

**PLAZMA NİTRÜRLEME YAPILMIŞ
ÇELİK MALZEMENİN DEĞİŞKEN YÜK
ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

Ahmet Bilal ŞENGÜL

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof.Dr. Ayhan ÇELİK
2011**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**PLAZMA NİTRÜRLEME YAPILMIŞ ÇELİK MALZEMENİN
DEĞİŞKEN YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

Ahmet Bilal ŞENGÜL

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2011**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**PLAZMA NİTRÜRLEME YAPILMIŞ ÇELİK MALZEMENİN DEĞİŞKEN YÜK
ALTINDAKİ DAVRANIŞI**

Prof. Dr. Ayhan ÇELİK danışmanlığında, Ahmet Bilal ŞENGÜL tarafından hazırlanan bu çalışma 10/06/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (.5/.5) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mustafa TOPARLI

İmza :

Üye : Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

İmza :

Üye : Prof. Dr. Akgün ALSARAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. İrfan KAYMAZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zafer EKİNCİ

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Ömer AKBULUT

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 YAPILMIŞ ÇELİK MALZEMENİN DEĞİŞKEN YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞI

Ahmet Bilal ŞENGÜL
Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

AISI 4140 çeliği %50N₂, %50H₂ gaz ortamında 500°C sıcaklıkta 2 saat süreyle plazma nitridasyon işlemine tabi tutulmuştur. Plazma işlemsiz ve nitrürlenmiş numunelerin yapısal ve mekanik özellikleri, servo-hidrolik üniversal test cihazı, mikro-sertlik test cihazı, taramalı elektron mikroskobu, x ışını saçınım cihazı ve optik görüntü aygıtları kullanılarak tespit edilmiştir. Blok aşırı yüklemenin (AY), yorulma çatlak ilerleme gecikmesi üzerinde plazma nitrürlemenin etkisi incelenmiştir. 10 çevrimlik blok AY'nin plazma nitrürlemenin yorulma çatlak gelişimini geciktirdiği ancak AY'nin oluşturduğu çatlak gecikmesini azalttığı tespit edilmiştir. Hem işlemsiz hem de nitrürlenmiş numunelerde, AY bloğu çevrim sayısı artırıldıkça çatlak gecikme etkisinin arttığı gözlenmiştir. 1, 10, 20, 100 ve 1000 çevrimlik blok AY uygulamasında çatlak gecikmesi, işlemsiz numunelerde etkili bir şekilde olduğu gözlenirken, nitrürlenmiş olanlarda daha düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmüştür. 3000 çevrim AY uygulamasında ise nitrürlenmiş numunelerde AY'nin sebep olduğu çatlak gecikmesinin işlemsize göre daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği görülmüştür. Plazma nitrürleme, AY oranının 2,5'e kadar ki değerlerinde AY'nin çatlak geciktirici etkisini azaltmış, AY oranı 3 iken arttırmıştır.

2011, 131 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kırılma mekaniği, plazma nitrürleme, aşırı yükleme, aşırı yükleme oranı, çatlak gecikmesi, dijital görüntü analizi

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EFFECT OF PLASMA NITRIDING ON FATIGUE CRACK GROWTH ON STEEL MATERIAL UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING

Ahmet Bilal ŞENGÜL

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of mechanical engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

AISI 4140 steel was subjected to a plasma nitriding process using 50/50 gas mixture of N₂ and H₂ at 500°C for 2 hours. The structural and mechanical properties of the plasma-nitrided and unnitrided specimens were investigated using micro-hardness test device, servo-hydraulic universal testing machine, scanning electron microscope, and optical imaging devices. Results of analyses indicated that the application of a 10-cycle tensile block overload results in the retardation of fatigue crack growth (FCG) for both unnitrided and nitrided specimens, however, the period of crack retardation is more prolonged for the unnitrided specimens. Besides, it was also found that in a constant-amplitude fatigue test the plasma nitriding leads to an increase in total FCG life. Unnitrided and nitrided specimens, the more the number of cycles of OL increased, the more effect of the crack retardation found. The crack retardation by overload cycle numbers 1, 10, 20, 100 and 1000 of, in unnitrided samples effectively occurred, but nitrided at lower levels. Crack growth retardation caused by 3000 the number of cycles of the block over-loading, showed higher levels occurred on the nitrided samples than unnitrided. And the overload cycle in 3000 increased. Plasma nitriding slowed the crack growth retardation caused by the overload was reduced up to overload ratio 2,5 and at overload ratio 3 it was increased.

2011, 131 Pages

Keywords: Fracture mechanics, plasma nitriding, over loading, over load ratio, crack retardation, digital image analysis

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında, yardımını, tecrübesini ve hoşgörüsünü esirgemeyen, bilgisi, çalışma anlayışı, becerisini ve engin bakış açısını daima örnek aldığım, saygı değer danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'E sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Beni yetiştiren aileme ve gösterdiği sabır, anlayış ve destek ile bana güç veren sevgili eşim Sayın Dr. Ümran ŞENGÜL'E ve çocuklarım Alper ile Meva'ya ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmamda benden maddi manevi yardımını esirgemeyen Sayın Hakan Cihan DOĞAN'A ve Sayın Doç.Dr. Murat GÜLER'E teşekkür ederim.

Doktora çalışmamda yurt içi doktora burs programı kapsamında burs vermek suretiyle bana maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na da teşekkürü bir borç bilirim.

Ahmet Bilal ŞENGÜL
Haziran 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1. Metal Yorulması.....	6
2.1.1. Yorulma esnasında çatlak oluşumu ve yayılması.....	6
2.1.2. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak gelişimi.....	9
2.1.3. Çatlak kapanma mekanizmaları.....	20
2.1.3.a. Plastisitenin etkisi.....	21
2.1.3.b. Çatlak ucu körleşmesi.....	26
2.1.3.c. Bası artık gerilmeleri.....	26
2.1.3.d. Çatlak ucu sapması ve dallanması.....	28
2.1.3.e. Çatlak yüzeylerindeki pürüzlülük.....	28
2.2. Kırılma Mekaniği.....	29
2.2.1. Lineer elastik çatlak ucu gerilme alanı.....	29
2.3. Değişken Genlikli Yükleme Altında Çatlak Gelişimi Tahmin Modelleri.....	38
2.3.1. Wheeler modeli.....	39
2.3.2. Willenborg modeli.....	42
2.3.3. Elber çatlak kapanma modeli.....	44
2.3.4. Barsom modeli.....	46
2.3.5. Gallagher ve Hughes modeli.....	46
2.3.6. Johnson modeli.....	47
2.3.7. Hudson modeli.....	49
2.3.8. Cahang Szamosi ve Liu modeli.....	50
2.3.9. Newman Jr modeli.....	51
2.3.10. Rudd ve Engle modeli.....	52
2.3.11. Modifiye edilmiş miner modeli.....	53
2.3.12. Nasgro modeli.....	54
2.4. Karmaşık Yükleme Çatlak Kapanması Kavramının Uygulanması.....	54
2.5. Yorulma Çatlak Gelişimi Test Donanımı ve Testi.....	57
2.5.1. Yorulma çatlak gelişim testi.....	59
2.5.1.a. Yorulma ön çatlağı.....	60
2.5.2. Yorulma çatlak gelişim (FCG) deneyinde çatlak boyu ölçümünde kullanılan yöntemler.....	61
2.5.2.a. Elektriksel potansiyel fark (EPD) yöntemi ile çatlak boyutunun tanımlanması.....	63
2.5.2.b. Görsel yöntem.....	65
2.6. Dijital Görüntü İşleme ve Analizi (Digital Image Correlation-DIC).....	65
2.6.1. Dijital görüntü işleme.....	66
2.6.2. Görüntü alma.....	70
2.6.2.a. Dijital görüntülerde kullanılan renk modelleri.....	71
2.7. Plazma Nitrürleme.....	73

2.7.1. Plazma nitrürleme işleminin mekanizması.....	74
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	76
3.1. Malzeme.....	76
3.1.1. Numune boyutu ve hazırlanması.....	77
3.1.2. Plazma nitrürleme işlemi.....	81
3.1.3. Yapısal ve mekanik özelliklerin tayini.....	82
3.2. Çatlak İlerleme Testleri.....	82
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	86
4.1. Plazma Nitrürleme İşleminin Değişken Genlikli Yük Altında Yorulma Çatlak Gelişimi Üzerindeki Etkisini Araştırma Çalışmaları.....	87
4.1.1. Sabit genlikli yükleme ve 10 çevrimlik blok aşırı yükleme altında çatlak gelişim davranışını araştırma çalışmaları.....	88
4.1.1.a. Çatlak ucu açılma deneyinde aşırı yüklemenin meydana getirdiği yüzey morfolojisi.....	93
4.1.1.b. Yorulma çatlak gelişim deneyinde aşırı yüklemenin meydana getirdiği kırılma yüzeyi morfolojisi.....	97
4.1.2. Aşırı yükleme çevrim sayısının yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini araştırma çalışmaları.....	100
4.1.2.a. Yorulma çatlak gelişiminde farklı çevrim sayılarında ki aşırı yüklemenin meydana getirdiği yüzey morfolojisi.....	108
4.1.2.b. Yorulma çatlak gelişiminde farklı çevrim sayılarında AY meydana getirdiği kırılma yüzeyi morfolojisi.....	109
4.1.3. Aşırı yükleme oranının yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini araştırma çalışmaları.....	110
4.1.3.a. Yorulma çatlak gelişiminde farklı AY oranlarındaki AY'nin meydana getirdiği yüzey morfolojisi	118
4.1.3.b. Yorulma çatlak gelişiminde farklı AY oranlarındaki AY'nin meydana getirdiği kırılma yüzeyi morfolojisi.....	121
5. SONUÇ.....	123
KAYNAKLAR.....	125
EKLER.....	131
Ek CD-Video 1, 2, 3.....	131
ÖZGEÇMİŞ.....	131

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a	Çatlak boyu
a^*	Aşırı yükleme sonrası çatlak gecikme bölgesinde toplam çatlak boyu
a_D	Aşırı yükleme sonrası çatlak gecikme bölgesinde çatlak boyu(ilk hızlanma kısmı hariç)
a_n	Ön yorulma çatlak boyu
b	her bir pikseli saklamak için kullanılan bit sayısı
C	Paris Erdoğan eşitlik çarpanı
c, m, γ	Rudd ve Engle Modeli deneysel sabitleri
E	Elastisite modülü
σ	Gerilme
W	Kırılma enerjisi
R	Gerilme oranı
R_{OL}	Çeki aşırı yükleme oranı
N_D	Gecikme çevrim sayısı
R_{UL}	Bası aşırı yükleme oranı
K	Gerilme yoğunluk faktörü
ΔK	Gerilme yoğunluk faktör farkı
ΔK_{eff}	Effektif Gerilme yoğunluk faktör farkı
K_{open}	Çatlak açılma gerilme yoğunluk faktör farkı
K_{OP}	Çatlak tam açık iken gerilme yoğunluk faktörü
K_t	Çentik faktörü (gerilme konsantrasyon faktörü)
K_f	Yorulma Gerilme yoğunluk faktörü
K_q	Aday kırılma tokluğu
ΔK_B	Temel seviye yüklemeye gerilme yoğunluk faktör farkı
K_{IC}	Kırılma tokluğu
$K_{max, req}$	Aşırı yükleme sınırına ulaşacak maksimum gerilme yoğunluk faktörü
$(K_{OL})_{max}$	Aşırı yükleme durumunda maksimum gerilme yoğunluk faktörü
ΔK_{rms}	Barsom Modeli (Root mean square) kök temel kare gerilme yoğunluk faktör farkı
n	Görüntü işlemede nicelikleme sayısı
da/dN	Çatlak Gelişim oranı
$(da/dN)_B$	Temel seviye yüklemeye çatlak gelişim oranı
r_v	Çatlak ucunda plastik bölge çapı
ρ	Çatlak ucu eğrilik yarıçapı
σ_f	Kırılma anındaki gerilme
G_C	Kırılma enerjisi
γ	Kırılma yüzey enerjisi
β	Şekil faktörü
S_r	Aşırı yükleme bası artık gerilmesi
γ_{POL}	Aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölge
α	Çatlak boyunun numune anma ölçüsüne oranı (a/w)
m	Paris Erdogen eşitliği boyutsuz üsteli (2 ile 4 arasında değer alır)
N_T	Toplam çevrim sayısı
ϕ_0	Nasgro modeli deneysel sabiti
P	Çentik kökü radüsü

Z_{OL}	Johnson modeli uygulanan K_{max} değeri için plastik bölge boyut
T	Johnson modeli malzeme kalınlığı
R_{cut}^+	Cahang Szamossi ve Liu Modeli gerilme oranının cut değeri
ΔK_{tho}	Cahang Szamossi ve Liu Modeli $R=0$ için ΔK nin eşik değeri
σ_A	Yorulma çatlak gelişiminin ölçüldüğü sıcaklıktaki akma dayanımıdır
σ_{op}	Çatlak açılma gerilmesi
P_{OP}	Çatlak ucunun açılması anındaki yük
K_{OP}	Çatlak açılma yüküne isabet eden gerilme yoğunluk faktörü
N	Toplam yorulma ömrü
N^*	Aşırı yükleme sonrası toplam çatlak gecikme çevrim sayısı
N_D	Aşırı yükleme sonrası çatlak gecikme çevrim sayısı (ilk hızlanma kısmı hariç)

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
AY	Aşırı yükleme
AYO	Aşırı yükleme oranı
CC	Çatlak kapanma
CTOD	Çatlak ucu açılma miktarı
DC	Doğru akım
DGA	Dijital görüntü analizi
DIC	Dijital görüntü analizi
DGY	Değişken genlikli yükleme
DIC	Dijital görüntü analizi
EPD	Elektriksel potansiyel fark
FCG	Yorulma çatlak gelişimi
Hi	Yüksek genlik
Lo	Düşük genlik
OL	Aşırı yükleme
OLR	Aşırı yükleme oranı
SGY	Sabit genlikli yorulma yüklemesi
YÇG	Yorulma çatlak gelişimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Dinamik yüklerin oluşturduğu çıkıntıların SEM görüntüsü.....	7
Şekil 2.2. Dış yüklerden dolayı oluşan kayma bantlarının şematik gösterimi	8
Şekil 2.3. Yorulma çatlağı gelişim safhaları şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.4. Çevrimsel yükleme altında her bir çevrimde yorulma çatlağının da kadar ilerlemesinin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.5. Değişken genlikli blok yükleme.....	11
Şekil 2.6. Çentikli numunede değişken genlikli yük bloğu uygulamaları.....	13
Şekil 2.7. Yük etkileşimini araştırmada kullanılan tipik yükleme durumlarından bazıları.....	15
Şekil 2.8. Tek çeki aşırı yüklemesini takip eden çatlak ilerlemesi gecikmesinin önce ertelenmesi sonra gecikmenin oluşumu.....	17
Şekil 2.9. Periyodik aşırı yükün çatlak gelişimini geciktirme etkisi.....	18
Şekil 2.10. Bası aşırı yüklemesi.....	19
Şekil 2.11. Periyodik aşırı yükleme sonrası çatlak gelişimi.....	20
Şekil 2.12. Çatlak ucunda plastik bölge dağılımı.....	23
Şekil 2.13. Çatlak ucu kayma düzlemlerinde kalınlığın etkisinin şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.14. Aşırı yükleme sonrası oluşan plastik bölge yüzey optik görüntüsü..	25
Şekil 2.15. Aşırı yükleme neticesinde çatlak ucunun sapması, dallanması yüzey optik görüntüsü.....	28
Şekil 2.16. Üzerinde eliptik bir delik bulunan, yük altındaki malzemenin şematik gösterimi.....	31
Şekil 2.17. Üç temel yükleme modu şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.18. Çatlak ucu bölgesindeki gerilmeler ve koordinat sistemi.....	33
Şekil 2.19. Çatlak ucunda oluşan plastik bölge civarındaki gerilme dağılımının şematik gösterimi.....	35
Şekil 2.20. Dinamik ve monotonik yükleme sonucu çatlak ucunda oluşan plas- tik bölge ve dinamik yükleme durumunda gerilme dağılımı şematik gösterimi.....	35
Şekil 2.21. Çatlak boyunun büyümesi ile birlikte gerilme yoğunluğunun da artması.....	37
Şekil 2.22. Gerilme yoğunluk faktörü, kalınlık ilişkisi.....	37
Şekil 2.23. Wheeler çatlak ileleme gecikmesi modelinde çatlak ucu akma bölgelerinin ilişkisi.....	41
Şekil 2.24. Çatlak kapanması modeli.....	44
Şekil 2.25. Elber'in kapanma modelinin şematik gösterimi.....	46
Şekil 2.26. Çatlak kapanmasının etkisinin şematik gösterimi.....	56
Şekil 2.27. CT numunesi için bağlama elemanı.....	59
Şekil 2.28. Çatlak ilerlemesinin çatlak ilerleme düzlemi dışına çıkması.....	63
Şekil 2.29. Fiziksel görüntü ve buna karşılık gelen dijital görüntü.....	67
Şekil 2.30. Görüntünün sayısallaştırılması.....	67
Şekil 2.31. Dijital görüntünün ifade edilmesi.....	68
Şekil 2.32. Dijital görüntüde çözünürlük etkisi.....	69
Şekil 2.33. Gerçek renk küpü.....	72
Şekil 2.34. Gerçek renk görüntü.....	72
Şekil 2.35. Gri ton görüntü.....	73

