behavior of ion-nitrided AISI 8620 steel. *Materials characterization*, 46 (1), 39-44.
- Chang, J. and Hudson, J.C.C., 1981. *Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading*. ASTM International.
- Chang, J., Szamosi, M. and Liu, K., 1981. Random spectrum fatigue crack life predictions with or without considering load interactions. *ASTM STP*, 748, 115-132.
- Collipriest Jr, J., 1972. An experimentalist's view of the surface flaw problem. Paper from "The Surface Crack- Physical Problems and Computational Solutions", ASME, New York. 1972, 43-61.
- Costa, M., Venditti, M., Cioffi, M., Voorwald, H.J.C., Guimarães, V. and Ruas, R., 2011. Fatigue behavior of PVD coated Ti–6Al–4V alloy. *International Journal of Fatigue*, 33 (6), 759-765.
- Dai, P. and Li, Z., 2013. A plasticity-corrected stress intensity factor for fatigue crack growth in ductile materials. *Acta Materialia*, 61 (16), 5988-5995.
- Dalibon, E.L., Charadia, R., Cabo, A., Trava-Airoldi, V. and Brühl, S.P., 2013. Evaluation of the mechanical behaviour of a DLC film on plasma nitrided AISI 420 with different surface finishing. *Surface and Coatings Technology*, 235, 735-740.

- Dalibón, E.L., Heim, D., Forsich, C., Rosenkranz, A., Guitar, M.A. and Brühl, S.P., 2015. Characterization of thick and soft DLC coatings deposited on plasma nitrided austenitic stainless steel. *Diamond and Related Materials*, 59, 73-79.
- Dalibon, E.L., Trava-Airoldi, V., Pereira, L.A., Cabo, A. and Brühl, S.P., 2014. Wear resistance of nitrided and DLC coated PH stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 255, 22-27.
- De la Cruz, P., Oden, M. and Ericsson, T., 1998. Influence of plasma nitriding on fatigue strength and fracture of a B-Mn steel. *Materials Science and Engineering: A*, 242 (1), 181-194.
- Dowling, N.E., 1993. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Prentice hall.
- Dugdale, D., 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8 (2), 100-104.
- Ebrahimzadeh, I. and Ashrafizadeh, F., 2014. High temperature wear and frictional properties of duplex-treated tool steel sliding against a two phase brass. *Ceramics International*, 40 (10), 16429-16439.
- Edenhofer, B., 1974a. Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding. Pt. 1. Heat Treatment Metals (1), 23-28.
- Edenhofer, B., 1974b. Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding. Pt. 2. Heat Treatment Metals (1), 59-67.
- Efeoglu, I., Arnell, R., Tinston, S. and Teer, D., 1993. The mechanical and tribological properties of titanium aluminium nitride coatings formed in a four magnetron closed-field sputtering system. *Surface and Coatings Technology*, 57 (2), 117-121.
- Erdemir, A. and Donnet, C., 2006. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39 (18), R311.
- Erdemir, A., Eryilmaz, O. and Fenske, G., 2000. Synthesis of diamondlike carbon films with superlow friction and wear properties. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 18 (4), 1987-1992.
- Farokhzadeh, K. and Edrissy, A., 2015. Fatigue improvement in low temperature plasma nitrided Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 620, 435-444.
- Farokhzadeh, K., Qian, J. and Edrissy, A., 2014. Effect of SPD surface layer on plasma nitriding of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 589, 199-208.
- Fleck, N., Shin, C. and Smith, R.A., 1985. Fatigue crack growth under compressive loading. *Engineering fracture mechanics*, 21 (1), 173-185.
- Forman, R., 1972. Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory. *Engineering fracture mechanics*, 4 (2), 333-345.
- Frost, N. and Dugdale, D., 1958. The propagation of fatigue cracks in sheet specimens. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 6 (2), 92-110.
- Frost, N., Pook, L. and Denton, K., 1971. A fracture mechanics analysis of fatigue crack growth data for various materials. *Engineering fracture mechanics*, 3 (2), 109-126.
- Fuchs, H.O. and Stephens, I., 1980. *Metal fatigue in engineering*. JOHN WILEY & SONS, NY. 1980.

- Genel, K., Demirkol, M. and Çapa, M., 2000a. Effect of ion nitriding on fatigue behaviour of AISI 4140 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 279 (1), 207-216.
- Genel, K., Demirkol, M. and Gülmez, T., 2000b. Corrosion fatigue behaviour of ion nitrided AISI 4140 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 288 (1), 91-100.