Şekil 2.36. Plazma nitrürleme işleminin mekanizması.....	75
Şekil 3.1. Çekme deneyi numune görüntüsü.....	77
Şekil 3.2. Yorulma çatlak gelişim oranı testi için standart CT numunesi.....	78
Şekil 3.3. Çentik detayı ve minimum yorulma ön çatlağı.....	80
Şekil 3.4. Plazma nitrürasyon işlemi uygulama görüntüsü.....	81
Şekil 3.5. YÇG test düzeneği ve dijital görüntü alma işlemi.....	85
Şekil 4.1. Plazma nitrürleme işlemi sonrası oluşan kristalografik yapıların X Ray difraktometre analizi.....	86
Şekil 4.2. AISI 4140 çeliğine uygulanan plazma nitrürleme işlemi sonrasında yüzeyden itibaren sertlik dağılımı.....	87
Şekil 4.3. AISI 4140 çeliği CT numunesi çatlak gelişim diyagramı.....	89
Şekil 4.4. SGY ve DGY altında nitrürlemenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerindeki etkisi.....	91
Şekil 4.5. Nitrürlenmiş CT numunesine ait çevrim sayılarına göre çatlak boyu görüntüleri.....	92
Şekil 4.6. Çatlak ucundaki plastik bölge yüzey görüntüsü.....	93
Şekil 4.7. AY'nin oluşturduğu plastik bölge geometrisi.....	94
Şekil 4.8. AY sonrasında çatlak ucunda oluşan plastik bölge büyüklüklerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 4.9. AY uygulamasından sonra yüzeydeki sert nitrür tabakasının kabarıp dökülmüş halinin optik görüntüsü.....	96
Şekil 4.10. İşlemsiz CT numunesinde kırılma yüzeylerine ait çatlak ilerleme evreleri SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.11. Nitrürlenmiş yüzey ile merkez arasındaki kırılma düzlemleri görüntüsü.....	98
Şekil 4.12. Aşırı yükleme bölgesi kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	99
Şekil 4.13. Aşırı yükleme-aşırı yükleme sonrası bölge sınırı SEM görüntüsü...	100
Şekil 4.14. Nitrürlenmiş ve işlemsiz CT numunelerinin farklı çevrim sayılarında (1, 10, 20, 100, 1000, 3000) AY uygulanarak yapılan yorulma çatlak gelişim testlerinden elde edilen a-N eğrileri.....	101
Şekil 4.15. SGY ve DGY altında nitrürlemenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerindeki etkisi.....	104
Şekil 4.16. İşlemsiz CT numunesinin 3000 çevrimlik AY uygulanması durumunda adım adım çatlak ilerleme görüntüsü.....	107
Şekil 4.17. 3000 çevrimlik aşırı yükleme sırasında oluşan çatlak ilerleme miktarları	108
Şekil 4.18. 3000 çevrimlik blok AY sonrasında (a) işlemsiz, (b) nitrürlenmiş numuneye ait kırılma yüzey görüntüsü.....	109
Şekil 4.19. Yüzeyden iç bölge doğrultusunda kırılma düzlemi SEM görüntüsü.....	110
Şekil 4.20. Farklı AY oranlarında yüklemeye tabi tutulmuş, nitrülenmemiş ve nitrürlenmiş CT numunelerinin YÇG testlerinden elde edilen a-N eğrileri.....	112
Şekil 4.21. Farklı aşırı yükleme oranlarında YÇG ömrü üzerinde plazma nitrürlemenin etkisi.....	114
Şekil 4.22. DGY altında nitrürlenmiş numunede adım adım çatlak gelişimi.....	117
Şekil 4.23. AYO=2.5 olan AY sonrası oluşan plastik bölge görüntüleri.....	119

Şekil 4.24. İşlemsiz numune AYO=3 olan 1 çevrimlik AY uygulaması esnasın-da çatlak ucu plastik bölge gelişim evreleri yüzey görüntüleri.....	120
Şekil 4.25. CT numunesi kırılma yüzey görüntüsü.....	121
Şekil 4.26. AYO=3 olan AY uygulamasında temel seviye yükleme bölgesi ile aşırı yükleme bölgesi arasındaki sınıra ait SEM görüntüsü.....	122

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yorulma çatlak gelişim modelleri.....	38
Çizelge 3.1. Kullanılan AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	76
Çizelge 3.2. AISI 4140 çelik malzemenin mekanik özellikleri.....	76
Çizelge 4.1. Farklı aşırı yükleme oranlarında yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde plazma nitrürlemenin ve aşırı yüklemenin etkisi.....	90
Çizelge 4.2. Yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde, farklı sayıdaki aşırı yükleme blok çevriminin ve plazma nitrürlemenin etkisi.....	103
Çizelge 4.3. Farklı aşırı yükleme oranlarında yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde plazma nitrürlemenin ve aşırı yükleme oranının etkisi	113

1. GİRİŞ

Makine parçaları ve yapı elemanları işletme esnasında tekrarlanan gerilmeler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen, belirli bir tekrarlama sayısı sonunda genellikle yüzeyde oluşan bir çatlama, bu çatlağın yayılması ve bunu takip eden kırılma olayı görülmektedir. Yorulma, malzemenin statik tasarım yükünün çok altındaki değişken yükler altında kırılması kavramıdır (Huth 2005). Pek çok mühendislik yapısı servis şartlarında yorulma hasarına maruz kalır.

Mühendislik yapılarında oluşan yorulma hasarı, bir çatlak nüvesi oluşumu, bu çatlak nüvesinin son kırılma noktasına kadar dengeli bir şekilde ilerlemesi ve son kırılma evreleri ile meydana gelmektedir. Bu evreler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Suresh 1998);

- 1- Kalıcı hasarın ilk nüvesinin oluşumuna sebep olan mikro yapısal değişimler.
- 2- Mikroskobik çatlak oluşumu.
- 3- Mikroskobik kusurların büyümesi ve birleşmesi sonucu, çatlak oluşumu.
- 4- Oluşan çatlağın kararlı yayılması.
- 5- Yapısal dengenin bozulması ve tamamen kırılma.

Malzeme üzerinde yorulma hasarının oluşumunu analiz etmede üç temel yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar gerilme ömrü (stress life), şekil değiştirme ömrü (strain life) ve kırılma mekaniği (fracture mechanics) yaklaşımıdır. Bu üç yaklaşımında amaca göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu yönleri vardır. Ancak bazen duruma göre birbirlerinin yerine kullanılabilirler. Örneğin kırılma mekaniği yaklaşımında malzeme üzerinde oluşmuş bir yorulma çatlağının yayılması izlenir.

Geleneksel olarak mühendislik yapılarının tasarımında malzemenin toplam yorulma ömrü dikkate alınır. Fakat makine elemanları işletme şartlarında, çizikler, inklüzyonlar

ve çatlaklar gibi hatalar içerebilir. Dinamik yükler altında çalışan yapısal elemanda, yorulma çatlakları bu kusurlardan başlayabilir. Dolayısıyla, toplam yorulma ömrünün incelenmesinin yerine, çatlaklı malzemenin dayanımının araştırılması gerekmektedir (Jin 2000).

Sabit genlikli yorulma yüklemesi (SGY-Constant-amplitude loading (CAL)) sabit genlikli çevrimsel yorulma yüklemesini ifade etmektedir. SGY altındaki malzemeye bir çevrim yüksek genlikli yük uygulandığında çatlak ilerlemesinde bir gecikme oluşur (Von Euw and Hertzberg 1972; Barsom 1976; Matsuoka and Tanaka 1978; Rudd and Engle 1981; Newman 1981; Suresh 1983; Shin and Flack 1987; Fleck 1988; Robin *et al.* 1988; Ward *et al.* 1989; Ling and Schijve 1992; Newman 1997; Suresh 1998; Lang and Merci 1999; Borrego *et al.* 2003; Murthy *et al.* 2004; Sun 2006; Fang *et al.* 2007; Pommier and Freitas 2002; Pereira *et al.* 2007; Schijve 2009). SGY çevrimi içerisinde uygulanan bu yüksek genlikli yüklemeye aşırı yükleme (AY-over load) denilir. Eğer bir SGY çevrimi bir yada daha fazla sayıda AY ihtiva ediyor ise bu yükleme durumu değişken genlikli yükleme (DGY-variable amplitude loading) adını alır (Schijve 2009).

Mühendislik yapılarının maruz kaldığı DGY durumunun değerlendirilmesi, SGY durumundan çok daha karmaşıktır. DGY durumunda, önce ve sonradan uygulanan yükler birbirini karşılıklı olarak etkilemektedirler. Malzemeye uygulanan yüklemedeki değişim, yorulma çatlak ilerlemesi/gelişimi (YÇG-fatigue crack growth) oranını ve dolayısıyla, malzemenin yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir (Murthy *et al.* 2004). Mühendislik yapıları servis şartları altında genellikle DGY'ye maruzdurlar. Çevrimsel yük altındaki malzemeye tek yada blok olarak AY uygulanması çatlak ilerlemesinin durmasına/gecikmesine sebep olur. Bu olaya çatlak gecikmesi (retardation) denir (Bannantine *et al.* 1989).

AY uygulaması anında çatlak bir miktar ilerlese de daha sonraki temel seviyedeki yük çevrimlerinde çatlak ilerlemesi yavaşlamaktadır. Willenborg *et al.* (1971) ve Wheeler (1972) AY uygulanmasıyla çatlak ucunda temel seviyedeki yük çevrimlerinin oluşturduğundan daha büyük boyutlu bir plastik bölge oluştuğunu bildirmişlerdir. Bu

durum Elber'in çatlak kapanması kavramıyla izah edilebilir (Elber 1970, 1971). Daha büyük değerli AY çevrimi uygulanması yada daha çok çevrim sayılı AY bloğu uygulanması çatlak ucunda daha büyük boyutlu plastik bölge oluşumuna sebep olabilir. Çok sayıda AY çevrimi uygulanmasının oluşturduğu etkiye, çoklu AY etkisi (multiple OL effect) denmektedir (Schijve 2009).

Literatürde çatlak gecikmesini açıklayan çok sayıda teori mevcuttur (Saff 1984; Johnson 1981; Chang *et al.* 1981; Gray and Gallgher 1976; Gallagher and hughes 1974; Porter 1972; Wheeler 1972; Willenborg *et al.* 1971; Elber 1970). Bu teorilerden birisi, çatlağı ilerleten gücün azalmasına sebep olan plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasıdır. Pek çok araştırmacı (Johnson 1981; Wheeler 1972; Willenborg *et al.* 1971; Elber 1970) çatlak gecikmesine çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin çatlak kapanmasına sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir. SGY çatlak ucunda bir plastik bölge oluşturur. Bu çatlak yapıya bir çevrim AY uygulanmasının çatlak ucunda ek bir plastik bölge daha oluşturduğu bilinmektedir. Oluşan bu büyük boyutlu plastik bölge, etrafını saran elastik bölge tarafından sıkıştırılır. Bu karşılıklı gerilim çatlak ucunda bası artık gerilmeleri meydana getirir. Çatlak ucunda oluşan bası artık gerilmesi de çatlak kapanmasına dolayısıyla çatlağın ilerlemesinin durmasına yada yavaşlamasına sebep olur (Murthy *et al.* 2004).

Yorulma çatlak ilerlemesi deneyinde (fatigue crack growth FCG) çevrim sayısı ve buna karşılık gelen çatlak boyunu ölçmek için iki temel metot kullanılır. Bunlar (elektiriksel) potansiyel düşüm ve görsel metotlardır (ASTM E647 2008). Potansiyel düşüm metodu kolayca uygulanabilmesi ve düşük maliyetli olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemde, ortam sıcaklığı, malzeme cinsi ve şekil değiştirme genliği gibi parametrelerden kolaylıkla etkilenilmektedir. Potansiyel düşüm metodunda ortam sıcaklığının kontrol edilmesi gibi bir takım tedbirler alınarak verilerin hassasiyeti artırılabilir. Ancak bu da pratik olamayan bir yoldur ve fazladan maliyet getirmektedir (ASTM E647 2008). Görsel metot da ise çatlak boyu ölçümü, yatay olarak hareket edebilen bir tablanın üzerine yerleştirilmiş olan bir mikroskop vasıtasıyla yapılır.

Şekil değiştirmelerin ölçümünde alternatif bir yöntem olarak dijital görüntü analizi (DGA) (digital image correlation DIC) yöntemi, son zamanlarda pek çok araştırmacı tarafından şekil değiştirmeleri ölçmede kullanılmaktadır (Sozen and Guler 2008; Aydılek *et al.* 2004; Guler *et al.* 1999). DGA metodu ilk kez 1980'lerin başlarında şekil değiştirmeleri ölçmede *Southern California* Üniversitesi'nde kullanılmaya başlanmıştır. Yüzeydeki çok sayıdaki noktadan ölçüm yapılarak Deforme olan katıların yüzeylerindeki yer değiştirmelerinin kolayca tespit edilebileceği bulunmuştur (Chao *et al.* 1998). Böylelikle yüzeye temas etmeksizin yüzeydeki yer değiştirmelerin ölçülmesine imkân sağlanmaktadır.

DGA metodunun FCG deneyinde kullanımıyla elde edilen verilerin bir bilgisayara kaydedilerek tekrar tekrar değerlendirilme yapılması mümkün olmuştur. Oysa potansiyel düşüm ve hareketli mikroskop yöntemlerinde, deney anında elde edilen verilerdeki insan kaynaklı hataların kontrol edilmesi mümkün değildir. DGA metodunun FCG deneyine uyarlanmasıyla, deney süresinin kısalması, görüntülerin saklanarak üzerinde sonradan çalışmalar yapılabilmesi, görüntülerin kısa filme dönüştürülebilmesi ve daha başka avantajlar elde edilmiştir.

Yorulma hasarına karşı malzemenin ekonomik performansını arttırmak yada oluşacak hasarı minimize etmek maksadıyla çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Plazma nitrürleme demir esaslı malzemenin yorulma dayanımını arttırmak üzere kullanılan termo-kimyasal bir yüzey işlemidir (Alsaran *et al.* 2006).

Plazma nitrürleme gibi termokimyasal yüzey işlemleri, makine imalatında kullanılan çeliklerin efektif olarak kullanılabilmesi ve kullanım ömrünün artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Nitrürleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan bileşik tabaka ve altında oluşan difüzyon tabakası, malzemenin yorulma direncini iyileştirir (Çelik and Karadeniz 1995; Cruz *et al.* 1998; Terrent'ev *et al.* 2007; şirin *et al.* 2008; Terres *et al.* 2010).

Plazma nitrürlemenin yorulma ömrü üzerindeki etkisi, gerilme ömrü yaklaşımıyla bir çok araştırımacı tarafından incelenmiştir ( elik and Karadeniz 1995; Guagliano and Vergani 1997; Cruz P. De la and Ericsson 1998; Genel *et al.* 2000; Karakan *et al.* 2002; Alsaran *et al.* 2002; Ashrafizadeh 2003; Alsaran *et al.* 2004; Sirin *et al.* 2008; Terres *et al.* 2010). Alsaran *et al.* (2004) ve  elik and Karadeniz (1995) plazma nitrürleme işleminin toplam yorulma ömrü üzerinde olumlu etkisinin olduğunu bildirmişlerdir. Fakat, yorulma çatlak gelişiminde, DGY altında plazma nitrürlemenin etkisini araştıran çalışma literatürde yoktur.

Bu çalışmada, plazma nitrürlenmiş ve işlemsiz AISI 4140  eliğinin değişken genlikli çevrimsel yük altındaki davranışı araştırılmıştır. 1 çevrimlik AY uygulamasında AYO değiştirilerek ve AYO 2 olan AY bloğu çevrim sayısı değiştirilerek, nitrürlenmiş malzemenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çatlak ilerleme miktarlarının tespitinde dijital görüntü analizi yöntemi kullanılmıştır. Plazma işlemsiz ve nitrürlenmiş malzemelerin yapısal ve mekanik özellikleri, taramalı elektron mikroskobu, optik mikroskop, optik dijital görüntü aygıtları,  niversal servo-hidrolik test cihazı ve mikro-sertlik test cihazı kullanılarak araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal Yorulması

Birçok makine parçaları ve yapı elemanları işletme esnasında tekrarlanan gerilmeler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen, belirli bir tekrarlama sayısı sonunda genellikle yüzeyde oluşan bir çatlama, bu çatlağın yayılması ve bunu takip eden kırılma olayı görülmektedir. Yorulma olayına sadece dışarıdan etkiyen kuvvetler değil, ısı genleşmelerden doğan gerilmeler de neden olabilmektedir. Yorulma olayında çatlak genelde yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişiminin olduğu, gerilme yığılmalarının olduğu yerlerde başlamaktadır. Yorulma çatlağının teşekkülü için;

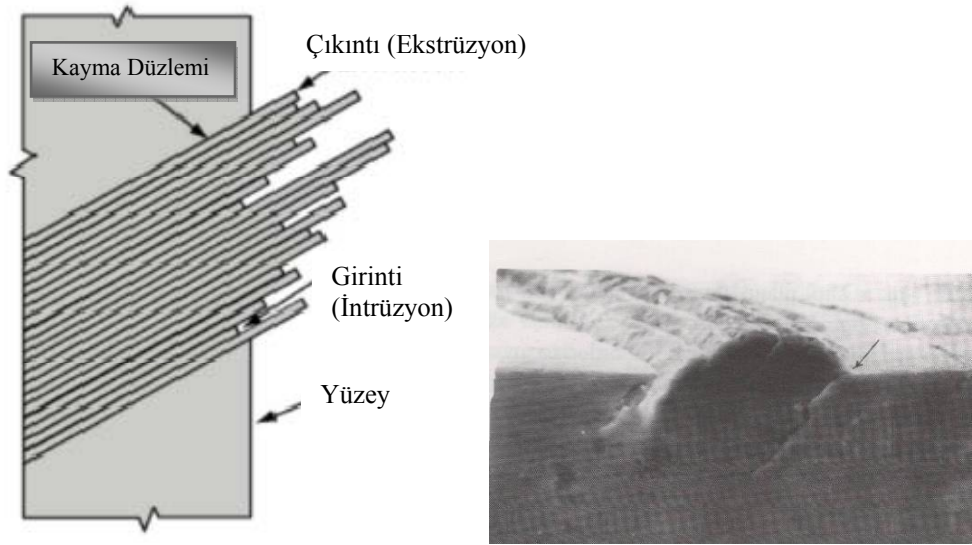
- 1) Yeterli derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesinin olması,
- 2) Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması,
- 3) Uygulanan gerilmenin yeteri kadar çok sayıda tekrarlanması gerekmektedir.

Yüzey kalitesi, yüzey işlemleri, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, gerilme konsantrasyonu, frekans, mikro yapı, tane boyutu, faz dağılımı ve inklüzyonlar gibi yan faktörler de yorulma olayında önemlidir.

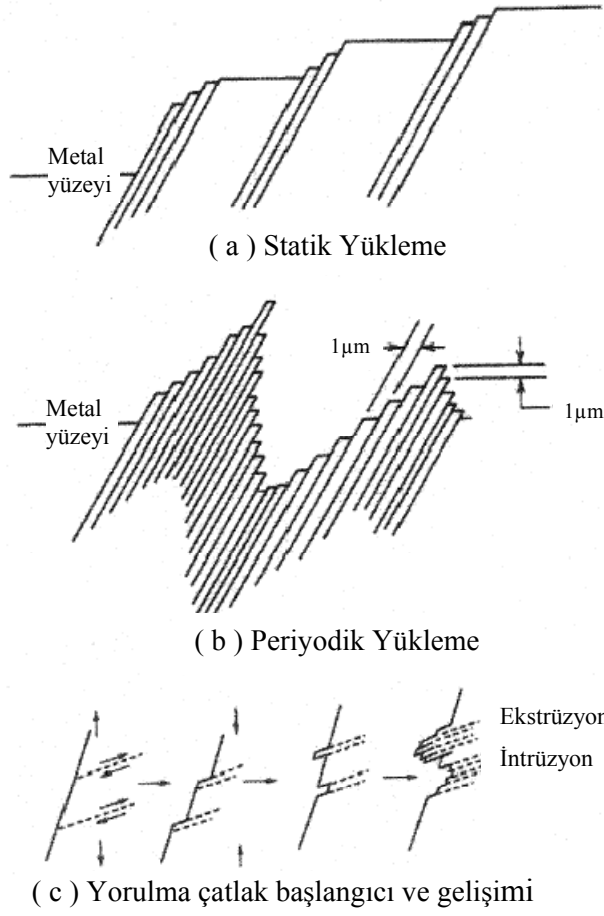
2.1.1. Yorulma esnasında çatlak oluşumu ve yayılması

Yorulma kırılması başlıca üç aşamada meydana gelmektedir. Bunlar: çatlak oluşumu, çatlağın kritik boya kadar ilerlemesi ve kalan kısmın aniden kırılmasıdır. Yorulma plastik deformasyon sonucu olmaktadır.

Yorulma kırılmasına sebep olan çatlak, genelde yüzeyde başlamaktadır. Uygulanan yük, akma mukavemetinin altında olmasına rağmen tekrarlanan yüklerin birikmiş etkisi nedeniyle malzemede plastik deformasyon yer alır. Yorulma çatlakları, yüzey tanelerindeki kayma bantlarında başlar. Malzemeyi meydana getiren kristaller kendi aralarında farklı düzene sahiptirler. Oryantasyonu uygulanan gerilmeye en uygun olarak yönlenen kristallerde kayma batları harekete geçerek girinti ve çıkıntılar meydana getirirler (Şekil 2.1 ve 2.2). Oluşan bu girinti ve çıkıntılar ise çentik etkisi meydana getirmektedir. Bunların boyutları 1µm civarındadır (Suresh 1998). Malzemenin dış kısmı, iç kısmına nazaran daha yumuşak ise yorulma daha erken meydana gelir. Parça yüzeyinin düzgünlük derecesi de yorulma ömrüne etki eden bir faktördür. Pürüzler gerilme yoğunlaşması oluşturarak yorulma ömrünün kışalmasına sebep olabilir.

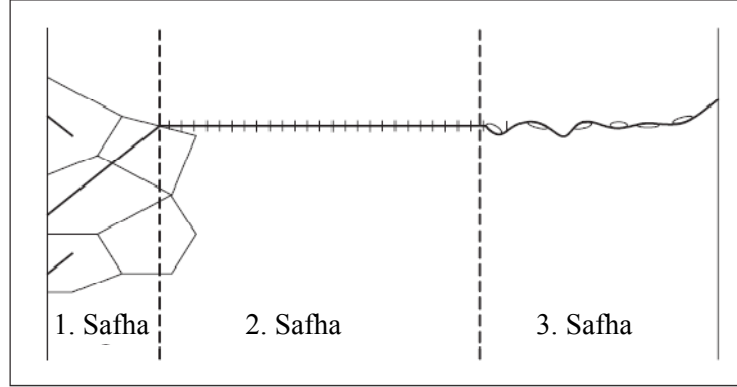


Şekil 2.1. Dinamik yüklerin oluşturduğu çıkıntıların SEM görüntüsü (Peralta *et.al.* 1999)



Şekil 2.2. Dış yüklerden dolayı oluşan kayma bantlarının şematik gösterimi (Suresh 1998)

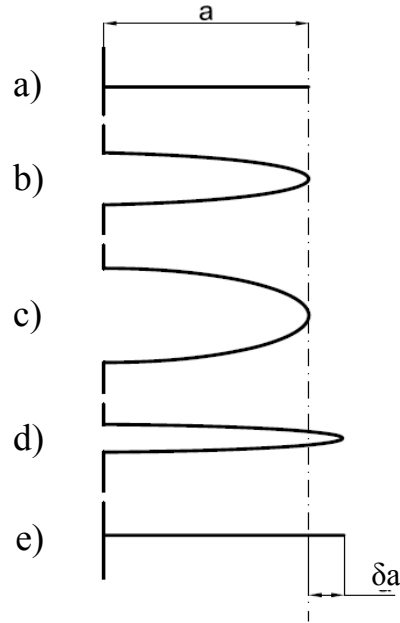
Mühendislik yapılarında yorulma hasarı oluşumu üç evrede oluşur (Şekil 2.3). Birinci aşamada yorulma çatlaklarının başlangıcı pürüzsüz olan yüzeyde oluşan sürekli kayma batları boyunca olmaktadır. Bu aşamada çatlak yalnızca birkaç kristal boyunca ilerlemektedir. Çatlak ilerleme hızı ikinci aşamaya göre daha düşüktür. Maksimum kayma gerilmesinin normali ile uygulanan gerilme aralarında 45° açı oluşur. Çatlak birkaç kayma bandı kadar ilerledikten sonra, yönünü değiştirerek yükleme eksenine dik yönde ilerlemesine devam eder. İkinci evrede çatlak istikrarlı bir şekilde ilerler. Çatlak gelişim evresinin büyük bölümünü oluşturur. Bu evre son kırılma evresine kadar devam eder ve son kırılma evresinde çatlak hızla ilerleyerek malzeme aniden kırılır (Suresh 1998).



Şekil 2.3. Yorulma çatlak gelişim safhaları şematik gösterimi (Laird 1967)

- *1. Safhada tek eksenli gerilme durumunda maksimum kayma gerilmesinin normali ile uygulanan gerilme aralarında 45° açı oluşur. Dolayısıyla mikro çatlaklar da bu doğrultuda yönelmiş olur.
- 2. Safhada ise çatlak uygulanan gerilmeye 90° alacak şekilde yönelir.
- 3. Safha son kırılma safhasıdır. Düzensiz ani kırılma olur.

Yorulma çatlak gelişiminin ikinci evresindeki çatlakın açılıp kapanmasıyla oluşan çatlak ilerlemesi Şekil 2.4'de, çatlak uzunluğu (a) ve sıfırdan maksimum değere bir yorulma çevrimi uygulanırken, şematik olarak gösterilmiştir. Çatlak açılma yönünde yükleme yapıldığında çatlak ucu açılırken “ δa ” kadar ilerler ve çatlak ucu körleşir. Çatlak gelişimi sünek bir hal alır. Yük sıfıra düşürüldüğünde çatlak kapanırken çatlak ucu tekrar keskinleşir. Çatlak, her bir çevrimde bir körleşip bir keskinleşmek suretiyle “ δa ” kadar ilerler. Başka bir deyişle, yorulma çatlak gelişimi, çatlak ucundaki her bir çevrimde plastik dönüşüm tekrarlamalarından kaynaklı bir mekanizmadır. Bu temel mekanizmada gerilmelerin (strain) oluşumu etkindir (Pook 2007).



Şekil 2.4. Çevrimsel yükleme altında her bir çevrimde yorulma çatlaklarının δa kadar ilerlemesinin şematik gösterimi (Pook 2007).

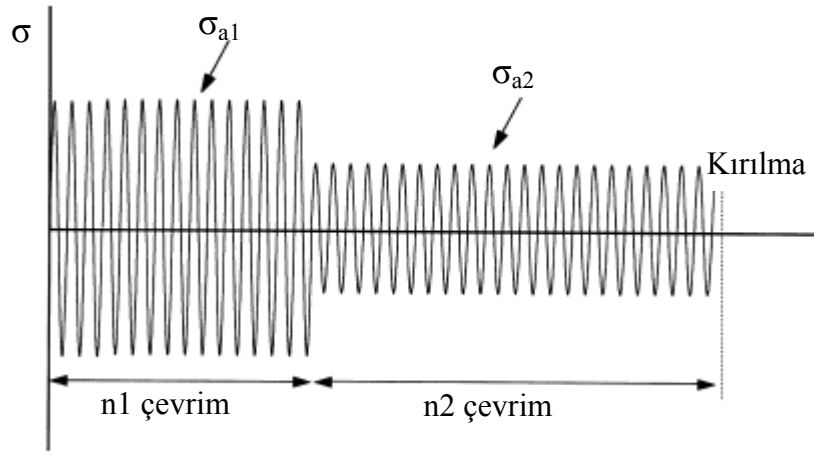
*(a) yük sıfır, (b) küçük çekme yüklemesi, (c) büyük çekme yüklemesi, (d) küçük basma yüklemesi, (e) yükleme sıfır

2.1.2. Değişken genlikli yükler altında yorulma çatlak gelişimi

Genellikle yorulma çatlak gelişiminde yükleme durumu iki ana gruba ayrılır. Bunlardan ilki sabit genlikli yükleme diğeri ise işletme şartlarındaki yüklemedir. Sabit genlikli sürekli yükleme için çatlak gelişimi hakkında çok sayıda araştırma mevcuttur. Değişken genlikli yükleme altında yorulma durumunun araştırılması servis şartlarına daha yakın bir durum olduğundan önemli bir husustur. Değişken genlikli yükler altındaki çatlak ilerlemesi ifade edilirken “Miner kuralından” bahsetmek gerekir.

Miner Kuralı: Bir numune sabit genlikli yükleme altında, yorulma ömrünün belli bir yüzdesine ($\%X$) kadar yorulmaya tabi tutulduğunda; numunenin yorulma ömrünün (N), $\%(100-X)$ i kadar düşmesinden dolayı yorulma hasarı oluşmuştur, hasar henüz görülemez boyuttadır, fakat mevcuttur.

Çoğu değişken genlikli yükleme durumunda Şekil 2.5’de ki gibi yalnızca bir kez genlik değişir. Bu durumun işletme şartlarındaki durumu karşılamadığı açıktır. Fakat bu tek genlik değişmeli yükleme durumu Miner kuralının geçerliliğini kontrol etmede kullanılır. Şekil 2.5’de σ_{a1} gerilme genliğinde n_1 adet çevrim uygulanmış, takip eden çevrimlerde genlik σ_{a2} ye düşürülmüştür. Deney numune kırılıncaya kadar düşük genlikte n_2 çevrim daha devam ettirilmiştir. Bu deneyde uygulanan iki farklı blok yük çevriminde problem, n_2 çevrimini tahmin etmektir.



Şekil 2.5. Değişken genlikli blok yükleme (Schijve 2009)

Pâlmgren (1924) günümüzde Miner Kuralı ya da Lineer Toplam Hasar Hipotezi olarak bilinen hipotezi yayınlamıştır (Schijve 2009). Bu kurala göre gerilme genliği σ_{a1} ile n_1 sayıda çevrim uygulandığında, yorulma ömrünün N_1 e göre n_1/N_1 ini tüketmiş duruma denk bir ömür kalmıştır. Aynı kabul birbirini takip eden yük çevrimi blokları için de uygulanır. Eğer yorulma ömrü tamamen tüketilmişse hasar meydana gelir. Şekil 2.5’de iki yük bloğu için aşağıdaki şartlarda kırılma olayı gerçekleşecektir.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 100\% \quad (2.1)$$

Eğer ikiden fazla blok yük uygulanırsa bu eşitlik aşağıdaki şekilde genelleştirilebilir.

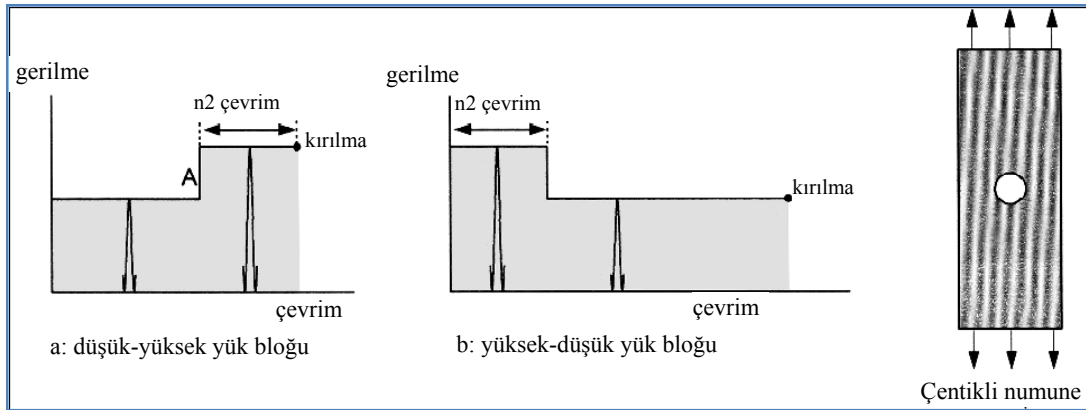
$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.2)$$

Pälmgren (1924) daha fazla bir bağıntı türetmemiştir. Fakat değişken genlikli yükleme altında yorulma ömrü açısından bir bağıntıya ihtiyaç vardır. Langer (1937) bu bağıntıyı daha geliştirmek üzere yorulma çatlak gelişimini, çatlak başlangıç ve çatlak gelişme periyodu olarak ikiye ayırmıştır. Daha sonra Miner (1945) lineer toplam hasar kuralının ilk türetmesini yapmıştır (Schjive 2009). Miner (1945)'e göre W kırılma için gerekli olan toplam enerji olmak üzere W 'nin sabit bir değeri için çevrim sayısı n_i ile orantılı olarak numune kırılıncaya kadar uygulanan işi absorbe edebilir. Burada $w_i/w = n_i/N_i$ olduğu ifade edilmiştir ve $\sum w_i = w$ dur. Miner değişken genlikli yükleme altında çentiksiz numunelerde ve birkaç ince perçinli 2024-T3 malzemeleri üzerinde deneyler yapmıştır. Deneylerde 2 ila 4 blokluk yük çevrimleri uygulamıştır. $\sum n_i/N_i$ 'in değerinin 0.61 ile 1.45 arasında değişiklik gösterdiğini, fakat ortalama değerin 1.0'a yakın olduğunu bulmuştur. O zamandan beri $\sum n_i/N_i = 1$ kuralı; lineer toplam yorulma hasar kuralı, Pälmgren – Miner kuralı, Miner kuralı yada daha doğru olarak Pälmgren kuralı olarak anılmaktadır. 1945 den sonra değişken genlikli yükleme altında Miner kuralı üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Pek çok çalışmada ciddi çelişkiler tespit edilmiştir (Schjive 2009). Bu çelişkili bulgular neticesinde değişken genlikli yükler altında yorulma davranışıyla ilgili yeni birkaç teori geliştirilmiştir. Ancak bu teorilerin Miner kuralına benzerlik göstermektedir ve fiziksel bakış açısından fazla güvenilir değildir. Ayrıca deneysel araştırmalar çoğunlukla bazı özellikli test programlarıyla sınırlı kalmıştır. Değişken genlikli yüklemede akılcı bir yorulma ömür tahmini için bir takım ihmaller yapma gerekliliği vardır (Schjive 2009).