- Griffith, A.A., 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 163-198.
- Grill, A. and Patel, V., 1993. Stresses in diamond-like carbon films. *Diamond and Related Materials*, 2 (12), 1519-1524.
- Hauert, R., 2004. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications. *Tribology International*, 37 (11), 991-1003.
- Head, A., 1953. XCVIII. The growth of fatigue cracks. *Philosophical Magazine*, 44 (356), 925-938.
- Höck, K., Leonhardt, G., Bücken, B., Spies, H.-J. and Larisch, B., 1995. Process technological aspects of the production and properties of in situ combined plasma-nitrided and PVD hard-coated high alloy tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 74, 339-344.
- Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Waudby, R., Stachowiak, G., Wolski, M., Podsiadlo, P., Gee, M., Nunn, J. and Gachot, C., 2015. Topographical orientation effects on friction and wear in sliding DLC and steel contacts, Part 1: experimental. *Wear*, 330, 3-22.
- Huang, X., Cui, W. and Leng, J., 2005a. A model of fatigue crack growth under various load spectra, *Proc of Sih GC, 7th Int conf of MESO*, August, pp. 1-4.
- Huang, X., Zhang, J., Cui, W. and Leng, J., 2005b. Fatigue crack growth with overload under spectrum loading. *Theoretical and applied fracture mechanics*, 44 (2), 105-115.
- Hudson, C.M. and Hardrath, H.F., 1961. Effects of changing stress amplitude on the rate of fatigue-crack propagation in two aluminum alloys.
- Hudson, C.M. and Hardrath, H.F., 1963. Investigation of the effects of variable-amplitude loadings on fatigue crack propagation patterns. *National Aeronautics and Space Administration*.
- Irwin, G., 1948. *Fracturing of metals*. ASM, Cleveland, 147, 19-9.
- Irwin, G., 1997. Plastic zone near a crack and fracture toughness.
- Irwin, G.R., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *J. appl. Mech.*
- Jia, Z., Xia, Y., Li, J., Pang, X. and Shao, X., 2010. Friction and wear behavior of diamond-like carbon coating on plasma nitrided mild steel under boundary lubrication. *Tribology International*, 43 (1), 474-482.
- Jia, Z.-f., Wang, P., Xia, Y.-q., Zhang, H.-b., Pang, X.-j. and Li, B., 2009. Tribological behaviors of diamond-like carbon coatings on plasma nitrided steel using three BN-containing lubricants. *Applied Surface Science*, 255 (13), 6666-6674.
- Johnson, W., 1981. Multi-parameter yield zone model for predicting spectrum crack growth. *ASTM STP*, 748, 85-102.
- Karadeniz, S., 1990. Plazma tekniği. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları*, Yayın, 137.

- Karcı, A. and Turan, D., 2009. Periyodik Aşırı Yüklerin 2024-Al Alaşımında Yorulma Çatlak İlerleme Hızına Etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (2), 57-62.
- Kasaba, K., Sano, T., Kudo, S., Shoji, T., Katagiri, K. and Sato, T., 1998. Fatigue crack growth under compressive loading. *Journal of nuclear materials*, 258, 2059-2063.
- Kelestemur, M. and Chaki, T., 2001. The effect of overload on the fatigue crack growth behaviour of 304 stainless steel in hydrogen. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24 (1), 15-22.
- Korsunsky, A.M., Song, X., Belnoue, J., Jun, T., Hofmann, F., De Matos, P.F., Nowell, D., Dini, D., Aparicio-Blanco, O. and Walsh, M.J., 2009. Crack tip deformation fields and fatigue crack growth rates in Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 31 (11), 1771-1779.
- Kurny, A., Mallya, R. and Rao, M.M., 1986. A study on the nature of the compound layer formed during the ion nitriding of En40B steel. *Materials Science and Engineering*, 78 (1), 95-100.
- Kwietniewski, C., Fontana, W., Moraes, C., Rocha, A.d.S., Hirsch, T. and Reguly, A., 2004. Nitrided layer embrittlement due to edge effect on duplex treated AISI M2 high-speed steel. *Surface and Coatings Technology*, 179 (1), 27-32.
- Laird, C., 1967. The influence of metallurgical structure on the mechanisms of fatigue crack propagation. *PAPER FROM FATIGUE CRACK PROPAGATION, ASTM STP NO 415*. 1967, 131-180.
- Lee, S., Choo, H., Liaw, P., Oliver, E. and Paradowska, A., 2009. In situ neutron diffraction study of internal strain evolution around a crack tip under variable-amplitude fatigue-loading conditions. *Scripta Materialia*, 60 (10), 866-869.