Çentik ucundaki plastisitenin etkisinin miner kuralı açısından değerlendirilmesi:

Şekil 2.6'da yalnızca iki yük bloğuyla değişken genlikli yorulma durum görülmektedir. Bu yük blokları ön çentikli bir numuneye uygulanmaktadır. Yorulma numunesine 'a' ve 'b' şekillerinde aynı değerdeki yük genlikleri önce düşük, sonra yüksek (Lo- Hi) ve daha sonra önce yüksek sonra düşük genlikli (Hi – Lo) yük blokları uygulanmaktadır.

Minimum gerilme $\sigma_{\min}=0$ ve gerilme oranı $R=0$ 'dır. Maksimum gerilme durumunda çentik dibindeki gerilme, malzemenin akma gerilmesini geçmektedir. Ancak düşük yük genliği durumunda çentik dibindeki gerilme akma gerilmesini geçmemektedir. Düşük – yüksek genlikli blok yükleme esnasında ilk yük bloğunda çatlak ucunda plastik dönüşüm olmayacağı manasına gelir. Fakat diğer yükleme şeklinde (Şekil 2.6 (b)) ilk blok yüklemede aniden çentik ucunda plastik bölge oluşacaktır. Bu durumda düşük genlikli olan ikinci yükleme başlangıcında çentik kökünde bası artık gerilmeleri meydana gelecektir. Bu durum yorulma ömrü açısından faydalı olur. Dolayısıyla düşük-yüksek genlik yükleme durumuyla, yüksek-düşük genlikli yükleme durumunda aynı miktarda çevrim uygulanmasına rağmen yüksek-düşük genlik durumunda çatlak ucunda oluşan bası artık gerilmelerinin faydalı etkisinden dolayı daha uzun yorulma ömrü söz konusu olacaktır.



Şekil: 2.6. Çentikli numunede değişken genlikli yük bloğu uygulamaları

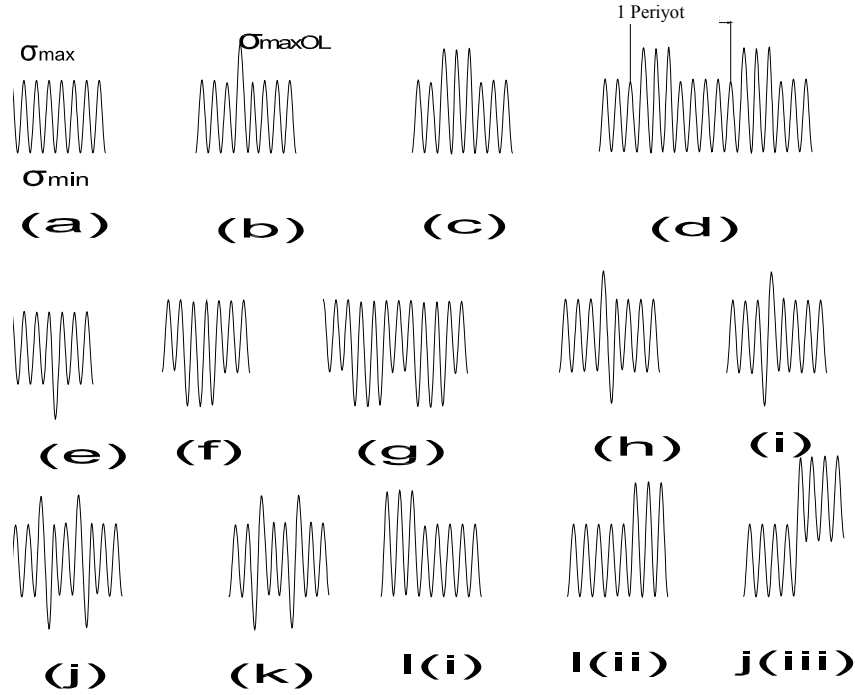
Sonuç olarak, uygulanan yük bloklarının sıralaması yorulma ömrü açısından önem arz etmektedir. Ancak Miner kuralı bakış açısından, yük uygulama sırası dikkate alınmaz. Çünkü artık gerilmelerdeki değişim dikkate alınmaz.

Çeki aşırı yüklemesinin etkisi (Şekil 2.7(b), 2.7(d)) pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Tek bir çeki aşırı yüklemesi, aşırı yükleme oranına bağlı olarak çatlak ilerlemesinde önemli miktarda gecikmeye sebep olabilir.

Yorulma çatlağının gelişimi sırasında, normal yükleme genliği içersinde tek çeki aşırı yüklemesi ya da yüksek genlik-düşük genlik blok yükleme silsilesi aşırı yükleme oranına bağlı olarak çatlak ilerlemesinde gecikmeye hatta çatlak ilerlemesinin tamamen durmasına sebep olabilir. Genel olarak daha uzun bir çatlak ilerleme gecikmesi aşağıdaki şekilde sağlanabilir.

- a) Aşırı yükleme genliğinin yükseltilmesi
- b) Çatlak ilerlerken aşırı yüklemenin tekrarlanması
- c) Tek aşırı yükleme yerine blok aşırı yükleme uygulanması.

Sabit genlikli yükleme esnasında tek aşırı yüklemenin yapılması durumu değişken genlikli yüklemenin en basit şeklidir. Tek bir aşırı yüklemenin uygulanması ile daha sonra gelen çok sayıdaki çevrimde çatlak ilerlemesinin önemli oranda yavaşladığı gözlemlenmiştir. Bu durum çatlak gecikmesi olarak tanımlanmaktadır. Aşırı yükleme oranının AYO (R_{OL}) düşmesiyle uyumlu olarak çatlak gecikmesi çevrim sayısı (N_D) düşer.



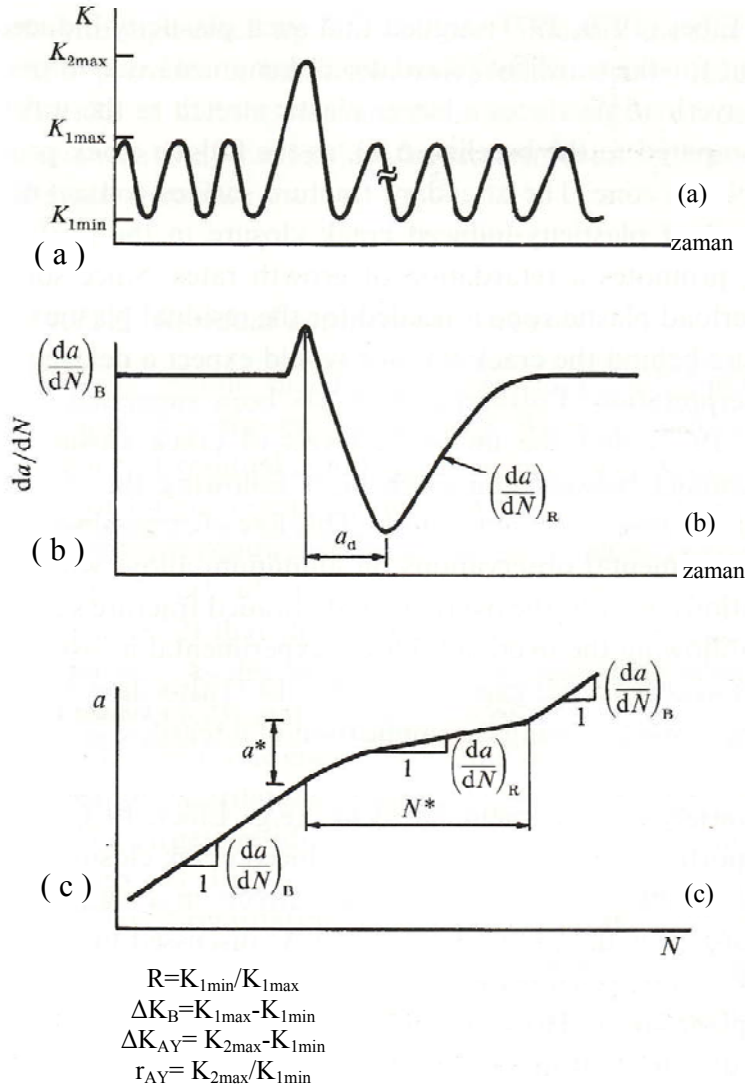
Şekil 2.7. Yük etkileşimini araştırmada kullanılan tipik yükleme durumlarından bazıları
 * a) sabit genlikli yükleme; tipik değişken genlikli yükleme çevrimi olarak, b) tek aşırı yükleme, c) blok aşırı yükleme, d) periyodik blok aşırı yükleme, e) tek bası (negatif) aşırı yükleme, f) blok bası aşırı yüklemesi, g) periyodik blok bası aşırı yüklemesi, h) tek bası-çeki aşırı yüklemesi, i) periyodik bası - çeki aşırı yüklemesi, j) periyodik bası - çeki blok aşırı yüklemesi, k) periyodik çeki - bası aşırı yüklemesi, l) iki seviyeli blok yükleme l(i) yüksek - düşük, l(ii) düşük - yüksek ve l(iii) hem maksimum hem de minimum yük

Malzeme yorulma yüklerine maruz iken bası (negatif) aşırı yüklemesi yapılması durumunda Şekil 2.7(e), (g) yorulma çatlak oluşması ve ilerlemesi açısından zararlı etki oluşur, çatlak ilerlemesi hızlanır. Bu etkinin, çatlak ucunda oluşan çeki plastik bölgesinden ve çatlak içersindeki talaşların ezilmesiyle çatlak kapanma etkisinin azalmasından kaynaklandığı var sayılmaktadır. Bu durumda çatlak gelişim oranı artar ve yorulma ömrü düşer. Bası aşırı yükleme oranının (R_{UL}) artırılmasıyla yorulma ömrü azalmaktadır. Bası aşırı yüklemesinden dolayı çatlak ilerlemesinin hızlanması çatlak kapanmasındaki azalmaya ithaf edilmektedir. Uygulanan bası aşırı yüklemesinin genliğine de bağlı olmak kaydıyla, bası aşırı yüklemesinin sebep olduğu çatlak hızlanma etkisi, çeki aşırı yüklemesinin sebep olduğu çatlak gecikmesine göre daha küçüktür.

Sabit genlikli bir yükleme durumunda genlik aniden yüksek değerden düşük değere düşerse Şekil 2.7 l(i) (yüksek değerden düşük değere), oluşan çatlak gecikmesi, peş peşe birkaç aşırı yükleme uygulamasındaki çatlak gecikmesine çok benzer. Eğer iki blok yükleme çevrimi aynı maksimum değere sahip ise çatlak ilerleme hızı, gerilme yoğunluk faktör farkı (ΔK) ya ve dolayısıyla bloğun minimum değerine bağlıdır.

Şekil 2.8’de tek bir çeki aşırı yüklemesini takip eden tipik çatlak gelişim süreci şematik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere; temel gerilme seviyesinde, gerilme yoğunluk faktör farkı ΔK_B , yorulma çatlak ilerlemesi sırasında karakteristik bir yorulma çatlak gelişim oranı $\left(\frac{da}{dN}\right)_B$ sergiler. Eğer bu esnada çeki aşırı yüklemesi uygulanırsa malzeme, genellikle tam olarak aşırı yükleme esnasında çatlak gelişiminde geçici olarak bir hızlanma (çatlak gecikmesi ertelenmesi) sergiler (Corlby and Packman 1973). Kırılma yüzeyindeki (gerilme bölgesi) değişimler, aşırı yükleme çevrimi sırasında çatlağın ani ilerlemesiyle uyumludur. Bu gerilme bölgesindeki değişimler, aşırı yükleme oranı AYO (r_{OL}), ciddi oranda büyük olduğunda ($r_{OL}=2,5$ (Sander and Richard 2003)) kolaylıkla gözlemlenir (kırılma yüzeyi AY bölgesi SEM görüntüsü, AY bölgesi yüzey ve kırılma yüzeyi optik görüntüsü).

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi aşırı yükleme sonrasında tekrar temel gerilme genliğine dönülürse genellikle çatlak ilerleme yavaşlaması periyoduna girilmiş olur. Bu çatlak yavaşlaması periyodunda ilk anda çatlak ilerlemesinde ani bir hızlanma görülür. Daha sonra bu durum tersine dönerek çatlak ilerlemesi yavaşlar ve bir minimum değere ulaşır (Şekil 2.8 (b)). Ardından çatlak ilerlemesi tekrar yavaş yavaş hızlanarak temel gerilme seviyesindeki ilerleme hızına $\left(\frac{da}{dN}\right)_B$ ulaşır. Çatlak ilerlemesindeki bu yavaşlama, erteleme mesafesi olarak da bilinen a_d mesafesi boyunca devam eder. Aşırı yükleme sonrası çatlak ilerleme miktarı a_D ve çevrim sayısı N^* (Şekil 2.8(c)) değerleri üzerinde; ΔK_B nin, malzeme mikro yapısının, çevrenin ve bunlara ilaveten normal yük oranı R ile aşırı yük oranı r_{AY} nin, güçlü bir etkisi vardır.

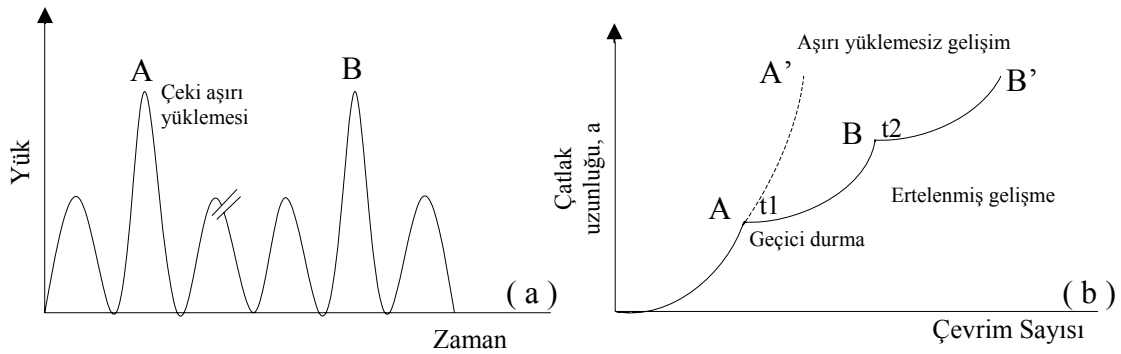


Şekil 2.8. Tek çeki aşırı yüklemesini takip eden çatlak ilerlemesi gecikmesinin önce ertelenmesi sonra gecikmenin oluşumu (Suresh 1998)

Burada önemli olan bir nokta; aşırı yükleme her zaman çatlak ilerlemesinde faydalı etki yapmaz. Düşük çevrimli yorulma testlerinde aşırı yükleme çatlak ilerlemesinde hızlanmaya sebep olmaktadır. Ayrıca aşırı yükleme periyodunun çok küçük olması da çatlak ilerlemesini hızlandırabileceği unutulmamalıdır. Çeki aşırı yüklemesinin çatlak ilerlemesini geciktirme etkisi (retardation) ciddi manada temel yükleme seviyesine bağlıdır. Yüksek çevrimli yükleme durumunda AY uygulaması çatlak ilerlemesini daha fazla geciktirmektedir. Temel seviyede düşük yüklerde aşırı yükleme oranını daha fazla

arttırmak mümkün olmaktadır. AYO, temel yükleme seviyesiyle anlam kazanmaktadır (Sander and Richard 2003). Çeki aşırı yüklemesinin çatlak ilerlemesinde gecikmeye sebep olabileceği gibi bası aşırı yüklemesinin ise çatlak ilerlemesini hızlandırabileceği bilinmektedir.

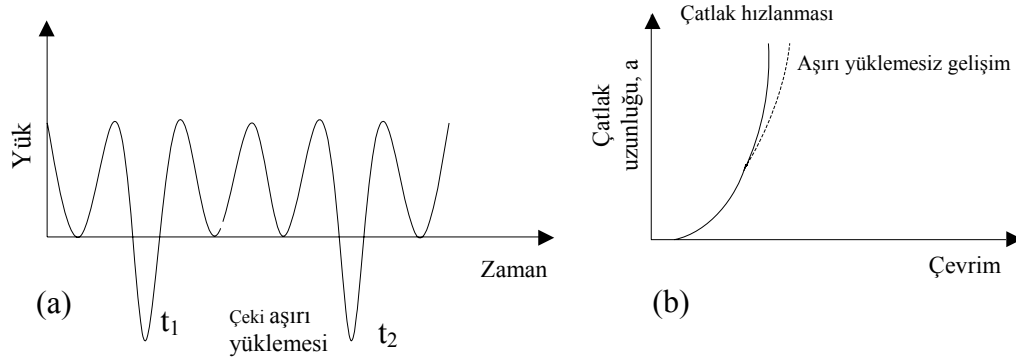
Şekil 2.9(a)'da sabit genlikli yorulma durumunda A ve B noktalarında çeki aşırı yüklemesi uygulanmıştır. Bu durumdaki çatlak gelişim süreci Şekil 2.9(b)'de şematik olarak gösterilmiştir. OA eğrisi aşırı yüklemeden önceki çatlak gelişimini göstermektedir. OAA' eğrisiyle de yükün aynı genlikle devam ettirilmesi durumunda çatlak olası gelişimini göstermektedir. Şekil 2.9(a)'da ki t_1 anında bir ya da birkaç çevrimlik çeki aşırı yükü uygulanmaktadır. Orijinal gerilme genliği içerisinde yalnız bir kez aşırı yük yüklense daha sonraki çevrimlerde çatlak ilerlemesinin geçici olarak yavaşlar.



Şekil 2.9. Periyodik aşırı yükün çatlak gelişimini geciktirme etkisi

*a) yükleme b) çatlak gelişimi (Manson and Halford 2006)

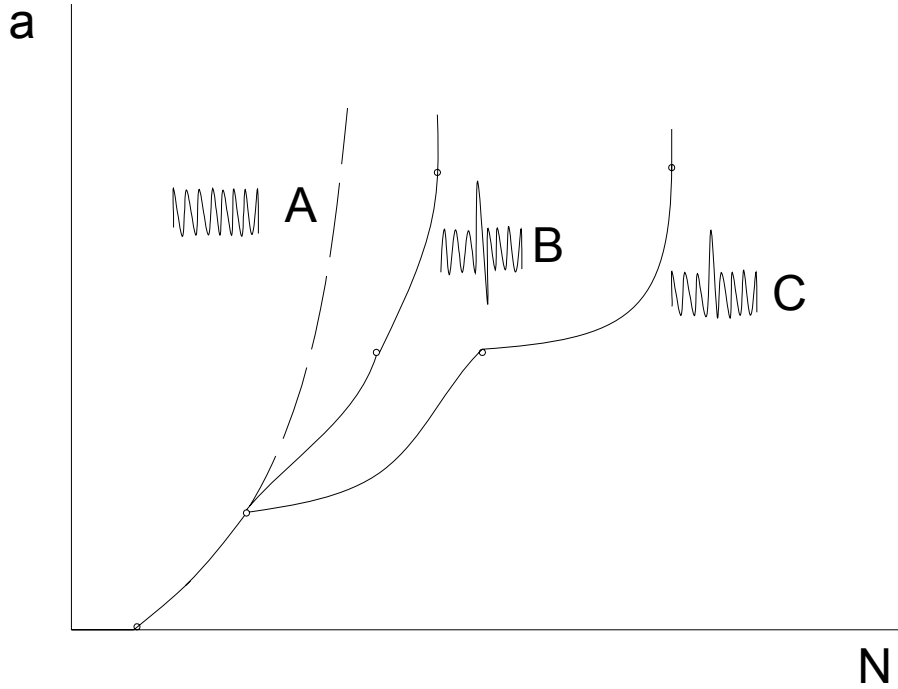
Aslında bir dönem boyunca çatlak gelişimi tamamen durabilir. Ancak çatlak daha sonra (eğer düşük yüklemeye devam edilirse) tekrar büyümeye başlar. t_2 anında ikinci kez aşırı yükleme yapılırsa, çatlak ilerlemesinde yavaşlama tekrar gözlenir, çatlak boyu kritik bir boya ulaşıncaya, numune kırılıncaya kadar bu durum bu şekilde devam eder.



Şekil 2.10. Bası aşırı yüklemesi (underload) (a), çatlak gelişiminde hızlanma (b)

Şekil 2.10 (a)'da bası aşırı yükleme durumu ve (b)'de ise bası aşırı yüklemesinin ardından çatlak ilerleme hızının sabit genlikli duruma kıyasla arttığı görülmektedir. Bası aşırı yüklemesinin yorulma ömrü üzerindeki etkisinin çeki aşırı yüklemesine oranla daha az olduğu görülmektedir.

Şekil 2.11'de A sabit genlikli yükleme durumunda çatlak ilerlemesini göstermektedir. B durumunda ise bir aşırı çeki ve hemen ardından bir bası aşırı yüklemesi uygulamasının ardından tekrar temel gerilme genlik seviyesine dönmüştür. Burada bir miktar çatlak gecikmesi meydana gelmekte daha sonra temel çatlak ilerleme rejimine dönmektedir. Aynı yük çifti tekrar uygulandığında aynı şeyler tekrar oluşacaktır. C durumunda ise temel gerilme genliği içersinde bir adet çeki aşırı yükleme uygulanması durumunda çatlak ilerlemesinin yavaşladığı hatta geçici olarak durduğu görülmektedir.



Şekil 2.11. Periyodik aşırı yükleme sonrası çatlak gelişimi A, çeki-bası aşırı yüklemesi B, çeki aşırı yüklemesi C (Suresh 1998)

Bununla ilgili çok sayıda gözlem yapılmıştır. McMilan, Pellouks ve Schijve çatlak gecikmesiyle ilgili olarak üç temel muhtemel faktörden bahsetmiştir. Aşırı yüklemenin sebep olduğu, metal çatlak ucunda şekil değiştirme sertleşmesi, çatlak ucu körleşmesi ve metal çatlak ucunda bası artık gerilmeleri (Sun 2006).

2.1.3. Çatlak kapanma mekanizmaları

Literatürde yük etkileşimi hakkında deneysel tabanlı olarak bir takım açıklamalar yapılmıştır (Elber 1970; Shin and Fleck 1987; Newman *et al.* 1988; Ward *et al.* 1989; Schijve 2003). Aşırı yüklemekten dolayı oluşan çatlak gecikmesi çok sayıda farklı mekanizma ile açıklanmaktadır (Murthy *et al.* 2004) ve hala bu mekanizmalar üzerinde tam bir uzlaşma sağlanamamıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalarda, çatlak ucunda oluşan bası artık gerilmelerinin çatlak gecikmesine birinci derecede sebep olduğu

söylenmekte idi. Daha sonraları çatlak gecikmesinin asıl sebebinin, çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin çatlak kapanmasına sebep olmasının olduğu ileri sürülmüştür.

Çatlak gecikmesine sebep olan mekanizmalar:

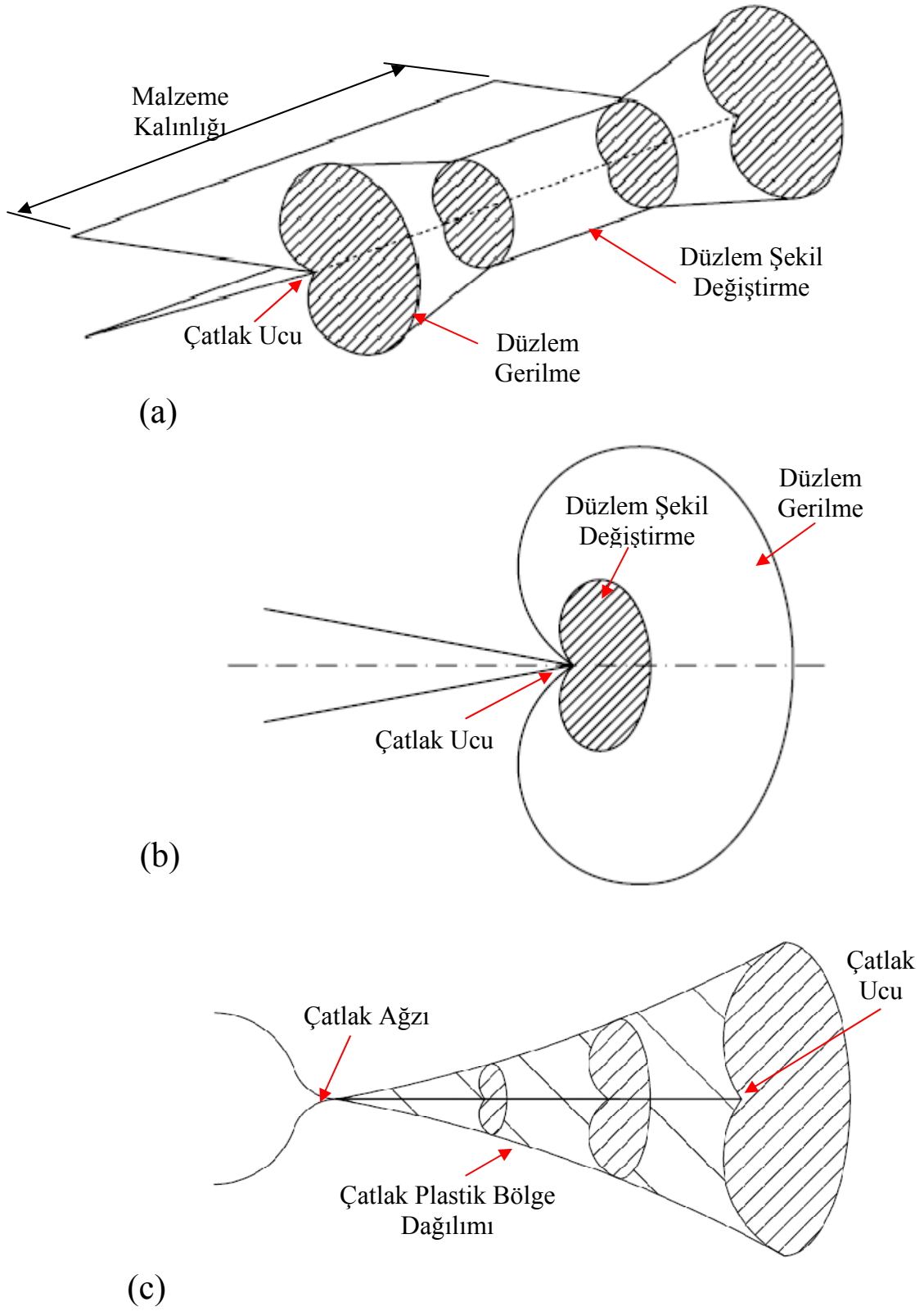
- a) Plastisitenin sebep olduğu kapanma
- b) Çatlak ucu körleşmesi
- c) Artık gerilmelerin etkisi
- d) Çatlak önündeki düzensizlikler
- e) Çatlak yüzeylerindeki pürüzlülüğün sebep olduğu kapanma
- f) Özel gerilme/şekil değiştirme şartlarının oluşması
- g) Mikro yapının karakteristiği
- h) Kalınlığın etkisi
- i) Çevre şartları
- j) Değişken genlikli yüklemde yorulma sınırı
- k) Mekanik özellikler ve akma gerilmesinin etkisi

2.1.3.a. Plastisitenin etkisi

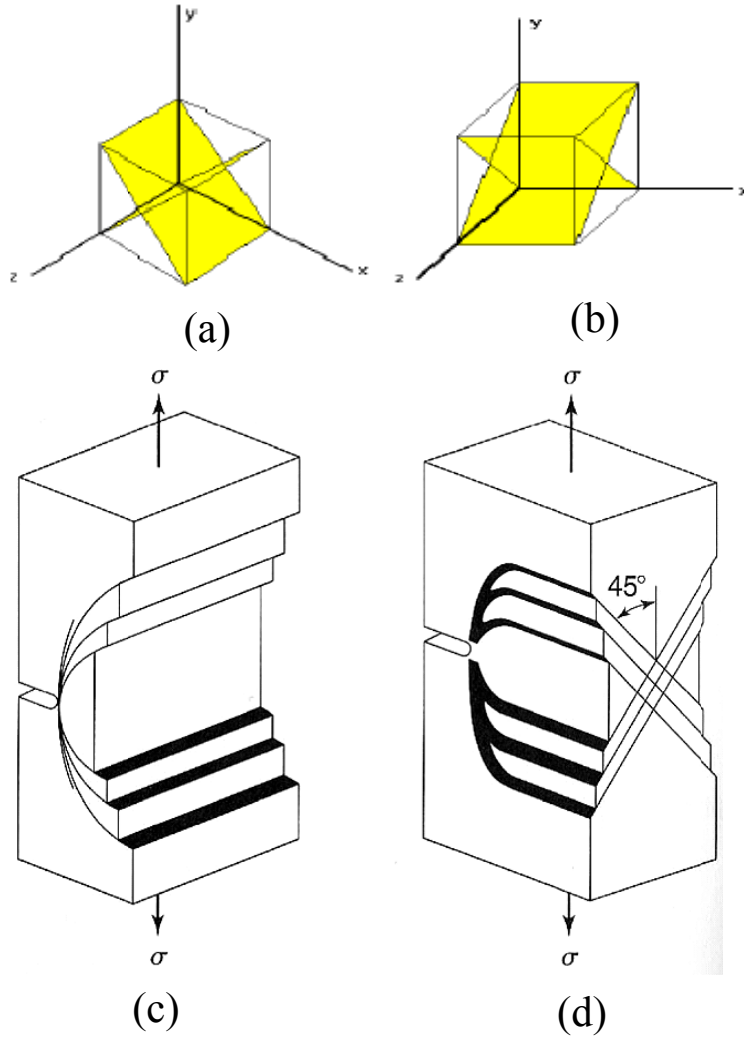
Çatlak yüzeylerinin teması ve aşırı yükleme sonrasında plastisitenin seviyesinde yükselme, çatlak gelişimini geciktiren çatlak kapanmasında bir artışa sebep olur. Çatlağın gelişimi aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölgeye doğru olduğundan, çatlak ucu gerisinde erken kapanmanın olması için kalıcı plastik gerilim bölgesinde büzülmeye ihtiyaç vardır. Başka bir deyişle, aşırı yükleme sonrasında oluşan normal yüklemdekenden daha büyük boyutlu olan plastik bölge, kendini çevreleyen elastik bölge tarafından sıkıştırılır. Bu durum çatlak ucunda bası artık gerilmeleri oluşturur. Aşırı yükleme sonrası oluşan plastik bölgenin büyüklüğünün, daima aşırı yükleme öncesi plastik bölgeden daha fazla olduğu görülmüştür.

Yüksek şekil değiştirme sertleşmesine uğramış malzemelerde az değişime uğramış olana göre çatlak gecikmesi daha belirgin ve anlaşılabilir. Çoğu araştırmacı şekil değiştirme sertleşmesinin, plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanması mekanizmasının devreye girmesiyle çatlak gelişiminin ertelenebileceğini bildirmiştir (Elber 1970, 1971). Plastisiteden dolayı çatlağın kapanmasının, aşırı yükleme sonucu oluşan çatlak ilerleme gecikmesini açıklayabileceğini ileri sürmüştür.

Şekil 2.12’de çatlak civarında oluşan plastik bölgenin dağılımı gösterilmiştir. Şekil 2.12 (a) ve (b)’de görüleceği üzere çatlak ucunda, numune yüzeyinde düzlem gerilme hâli, merkezde ise düzlem şekil değiştirme hâli söz konusudur. Dolayısıyla çatlak ucunda, numune yüzeyinde daha büyük boyutlu plastik bölge, merkezde ise daha küçük boyutlu plastik bölge oluşumu söz konusudur. Şekil 2.12 (c)’de ise çatlak ilerleme yönüne dik olan düzlemdeki plastik bölge dağılımı gösterilmiştir. Burada görüleceği gibi çatlak başlangıç evresinde çatlak etrafında küçük bir alanda plastik bölge oluşurken, çatlak ilerledikçe numuneye gelen gerilme arttığından çatlağın etrafındaki plastik bölgenin boyutu da büyümektedir. Şekil 2.13’de (a) ve (c) malzeme merkezinde oluşan düzlem şekil değiştirme haline ait, (b) ve (d)’de malzeme yüzeyinde oluşan düzlem gerilme haline ait kayma düzlemleri şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.12. Çatlak ucunda plastik bölge dağılımı (Suresh 1998)



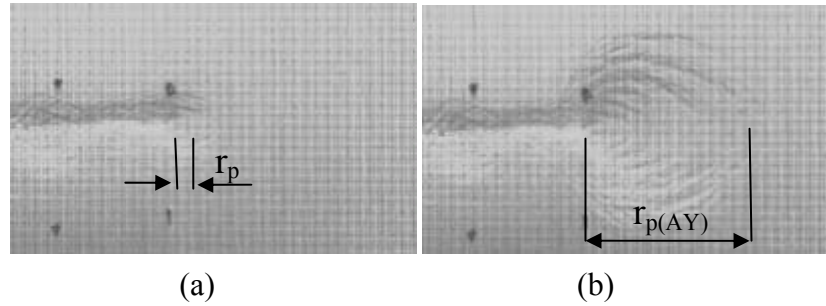
Şekil 2.13. Çatlak ucu kayma düzlemlerinde kalınlığın etkisinin şematik gösterimi

* (a), (c) Düzlem şekil değiştirme hali (kalın malzeme), (b), (d) Düzlem gerilme hali (ince malzeme) (Sanford 2003)

Yorulma yüklemesi esnasında uygulanan ani aşırı yükleme, düzlem gerilme halinde çatlak ucunda daha büyük boyutlu plastik bölge oluşumuna sebep olur. İnce malzemeler ve sünek malzemeler için düzlem gerilme şartları olduğundan ve plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasından dolayı; çatlak ilerleme gecikmesinin daha etkin bir şekilde gerçekleşmesi beklenir. Eğer bir alaşımın sünekliği ısıtma işlemi ile kontrol edilirse (arttırılır, yüksek kalması sağlanırsa) düşük akma dayanımı daha uzun süreli bir çatlak ilerleme erteleme üretecektir. Çatlak kapanma miktarı ölçüldüğünde bir aşırı

yüklemeden sonra çatlak kapanma seviyesinde, kalın numuneler ince olanlara göre daha az değişim göstermektedir.