- Lee, S., Choo, H., Liaw, P.K., An, K. and Hubbard, C.R., 2011a. A study on fatigue crack growth behavior subjected to a single tensile overload: Part II. Transfer of stress concentration and its role in overload-induced transient crack growth. *Acta Materialia*, 59 (2), 495-502.
- Lee, S., Liaw, P., Choo, H. and Rogge, R., 2011b. A study on fatigue crack growth behavior subjected to a single tensile overload: Part I. An overload-induced transient crack growth micromechanism. *Acta Materialia*, 59 (2), 485-494.
- Lee, S., Rogge, R., Choo, H. and Liaw, P., 2010a. Neutron diffraction measurements of residual stresses around a crack tip developed under variable-amplitude fatigue loadings. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 33 (12), 822-831.
- Lee, S., Sun, Y., An, K., Choo, H., Hubbard, C. and Liaw, P., 2010b. Evolution of residual-strain distribution through an overload-induced retardation period during fatigue-crack growth. *Journal of Applied Physics*, 107 (2), 023517.
- Lee, S.Y., 2009. Effects of Overload and Underload on Internal Strains/Stresses and Crack Closure during Fatigue-Crack Propagation.
- Lopez-Crespo, P. and Pommier, S., 2008. Numerical analysis of crack tip plasticity and history effects under mixed mode conditions. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2 (12), 1567-1576.
- McEvily, A., 1973. Phenomenological and microstructural aspects of fatigue. *The microstructure and design of alloys*, 204-225.

- McMillan, J.C. and Pelloux, R., 1966. Fatigue crack propagation under programmed and random loads, DTIC Document.
- Meletis, E., Erdemir, A. and Fenske, G., 1995. Tribological characteristics of DLC films and duplex plasma nitriding/DLC coating treatments. *Surface and Coatings Technology*, 73 (1), 39-45.
- Miller, M. and Gallagher, J., 1981. An analysis of several fatigue crack growth rate (FCGR) descriptions. *Fatigue Crack Growth Measurements and Data Analysis*, ASTM STP, 738, 205-251.
- Morita, T., Andatsu, K., Hirota, S., Kumakiri, T., Ikenaga, M. and Kagaya, C., 2013. Effect of hybrid surface treatment composed of plasma nitriding and DLC coating on friction coefficient and fatigue strength of stainless steel. *Materials Transactions*, 54 (5), 732-737.
- Morita, T., Hirano, Y., Asakura, K., Kumakiri, T., Ikenaga, M. and Kagaya, C., 2012. Effects of plasma carburizing and DLC coating on friction-wear characteristics, mechanical properties and fatigue strength of stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 558, 349-355.
- Morita, T., Hirano, Y., Tomita, K., Kumakiri, T., Kagaya, C. and Ikenaga, M., 2008a. Fatigue properties of DLC-coated Ti-6Al-4V alloy. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, 74 (741), 693-699.
- Morita, T., Inoue, K., Ding, X., Usui, Y. and Ikenaga, M., 2016. Effect of hybrid surface treatment composed of nitriding and DLC coating on friction-wear properties and fatigue strength of alloy steel. *Materials Science and Engineering: A*, 661, 105-114.
- Morita, T., Tomita, K., Kagaya, C., Kumakiri, T. and Ikenaga, M., 2008b. Fatigue properties of DLC-coated stainless steel. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2 (5), 645-653.
- Nelson, D.V., 1977. Review of fatigue-crack-growth prediction methods. *Experimental Mechanics*, 17 (2), 41-49.
- Newman Jr, J.C., 1981. A crack-closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading. *ASTM STP*, 748, 53-84.
- Paris, P. and Erdogan, F., 1963. A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Fluids Engineering*, 85 (4), 528-533.
- Podgornik, B. and Vižintin, J., 2001. Influence of substrate treatment on the tribological properties of DLC coatings. *Diamond and Related Materials*, 10 (12), 2232-2237.
- Podgornik, B., Vizintin, J., Ronkainen, H. and Holmberg, K., 2000. Friction and wear properties of DLC-coated plasma nitrided steel in unidirectional and reciprocating sliding. *Thin Solid Films*, 377, 254-260.
- Pommier, S. and Risbet, M., 2005. Time-derivative equations for fatigue crack growth in metals. *International Journal of fracture*, 131 (1), 79-106.