Çeki aşırı yüklemesini takiben, düzlem gerilme durumunda yüksek seviyede çatlak kapanması olduğu rapor edilmiştir (Fleck 1988). Şekil 2.14’de bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilmiş olan (a) AY öncesi, (b) AY sonrasında oluşan plastik bölgelere ait yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.14. Aşırı yükleme sonrası oluşan plastik bölge yüzey optik görüntüsü

*(a) Aşırı yükleme öncesi temel seviye dinamik yükleme plastik bölge yüzey görüntüsü, (b) Aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölge yüzey görüntüsü

Çatlak gecikmesini etkileyen, çatlak kapanmasında plastisitenin rolünü destekleyen çok sayıda deneysel delil (Elber 1970; Himmelein and Hillberry 1976; Shin and Fleck 1987; Pereira *et al.* 2007) olmasına rağmen birçok alaşım için çatlak gecikmesinin ertelenmesi üzerinde yapılan gözlemler bu mekanizmayla uyumsuzluk göstermektedir.

i) Plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanması efektif ΔK 'da, genellikle düzlem gerilme halinde, düzlem şekil değiştirmeden daha büyük bir azalmaya sebep olur. Buna rağmen daha yüksek seviyedeki aşırı yükleme sonrasında bazı alaşımlar için çatlak gecikmesinin, düzlem şekil değiştirmede düzlem gerilmeden daha fazla olduğu ifade edilmiştir (Suresh 1983).

ii) Pek çok alüminyum alaşımında çatlak gelişiminde mikro yapının etkileri ve aşırı yükleme sonrasındaki kırılma modundaki değişimler gibi aşırı yükleme sonrası

gecikmenin çoğu karakteristik durumları, plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanma kavramıyla bağdaşmaz (Knott and Pickard 1977; Bucci *et al.* 1979; Suresh 1983).

2.1.3.b. Çatlak ucu körleşmesi

Çatlak ucu körleşmesi bir aşırı yükleme neticesinde çatlak ucunun keskinliğini kaybedip körleşmesi olayıdır. Çatlak körleşip ilerlemesi yavaşladıktan sonra çatlağın tekrar keskinleşmesi için birkaç çevrime ihtiyaç vardır. (Christensen 1959; Rice 1967) aşırı yükleme çevrimiyle oluşan çatlak ucundaki körleşmenin, aşırı yükleme sonrası çatlak gelişiminde gecikmeye sebep olabileceği ifade edilmiştir. Çatlak gecikmesinin altında yatan mekanizma, körleşmiş olan çatlak ucunda, orijinal keskin çatlak ucunda oluşan gerilme yoğunlaşmasından daha düşük bir gerilme yoğunlaşması oluşmasıdır. Yorulma çatlağı aşırı yükleme körleşmesi, polikarbonat gibi polimerik malzemelerde (Banasiak *et al.* 1977) ve çeşitli metal alaşımlarında da (Lankford and Davidson 1980) gözlenmiştir. Çatlak ucu körleşmesi, aşırı yükleme sonrası çatlak gelişim oranını etkilemesine ve ard arda gelen yüklerin birbirini etkilemesini açıklamada bir temel teşkil etmesine rağmen; Çatlak ilerlemesi gecikmesinin aşırı yük uygulandıktan sonra çatlak ilerlemesinin ilk önce hızlanıp sonra yavaşlaması durumunu açıklayamaz. Aşırı yükleme sonrasındaki çatlak gelişimindeki azalmaya deneysel olarak makul bir sayısal tanımlama getiremez.

2.1.3.c. Bası artık gerilmeleri

Periyodik çeki yükü ile yüklenmiş yorulma çatlağının ucundaki tersine plastik akış bası artık gerilmeleri üretir. Bir çeki aşırı yüklemesi uygulandığında, bası artık gerilme bölgesinin boyutu büyür. Çeliklerde (Allison 1979; Taira and Tanaka 1979) yorulma çatlak ucu bölgesindeki gerilmelerin x-ray ile ölçümleri, çeki aşırı yüklemesini takiben bası artık gerilme bölgesinin büyüdüğünü göstermiştir. Willenborg *et al.* (1971) ve Wheeler (1972) aşırı yükleme sonrası oluşan bu bası artık gerilmelerinin çatlak gelişimini geciktirebileceğini bildirmişlerdir.

Oluşan artık gerilmelerin şiddeti akma gerilmesine yakındır. Çatlak ucundaki artık gerilmelerin etkisinin, aşırı yükleme genliğinin yükselmesine paralel olarak yükseldiği görülmüştür. Aşırı yüklemenin artık gerilme üretmesi sonucu efektif gerilme yoğunluk faktör farkı $\Delta K_{eff} (K_{max} - K_{open})$ azalır ve aşırı yükleme sonrasında yorulma çatlak gelişiminde gecikme olur. Robin *el. al.* (1988) yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda aşırı yükleme sonrasında oluşan çatlak gecikmesine en fazla katkıyı bası artık gerilmelerinin sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca pek çok araştırmacı çatlak ucundaki artık gerilmelerin, çatlak gecikmesine sebep olduğunu ifade etmişlerdir. (Ling ve J. Schijve 1992) aşırı yüklemekten dolayı oluşan çatlak gecikmesinde artık gerilmelerin önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir. Wheeler (1972) artık gerilmeler kavramını kullanarak ΔK ve K_{max} ile aşırı yüklemenin etkisini sayısal olarak ifade etmiştir. Yaygın olarak kullanılan ömür tahmin modellerinin çoğu, üstü örtülü bir şekilde bası artık gerilmelerinden dolayı gecikmenin oluşması kavramını kullanmaktadırlar.

Ancak Fleck (1988) iki sebepten dolayı, artık gerilmelerin çatlak gecikmesine sebep olduğu görüşüne karşı çıkmıştır. Bunlardan birincisi aşırı yükleme sonrasında en büyük artık gerilmeler oluşmasına rağmen çatlak gecikmesi aşırı yükleme uygulandıktan bir süre sonra ortaya çıkmaktadır (ertelenmiş gecikme). İkincisi çatlak gelişiminde, aşırı yüklemenin sebep olduğu plastik bölgenin dışına kadar, bası artık gerilme bölgesinin dışına çıktıktan sonra dahi, çatlak gecikmesi devam edebilmektedir.

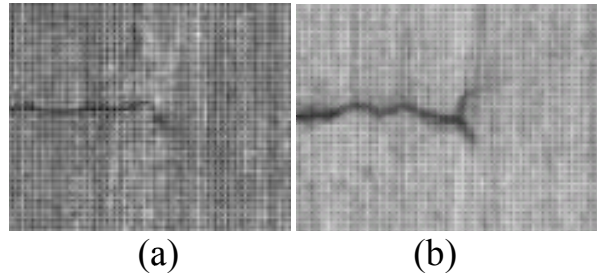
Sonuç olarak çatlak gecikmesi olayında yalnızca bası artık gerilmelerini temel almakla bazı önemli zorluklarla karşılaşılır.

i – En büyük bası artık gerilmeleri tam çatlak ucu civarında mevcuttur. Deneysel gözlemlerdeki çatlağın önce hızlanıp sonra gecikmesi olayına zıt olarak çatlağın derhal gecikeceği yada tamamen duracağı tahmin edilir. Oysa çatlak ilerlemesi ilk anda ani hızlanmakta daha sonra yavaşlamaktadır.

ii – Deneyler göstermiştir ki (Suresh 1983) aşırı yükleme sonrasında gecikme, ancak çatlak artık gerilme bölgesinin içinden geçtiğinde oluşmaktadır.

2.1.3.d. Çatlak ucu sapması ve dallanması

Değişken genlikli yüklemelerde çatlak ucunda iki çeşit düzensizlikten söz edilebilir. Bunlar çatlak yönelim uyumsuzluğu ile çatlak ucunun sapması ve dallanmasıdır. Çatlak ucu yöneliminin uyumsuzluğu çatlak ilerleme gecikmesine ya da hızlanmasına önemli katkıda bulunabilir. Çatlak ucunun sapması, çatlağı ilerleten kuvveti düşürmektedir, dolayısıyla çatlağın ilerlemesini geciktirmektedir. Bu durum yönlenmiş yapıya sahip malzemeler için bilhassa önemlidir. Şekil 2.15’de yaptığımız deneylerden elde ettiğimiz aşırı yükleme sonrasında yorulma çatlağının (a) sapması ve (b) dallanmasına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 2.15. Aşırı yükleme neticesinde çatlak ucunun (a) sapması, (b) dallanması yüzey optik görüntüsü

2.1.3.e. Çatlak yüzeylerindeki pürüzlülük

Çatlak yüzeylerindeki pürüzlülüğün sebep olduğu çatlak kapanması ertelenmiş çatlak gecikmesine sebep olur. Ancak plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasıyla karşılaştırıldığında etkisi daha azdır. Bu mekanizma aşırı yüklemekten dolayı oluşan diğer gecikme mekanizmalarının etkisine ancak katkıda bulunabilen bir mekanizmadır. (Von Euw *et al.* 1972) aşırı yüklemeyi takip eden çatlak kapanması seviyesindeki ve çatlak yüzeyleri arasında oluşan sürtünme seviyesindeki yükselmenin, yorulma çizgileri

ve diğer bütün yüzey şekillerini silip yok edeceğini bildirmişlerdir. Deneysel olarak yüzey çizgilerinin aşırı yükleme sonrasında aşınarak yok olduğu gözlemlenmiştir.

2.2. Kırılma Mekanîği

Kırılma olayı, malzemenin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Çalışan makine parçalarının kırılması, mühendislik yapılarının kırılması ve parçalanması olayları istenmeyen durumlardır. İstenmeyen kırılma olaylarının önceden tahmin edilmesi ve önlenmesi kırılma mekaniğinin konusunu oluşturur.

Makine elemanları işletme şartlarında, çizikler, inklüzyonlar ve çatlaklar gibi hatalar içerebilir. Kırılma mekaniği, işletme yükleri altında çalışan hatalı ve çatlak malzemelerdeki mekanik davranışı inceler. Kırılma mekaniği sayesinde çatlak veya boşluk içerebilen mühendislik yapılarının emniyetli bir şekilde çalışma limitleri tespit edilir.

2.2.1. Lineer elastik çatlak ucu gerilme alanı

Teorik olarak gevrek malzemelerde plastik deformasyon oluşmaz. Ancak gerçek malzemede çatlak ucunda oluşan büyük gerilmeler çatlak ucunda plastik deformasyon oluşturur. Oluşan plastik bölgenin büyüklüğü malzemeye göre değişir. Çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin sınırlı kalması durumunda lineer elastik kırılma ifadeleri geçerli olur.

Kırılma Tokluğu

Lineer kırılma mekaniğinde bir malzemenin kırılma tokluğu, bünyesinde çatlak içeren bir malzemenin kırılmaya karşı koyma kabiliyetinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Kırılma tokluğu bir malzeme özelliğidir. Ve yükleme modu, kimyasal çevre şartları,

malzeme mikro yapısı, test sıcaklığı, şekil değiştirme oranı ve gerilme durumunun (düzlem gerilme, düzlem şekil değiştirme) bir fonksiyonudur (Schijve 2009).

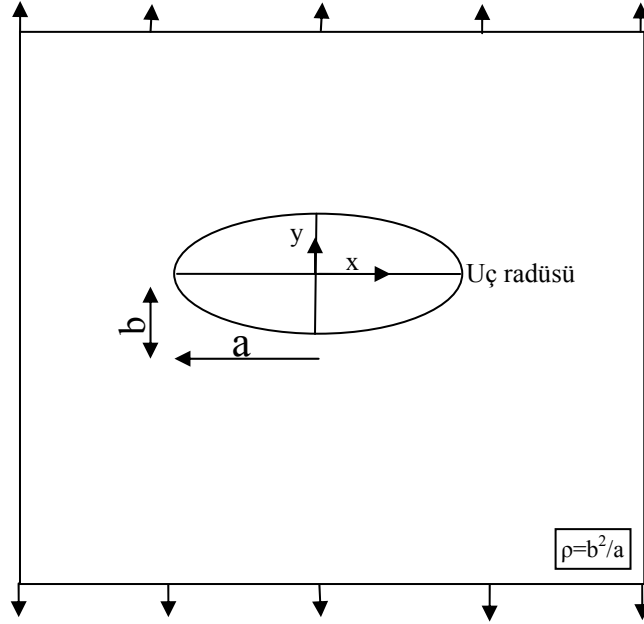
Çatlağın gerilme yoğunluk faktörleri

Malzeme üzerindeki bir çentik yada geometrik değişimin olduğu yerde çentik civarında gerilme dağılımının şiddetini ifade etmede gerilme yoğunlaşma (konsantrasyon) faktörü yada çentik faktörü olarak adlandırılan K_t önemli bir parametredir. Yorulma çatlak başlangıç periyodunun ardından oluşan çatlak gelişme periyodunda, K_t artık çatlak ucu civarındaki gerilmenin şiddetini ifade etmede anlamlı değildir. Çünkü çatlak uç radüsü sıfır olan çentik olarak düşünülürse K_t 'nin değeri sonsuz olacaktır. Dolayısıyla çatlak ucu civarında gerilme dağılımının şiddetini tanımlamada yeni bir kavram olarak, gerilme yoğunluk faktörü K tanımlanmıştır. Bu kavram Irwin tarafından ortaya atılmıştır. Gerilme yoğunluk faktörü, mevcut yorulma çatlak gelişimi verilerini ve lineer elastik kırılma mekaniğini referans alarak, yorulma çatlak gelişimini tahmin etmede kullanılır.

Bir çentik ile çatlağı ayırt etmek için, eliptik bir delik (yarıçapları a ve b , uç radüsü ρ) üzerinde çalışma yapılabilir. Gerilme konsantrasyon faktörü;

$$K_t = 1 + \frac{2a}{b} = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.3)$$

bağıntısıyla tanımlanır (Schijve 2009).



Şekil 2.16. Üzerinde eliptik bir delik bulunan, yük altındaki malzemenin şematik gösterimi (Schijve 2009)

Şekil 2.16’da ortasında eliptik delik bulunan levha karşılıklı iki tarafından çekilmesi durumu şematik olarak gösterilmiştir. Burada uç eğrilik yarıçapı $\rho = b^2/a$ ifadesinden b boyutunun sıfıra yakınsamasıyla eliptik delik çatlakla dönüşür. Eğer $b=0$ olursa çatlak ucu eğrilik yarıçapı sıfır olur. Bu değer K_t bağıntısında yerine konulursa K_t sonsuz olur. Dolayısıyla K_t bağıntısı kullanılamaz. Çatlak ucundaki gerilme dağılımını ifade etmek için gerilme yoğunluk (intensity) faktörü K kullanılır.

Gerilme yoğunluk faktöründen ilk defa 1920 de Griffith bahsetmiştir. Cam malzeme üzerinde çalışmalar yaparak, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi ifade eden bir denklem kurmuştur.

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{E \cdot G_C}{\pi \cdot a}\right)} \quad (2.4)$$

Düzlem gerilme halinde πa ifadesinin yerini $(1-\nu^2) \pi a$ ifadesi almaktadır.

Burada σ_f kırılma anındaki gerilme, G_C kırılma anında malzemede birim kırılma yüzeyi oluşması için gerekli enerjidir. $G_C=2\gamma$ şeklinde ifade edilir ve kırılma için gerekli iş

miktarı da denilebilir. 2γ ifadesindeki 2 rakamı malzeme kırılırken iki adet yüzey oluşmasındandır. Çıkarılan bu denklem enerji dengesi esasına dayanmaktadır. Daha sonra 1956 da Irwin çatlak ucundaki gerilme dengesinden aşağıdaki ifadeyi çıkarmıştır.