- Pook, L., 2007. *Metal Fatigue: What it Is, Why it Matters*. Solid Mechanics and Its Applications. Springer.
- Puchi-Cabrera, E., Matinez, F., Herrera, I., Berrios, J., Dixit, S. and Bhat, D., 2004. On the fatigue behavior of an AISI 316L stainless steel coated with a PVD TiN deposit. *Surface and Coatings Technology*, 182 (2), 276-286.
- Puchi-Cabrera, E., Staia, M., Ochoa-Pérez, E., Teer, D., Santana-Méndez, Y., La Barbera-Sosa, J., Chicot, D. and Lesage, J., 2010. Fatigue behavior of a 316L

- stainless steel coated with a DLC film deposited by PVD magnetron sputter ion plating. *Materials Science and Engineering: A*, 527 (3), 498-508.
- Robertson, J., 2002. Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37 (4), 129-281.
- Ronkainen, H., Varjus, S. and Holmberg, K., 1998. Friction and wear properties in dry, water-and oil-lubricated DLC against alumina and DLC against steel contacts. *Wear*, 222 (2), 120-128.
- Ronkainen, H., Varjus, S. and Holmberg, K., 2001. Tribological performance of different DLC coatings in water-lubricated conditions. *Wear*, 249 (3), 267-271.
- Rousseau, A., Partridge, J., Mayes, E., Toton, J., Kracica, M., McCulloch, D. and Doyle, E., 2015. Microstructural and tribological characterisation of a nitriding/TiAlN PVD coating duplex treatment applied to M2 high speed steel tools. *Surface and Coatings Technology*, 272, 403-408.
- Sander, M. and Richard, H., 2006. Fatigue crack growth under variable amplitude loading Part I: experimental investigations. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 29 (4), 291-301.
- Schaufler, J., Durst, K., Haas, T., Nolte, R., Höppel, H.W. and Göken, M., 2012. The influence of hydrogenated amorphous carbon coatings (aC: H) on the fatigue life of coated steel specimens. *International Journal of Fatigue*, 37, 1-7.
- Schijve, J. and Luchtvaartlaboratorium, N., 1960. Fatigue crack propagation in light alloy sheet material and structures. NLL.
- Schijve, J., 2001. *Fatigue of structures and materials*. Springer.
- Şengül, A. and Çelik, A., 2011. Effect of plasma nitriding on fatigue crack growth on AISI 4140 steel under variable amplitude loading. *Surface and Coatings Technology*, 205 (21), 5172-5177.
- Şengül, A. and Çelik, A., 2012. Farklı çevrim sayılarında uygulanan aşırı yüklemenin oluşturduğu yorulma çatlak ilerleme gecikmesi üzerinde plazma nitrülmenin etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (4).
- Şengül, A. and Çelik, A., 2014. Combined Effects of Different Overload Ratios and Nitriding Process on Fatigue Crack Growth of AISI 4140 Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21 (8), 797-803.
- Şengül, A., 2011. Plazma nitrülleme yapılmış çelik malzemenin değişken yük altındaki davranışı. PhD Thesis, Atatürk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erzurum.
- Shi, X.-H., Zeng, W.-D., Shi, C.-L., Wang, H.-J. and Jia, Z.-Q., 2015. The effects of colony microstructure on the fatigue crack growth behavior for Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 621, 252-258.
- Sirin, S.Y., Sirin, K. and Kaluc, E., 2008. Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel. *Materials characterization*, 59 (4), 351-358.
- Skorupa, M., 1998. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading—a literature review. Part I: empirical trends. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 21 (8), 987-1006.
- Skorupa, M., 1999. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading—a literature review. Part II: qualitative interpretation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 22 (10), 905-926.

- Snyders, R., Bousser, E., Amireault, P., Klemberg-Sapieha, J.E., Park, E., Taylor, K., Casey, K. and Martinu, L., 2007. Tribo-Mechanical Properties of DLC Coatings Deposited on Nitrided Biomedical Stainless Steel. *Plasma Processes and Polymers*, 4 (S1), S640-S646.
- Soleimani, S., Mashreghi, A., Ghasemi, S. and Moshrefifar, M., 2012. The effect of plasma nitriding on the fatigue behavior of DIN 1.2210 cold work tool steel. *Materials & design*, 35, 87-92.
- Stephens, R., Chen, D. and Hom, B., 1976. Fatigue crack growth with negative stress ratio following single overloads in 2024-T3 and 7075-T6 aluminum alloys. *ASTM STP*, 595, 27-40.
- Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R. and Fuchs, H.O., 2000. *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons.