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{E.Gc} \quad (2.5)$$

Buradan da gerilme yoğunluk faktörü $K^2=E G_c$ eşitliğinden gerilme yoğunluk faktörü $K= \sigma\sqrt{\pi a}$ şeklini almıştır. Bu değer numune geometrisinden kaynaklanan sapmaları düzeltmek amacıyla boyutsuz bir β şekil faktörüyle çarpılarak

$$K = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.} \quad (2.6)$$

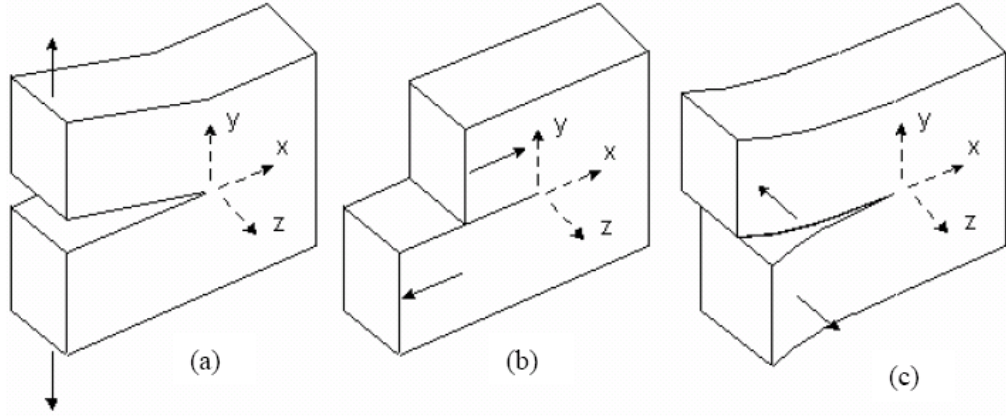
σ uygulanan gerilme, a çatlak uzunluğudur. w numune anma ölçüsü olmak üzere β aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\beta\left(\frac{a}{w}\right) = 1 + 0.256\left(\frac{a}{w}\right) - 1.152\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 12.200\left(\frac{a}{w}\right)^3 \quad (2.7)$$

(Sanford 2003).

Burada önemli olan çatlak ucundaki gerilme dağılımının, gerilme yoğunluk faktörü K 'nın bir fonksiyonu olarak tanımlanabilmesidir.

Kırılma üç temel yükleme modu düşünülerek ele alınmaktadır (Şekil 2.17).



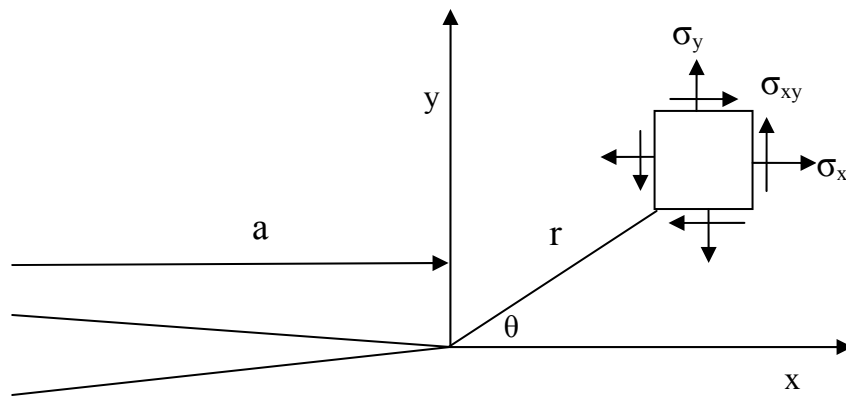
Şekil 2.17. Üç temel yükleme modu şematik gösterimi

*(a) Çekilerek açılma modu (Mod I) (b) Düzlem kayma modu (Mod II) (c) kesme modu (Mod III)

Mod I Çatlak yüzeyi normaline doğrultusunda çatlak yüzeyini ayıran çeki açılma yükü modudur.

Mod II Çatlak ön yüzü normaline doğrultusunda karşılıklı çatlak yüzeyleri kesilen düzlem içine kayma yükü modudur.

Mod III Çatlak önüne paralel kesilen çatlak yüzeylerinin düzleme karşı kesme yada yırtılma yükü modudur. Bu çalışma yalnızca mod I de çalışılmıştır. Şekil 2.18’de çatlak ucunda oluşan gerilmeler verilmiştir.



Şekil 2.18. Çatlak ucu bölgesindeki gerilmeler ve koordinat sistemi

$$\sigma_{YY} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$\sigma_{XX} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{XY} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.10)$$

K_I 'nin verilen değeri için çatlak ucu civarındaki gerilme oranı yalnızca θ ve r ye bağlı olduğu yukarıdaki eşitlikten çıkarılacak önemli sonuçtur. Bu eşitlik r 'nin küçük değerleri için doğrudur (Schjive 2009).

Yukarıdaki σ_{YY} bağıntısında $\theta=0$ değeri için r değeri nin Plastik bölge sınırındaki değeri olarak çekilirse monotonik yükleme için

$$r_P = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (\text{Düzlem Gerilme Hali}) \quad (2.11)$$

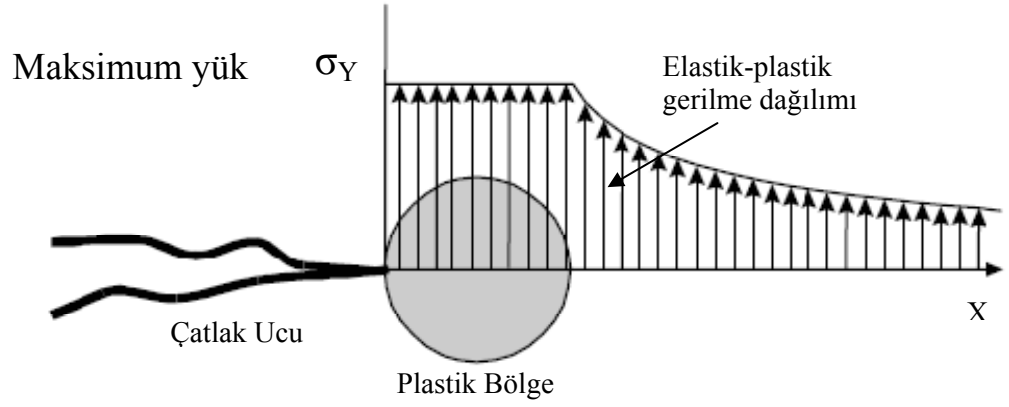
Ve Düzlem Şekil Değiştirme hali için Von Mises gibi bir akma kriterine uyarlanmış hali literatürden alınarak

$$r_P = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (\text{Düzlem Şekil Değiştirme Hali}) \quad (2.12)$$

şeklinde elde edilir. Dinamik (çevrimsel) yükleme için bu değerlerin dörtte biri alınmalıdır (Schjive 2009).

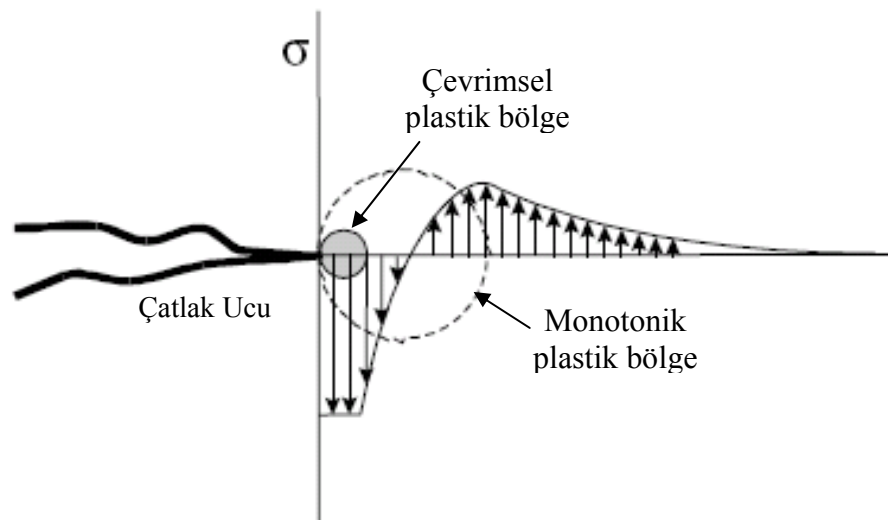
Şekil 2.19'da çatlak ucunda oluşan elastik-plastik gerilme dağılımı şematik olarak verilmiştir. R_P kadar mesafede plastik bölge sınırındadır. Burada plastik bölgedeki gerilimin

dengesi açısından dıştaki elastik bölgede eşit miktarda zıt yönlü elastik gerilme söz konusudur.



Şekil 2.19. Çatlak ucunda oluşan plastik bölge civarındaki gerilme dağılımının şematik gösterimi

Şekil 2.20’de çevrimsel yükleme durumunda çatlak ucunda oluşan plastik bölge ve dinamik yükleme durumunda çatlak civarında oluşan gerilme durumu verilmiştir. Dinamik yükleme durumunda plastik bölge büyüklüğü monotonik yüklemedekinin dörtte biri kadardır.



Şekil 2.20. Dinamik ve monotonik yükleme sonucu çatlak ucunda oluşan plastik bölge ve dinamik yükleme durumunda gerilme dağılımı şematik gösterimi

Çok sayıdaki farklı çatlak geometrileri için gerilme yoğunluk faktörü değeri bazı malzeme kitaplarından elde edilebilir yada deneysel olarak tespit edilebilir (ASTM E813, ASTM E399, ASTM E1290, ASTM E 1820).

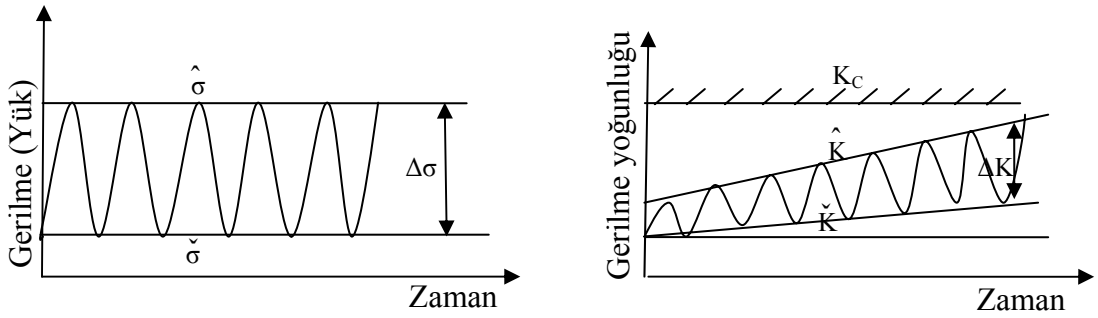
Çatlak ucu bölgesi, çatlak ucu civarında akma dayanımı aşıldığından, malzemenin akmasıyla oluşan plastik bölge dış taraftaki elastik bölge tarafından zorlanır. Bu bölgede lineer elastik davranış teorisinden dolayı lineer elastik çözüm geçerliliğini kaybeder.

Teorik olarak bunun anlamı, malzeme çatlak ucunda sonsuz gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu mümkün değildir. Burada olan olay malzemenin çatlak ucu civarında plastik olarak deforme edilmesidir. Sonuç olarak gerilmeler malzemenin akma dayanımı seviyesine düşürülür.

Gerilme yoğunluk faktörü küçük ilerlemeli akma şartları altında çatlak yayılmasını karakterize edebilir.

Dinamik yük altında malzeme üzerinde çatlak ilerlerken çatlağın boyu arttıkça

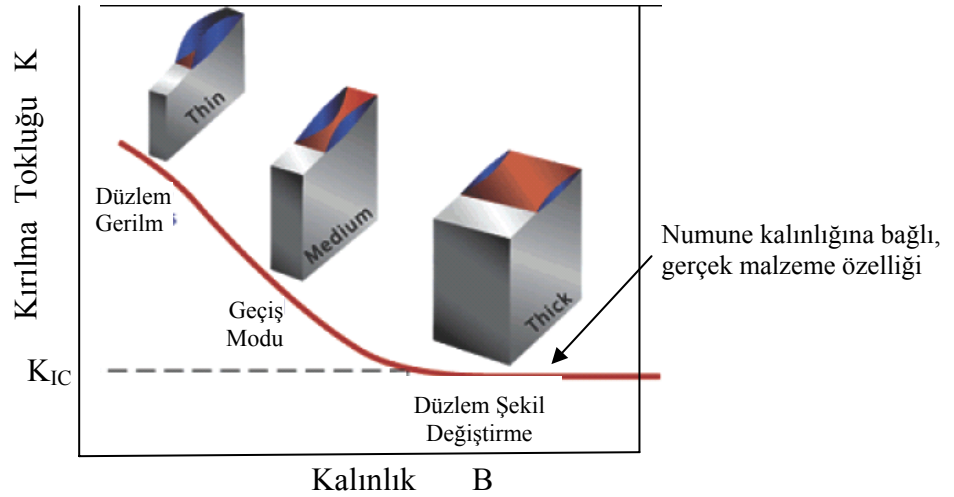
$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}$ denkleminde a büyüdükçe K değerinin de büyüyeceği açıkça görülmektedir (Şekil 2.21). Bu durum K değeri kritik bir değere gelinceye, malzeme dayanım sınırını aşınca, malzeme kırılınca kadar devam eder. İşte bu kırılma anında K 'nın alabileceği maksimum değer mod I yükleme durumu için Kırılma Tokluğu (K_{IC}) olarak tanımlanır.



Şekil 2.21. Çatlak boyunun büyümesi ile birlikte gerilme yoğunluğunun da artması. K_C kırılma anında ulaşılan en üst değerdir (DANotes 2009)

*Bütün K parametreleri çatlak boyutunun artmasıyla paralel olarak artmaktadır.

Kırılma tokluğu (Fracture Toughness) kritik bir malzeme kalınlığından sonra sabit bir değer alır (Şekil 2.22). Bu kritik kalınlıktan daha kalın olan malzeme için düzlem şekil değiştirme kırılma tokluğundan söz edilebilir (DANotes 2009).



Şekil 2.22. Gerilme yoğunluk faktörü, kalınlık ilişkisi (DANotes 2009)

Gerilme yoğunluk faktör farkı ΔK nın belirlenmesi: ASTM E647 test standardına göre CT numunesi için ΔK nın hesaplanması aşağıdaki gibidir.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (3.3)$$

Burada $\alpha = \frac{a}{w}$ ifadesi $\frac{a}{w} \geq 0.2$ iken geçerlidir. (ASTM E647 2008)

Yukarıdaki ifadeler malzemenin lineer-elastik, izotropik ve homojen olduğu durum için geçerlidir. Yukarıdaki operasyonel tanımlama ΔK 'nın değerini hesaplamada çatlak kapanması ya da artık gerilmeleri dikkate almaz. Kuvvet-çatlak ağzı açılması grafiği çatlak kapanması/kalıcı gerilmelerin tespiti için faydalı olur.

2.3. Değişken Genlikli Yükleme Altında Çatlak Gelişimi Tahmin Modelleri

Değişken genlikli yükleme altındaki yorulma davranışını tahmin etmek için çok sayıda model geliştirilmiştir. Bu modeller; değişken genlikli yükleme altında çatlak gelişiminin yavaşlamasını ya da hızlanmasını tahmin etmek üzere iki temel kategoriye ayrılabilir. Yorulma modellerinin büyük çoğunluğu, çatlak gecikmesinin baskın olmasından ve mühendislik açısından faydalı olmasından dolayı çatlak gecikmesiyle ilgilenmektedirler. Çatlak gecikmesi modelleri; çatlak kapanması modelleri ve plastik bölge modelleri olmak üzere kabaca ikiye ayrılabilir. Çizelge 2.1'de plastik bölge ve çatlak kapanması kavramlarını temel alan bazı modeller verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yorulma çatlak gelişim modelleri

Plastik Bölge Kavramı	Çatlak Kapanması Kavramı
Wheeler	Elber (kavram)
Willenborg, Engle, Wood	Bell (genelleştirilmiş kapanma)
Forman	Newman (sonlu elemanlar)
Porter	Dill ve Safe (kontak gerilmesi)
Gray (genelleştirilmiş wheeler)	Kanninen, Feddersen ve Atkinson
Gallagher ve Hughes	(süper dislokasyon)
(genelleştirilmiş willenborg)	Elber (model)
Johnson	Paris
Chang ve diğerleri	Budiansky ve Hutchinson
	De Koning

Bir aşırı yüklemenin ardından çatlak kapanması düzeyi değişir ve bu durum çatlak ucundaki artık gerilme bölgesini etkiler. Fakat artık gerilme bölgesi, oluşan daha büyük boyutlu aşırı yükleme plastik bölgesinin etkisiyle değişime uğramaktadır. Olaya böyle bakıldığında kapanma modelleri problemin bütün boyutlarını kapsamamaktadır. Aşırı yüklemenin çatlak kapanmasını etkilediğine şüphe yoktur. Çatlak kapanmasıyla çatlak gecikmesi arasında karşılıklı bir ilişki vardır. Hem çatlak kapanmasındaki değişim hem de çatlak gecikmesi durumları aşırı yükleme sonrasında oluşmaktadır. Çatlak kapanmasındaki değişimin kesinlikle çatlak gecikmesine yol açtığı söylenemez. Çatlak kapanma değişimi ve çatlak gecikmesi durumlarının her biri diğerini tanımlamada kullanılamaz, bu iki duruma da aşırı yüklemenin oluşturduğu yerel değişimler sebep olmaktadır. İyi bir çatlak gelişim modelinde toplam çatlak gecikmesi üzerinde aşırı yüklemenin etkisi ele alınırken çatlak ağzı, çatlak ucundaki gerilme bölgesi ve kısmen de plastik şekil değiştirme bölgesi dikkate alınmalıdır. Bazı modellerde dış yükün oluşturduğu gerilme bölgesinde oluşan artık gerilmeler doğrudan üst üste toplanmıştır. Pek çok modelde ise problemin bütün etkilerini kapsamamaktadır. Aşağıda bazı önemli modellerin üzerinde durulmuş, aşırı yükleme sonrası çatlak ilerlemesinde gecikmeyi veya hızlanmayı izah etmede, güçlü oldukları yada sınırlı kaldıkları hususlar belirtilmiştir.