- Sun, Y. and Bell, T., 1991. Plasma surface engineering of low alloy steel. *Materials Science and Engineering: A*, 140, 419-434.
- Suresh, S., 1998. *Fatigue of materials*. Cambridge university press.
- Terres, M., Mohamed, S.B. and Sidhom, H., 2010. Influence of ion nitriding on fatigue strength of low-alloy (42CrMo4) steel: Experimental characterization and predictive approach. *International Journal of Fatigue*, 32 (11), 1795-1804.
- Terres, M.A. and Sidhom, H., 2012. Fatigue life evaluation of 42CrMo4 nitrided steel by local approach: Equivalent strain-life-time. *Materials & design*, 33, 444-450.
- Terres, M.A., Laalai, N. and Sidhom, H., 2012. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: experimental analysis and predictive approach. *Materials & design*, 35, 741-748.
- Uematsu, Y., Kakiuchi, T., Teratani, T., Harada, Y. and Tokaji, K., 2011. Improvement of corrosion fatigue strength of magnesium alloy by multilayer diamond-like carbon coatings. *Surface and Coatings Technology*, 205 (8), 2778-2784.
- Uematsu, Y., Tokaji, K. and Takekawa, H., 2010. Effect of thick DLC coating on fatigue behaviour of magnesium alloy in laboratory air and demineralised water. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 33 (9), 607-616.
- Venables, J.D., 1990. *Status and Applications of Diamond and Diamond-like Materials: An Emerging Technology: Report of the Committee on Superhard Materials*. National Academy Press.
- Walker, E., 1970. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7076-T6 aluminum. In: *Effect of environment and complex load history on fatigue life*. *ASTM STP* 462, 1-14.
- Wang, W. and Hsu, C.-T.T., 1994. Fatigue crack growth rate of metal by plastic energy damage accumulation theory. *Journal of engineering mechanics*, 120 (4), 776-795.
- Wei, R., Booker, T., Rincon, C. and Arps, J., 2004. High-intensity plasma ion nitriding of orthopedic materials: Part I. Tribological study. *Surface and Coatings Technology*, 186 (1), 305-313.
- Wheeler, O.E., 1972. Spectrum loading and crack growth. *Journal of Fluids Engineering*, 94 (1), 181-186.
- Willenborg, J., Engle, R. and Wood, H., 1971. A crack growth retardation model using an effective stress concept, DTIC Document.

- Wilson, A., Leyland, A. and Matthews, A., 1999. A comparative study of the influence of plasma treatments, PVD coatings and ion implantation on the tribological performance of Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*, 114 (1), 70-80.
- Wolf, E., 1970. Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engineering fracture mechanics*, 2 (1), 37-45.
- Xiulin, Z. and Hirt, M.A., 1983. Fatigue crack propagation in steels. *Engineering fracture mechanics*, 18 (5), 965-973.
- Yetim, A., Celik, A. and Alsaran, A., 2010. Improving tribological properties of Ti6Al4V alloy with duplex surface treatment. *Surface and Coatings Technology*, 205 (2), 320-324.
- Yetim, A.F., 2009. Biyomalzeme olarak kullanılan AISI 316L ve Ti6Al4V alaşımlarının plazma ile nitrürleme davranışı, Ti-DLC ince film ile karşılaştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yılbaş, B.S., Şahin, A.Z., Al-Garni, A.Z., Said, S.A., Ahmed, Z., Abdulaleem, B. and Sami, M., 1996. Plasma nitriding of Ti6Al4V alloy to improve some tribological properties. *Surface and Coatings Technology*, 80 (3), 287-292.
- Yıldız, F., 2009. Farklı yüzey işlemlerinin metalik implant malzemeler üzerindeki etkileri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yıldız, F., Yetim, A., Alsaran, A., Çelik, A., Kaymaz, İ. and Efeoğlu, İ., 2013. Plain and fretting fatigue behavior of Ti6Al4V alloy coated with TiAlN thin film. *Tribology International*, 66, 307-314.
- Yonekura, D., Fujita, J. and Miki, K., 2015. Fatigue and wear properties of Ti-6Al-4V alloy with Cr/CrN multilayer coating. *Surface and Coatings Technology*.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Giresun'da doğdu. İlköğrenimini Giresun Abacıbükü İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Giresun YDA Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'nda Yüksek Lisans İngilizce Hazırlık öğrenimini tamamladıktan sonra 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2011 yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı ve aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı.

2011 yılı Ocak ayı itibarıyla Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.