2.3.1. Wheeler modeli

Wheeler (1972) çatlak ilerleme gecikmesine, çatlak ucunda aşırı yüklemekten dolayı oluşan büyük plastik bölgenin sebep olması olgusu üzerine bir model geliştirmiştir. Şekil 2.23’de bu modelde kullanılan parametreler gösterilmiştir. “O” bölgesi sabit genlikli düşük yük seviyesinde ilerleyen çatlağın ucundaki plastik bölgedir. O’ ise aşırı yükleme neticesinde oluşan daha büyük boyutlu plastik bölgedir. Aşırı yükleme uygulamasından sonra tekrar eski düşük yük seviyesine döndüğünde çatlak ilk önce O’ plastik bölgesini geçmek zorundadır. Wheeler da/dN ile çarpan durumunda bir C_p faktörü tanımlamıştır. C_p Plastik bölge boyutuna göre değer almaktadır.

$$\frac{da}{dN} = c.(\Delta K)^m \quad \frac{da}{dN_i} = (C_p)_i \left(\frac{da}{dN} \right)_{CAi} \quad (2.13)$$

$\left(\frac{da}{dN} \right)_{CAi}$: Sabit yüklemdeki ilerleme

$$\frac{da}{dN_i} = (C_p)_i [c.(\Delta K_i)^m] \quad (C_p)_i = \left(\frac{r_{yi}}{a_p - a_i} \right)^p \quad (2.14)$$

$(C_p)_i$: Gecikme parametresi

$(C_p)_i$: Aşırı yüklemekten dolayı plastik bölgedeki değişim oranının bir fonksiyonudur.

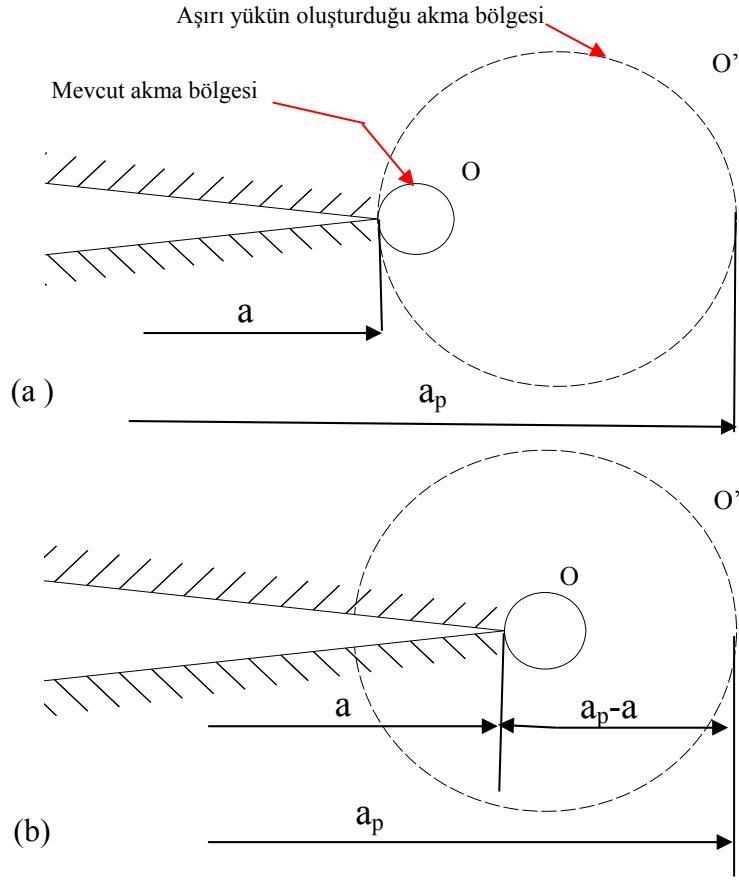
(r_{yi}) : i`inci yükleme devrinden dolayı oluşan plastik bölge büyüklüğü

a_p : Aşırı yükleme olduktan sonra toplam çatlak büyüklüğü

a_i : i`inci yüklemdeki çatlak büyüklüğü

p : cebirsel olarak tesbit edilmiş malzemeye bağlı şekil parametresidir.

$$(da/dN)_{gecikme} = C_p * da/dN \quad (2.15)$$



Şekil 2.23. Wheeler çatlak ileleme gecikmesi modelinde çatlak ucu akma bölgelerinin ilişkisi (Manson and Halford 2006)

*a) aşırı yükleme pozisyonunda başlangıç şartları, b) aşırı yükleme plastik bölgesine doğru çatlağın gelişimi

Çatlak gecikmesi aşırı yükleme ile oluşturulan plastik bölgenin içindeki normal plastik bölgeye kadar devam eder. Normal plastik bölgenin sınırı aşırı yüklemekten dolayı oluşan plastik bölgenin sınırına değmez çatlak gecikmesi sona erer.

$$(C_p)_i = 1$$

$$a_i + r_{yi} \geq a_p$$

$$\frac{r_{yi}}{a_p - a_i} \geq 1$$

(2.16)

Max. gecikme $(C_p)_i$ sifira yaklaştıkça artar.

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r \left(\frac{da}{dN} \right)_i \quad (2.17)$$

a_r : r çevrim sonra çatlak uzunluğu,

a_0 : Başlangıç çatlak boyu, i çevrim sonra çatlak büyüklüğü

$$\sum_{i=1}^r \left(\frac{da}{dN} \right)_i : \quad (2.18)$$

Bu modelin karmaşık yükleme durumuna uygulanması oldukça uygundur ve başarıyla uygulanmaktadır. Buna rağmen bu metodun iki büyük olumsuz yönü vardır. Bu yöntemde hesaplama yapabilmek için şekil faktörü “ C_p ” sayısına ihtiyaç vardır. Olumsuz yönlerinden birincisi şekil faktörü “ C_p ” ve “p” nin deneysel olarak tanımlanması gerekir. “ C_p ” faktörünün belirlenmesi bazı durumlarda mümkündür. Ancak bir tasarımcı için malzeme çalışırken dikkatini yükleme şartlarına çevirmesi pratik bir yaklaşım olmaz.

İkincisi bu model aşırı yüklemenin hemen sonrasında çatlak gecikmesinin maksimum değerde olduğunu ve çatlağın aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölgeyi geçişi esnasında gecikmenin devam edeceğini ve plastik bölge sonunda sifira düşeceğini öngörür. Hâlbuki, çatlak ilerlemesi derhal yavaşlamayıp önce hızlanıp sonra yavaşlamaktadır.

2.3.2. Willenborg modeli

Willenborg *et al.* (1971)’da aşırı yüklemenin, temel seviye yüklemeye göre daha büyük plastik bölge üretmesinden dolayı çatlak gecikmesinin oluştuğu hipotezini kullanmıştır.

Bir aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölgenin etkisinin ortadan kalkması için gerek duyulan gerilme yoğunluk faktörünün bir fonksiyonu olarak, çatlak ilerleme gecikmesini tanımlamıştır. Gecikmenin büyüklüğü Wheeler modeline benzer şekilde ele alınmıştır. Ancak Wheeler modeline karşıt olarak Newman'ın gerilme zorlama faktörüne benzer olarak, plastik bölgede oluşan gerilme değişimlerini kullanmıştır. Willenborg modeli eğri uygunluk parametresi m 'i kullanmadan Wheeler modeli üzerine kurulmuştur.

Bu modele göre geçici olarak kullanılmak üzere bir K_{red} değeri hesaplanmaktadır. Willenborg, aşırı yüklemenin sebep olduğu, kalıcı bası artık gerilmesinin çatlak ucunda efektif gerilmede azalmaya sebep olduğunu kabul etmektedir. Efektif gerilme yoğunluk faktörü ve efektif yük oranı, Forman eşitliğinde i sayıdaki çevrim için çatlak gelişimini tanımlamak üzere geçici olarak kullanmıştır.

Bu model Wheeler modelinin (Wheeler 1972) deneysel olarak tanımlanması gereken şekil faktörü katsayısına ihtiyaç duymadığından katsayı dezavantajı ortadan kalkar. Ancak bir olumsuz yönü, analiz için karmaşık bilgisayar programı gerektirmesidir. Ayrıca belirli şablonlara göre yaptığı gecikme tahminleri, yapılmış tipik deneysel çalışmalarla bazı tutarsızlıklar göstermektedir.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K_{eff})^n}{(1 - R_{eff})K_c - \Delta K_{eff}} \quad (2.19)$$

$$(K_{max})_{eff} = K_{max} - K_{red} \quad (2.20)$$

$$K_{red} = \left[(K_{OL})_{max} \left[1 - \left(\frac{a_n - a_{OL}}{\gamma_{POL}} \right) \right]^{1/2} - K_{max} \right] \quad (2.21)$$

$$R_{eff} = \frac{(K_{min})_{eff}}{(K_{max})_{eff}} \quad (2.22)$$

$(K_{AY})_{max}$ = aşırı yükleme durumunda maksimum gerilme yoğunluk faktörü,

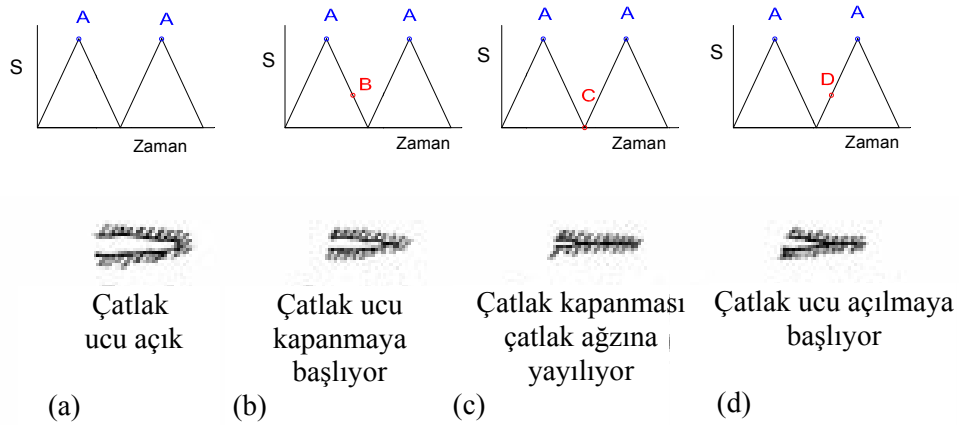
a_n = mevcut kırılma genişliği,

a_{AY} = aşırı yükleme kırılma genişliği,

γ_{POL} = aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölgedir.

2.3.3. Elber çatlak kapanma modeli

Elber (1970) çatlak kapanma modelini tanımlamıştır. Bu model düzensiz yükleme durumlarında çatlak gelişimini anlamada çok faydalı olmuştur. Elber'in gözlemleri aşağıdaki Şekil 2.24 ile ifade edilebilir. Şekilde çeki yüklemesi esnasında sıfırdan maksimum yükleme yoğunluğuna çatlakın açılması ve kapanması durumlarını görülmektedir. Normal kavram olarak yük yok iken çatlak tamamen kapalı olacak, maksimum yükleme yapıldığında (Şekil 2.24 (a)) tamamen açılacak ve yük kaldırıldığında tekrar tamamen kapanacaktır. Fakat, maksimum yüklemeye oluşan plastik akıştan dolayı, yük tamamen kaldırılmadan önce çatlak ucu kapanır (şekil 2.24 (b)).



Şekil 2.24. Çatlak kapanması modeli (Elber 1970)

Yük tamamen kaldırıldığı durumda çatlak tamamen kapanır (Şekil 2.24 (c)). Benzer şekilde yeniden yükleme yapılması durumunda gerilme yoğunluk faktör farkı çatlak ucunda relatif olarak az etkiye sahiptir ve ancak çatlak yüzeylerinde etkili olup yüzeylerde yalnızca yüksüz durumda etkisizdir. Yüklemeden sonra artakalan yükten çatlak ucundaki olaylar etkilenir. Çatlak ucu, bir miktar yükleme yapıldıktan sonra açılmaya başlar (Şekil 2.24 (d)). Çatlak gelişimini kontrol eden bölgenin etkisi $AC = CA$ dan ziyade $AB = DA$ şeklinde kendini gösterir Şekil (2.24). Elber aşağıdaki eşitliği ileri sürülmüştür.

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^m \quad (2.23)$$

$$\frac{d_a}{dN} = C(U\Delta K)^m \quad (2.24)$$

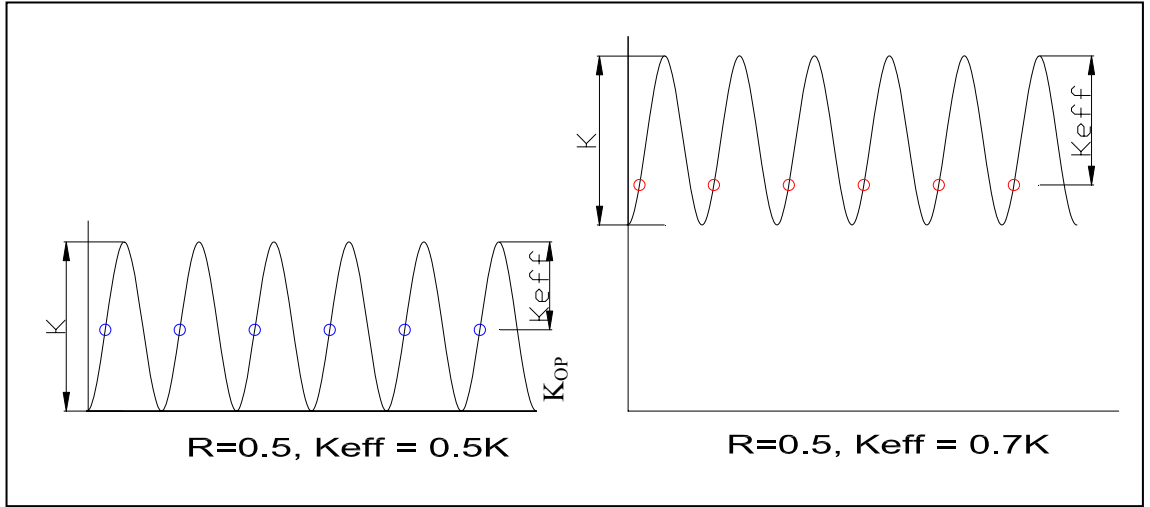
ΔK nın yerini $U (\Delta K)$ alabilir

$$U = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (2.25)$$

Burada,

K_{op} = çatlak tam açılmaya başladığı andaki gerilme yoğunluk faktörüdür.

ΔK_{eff} efektif gerilme yoğunluk faktörüdür (maksimum değerde çatlak açıldığı zaman). Elber, gerilme oranıyla ΔK_{eff} 'in nasıl değiştiğini tanımlamak için 2023 T3 alüminyumu test etmiştir. Elde ettiği sonuçlar Şekil 2.25'de şematik olarak gösterilmiştir. Burada $R=0$ için efektif gerilme yoğunluk faktörü farkı toplam gerilme yoğunluk faktör farkının %50 sini, $R=0,5$ iken %70'ini teşkil etmektedir. Geriye kalan %50 ve %30 luk kısım çatlak ucu açılma anına isabet eden açılma anındaki gerilme yoğunluk faktörü K_{OP} dur.



Şekil 2.25. Elber'in kapanma modelinin şematik gösterimi

2.3.4. Barsom modeli

Barsom (1976) RMS (Root Mean Square) yaklaşımını kullanarak değişken genlikli yükler altında köprü yapımında kullanılan çeşitli çelikler üzerinde çatlak gelişimini araştırmıştır. Bu model yüklerin karşılıklı etkileşimini dikkate almaya ihtiyaç duymamaktadır.

$$\frac{d_a}{d_N} = C(\Delta K_{rms})^m \quad (2.26)$$

ΔK_{rms} = (root mean square) kök temel kare gerilme yoğunluk faktör farkı

2.3.5. Gallagher ve Hughes modeli

Bu metot geliştirilmiş Willenborg modeli kullanmak amacıyla, çeki aşırı yüklemesinden dolayı oluşan çatlak gecikmesinde etkili olan efektif gerilme yoğunluk faktörünü temel alır. Bu metot da efektif gerilme yoğunluk faktörü ile görünür (mevcut) gerilme yoğunluk faktörü, aynı değere sahiptir. Bu metot çatlak gecikme bölgesinde,

yalnızca çatlak gelişim eşitliği gerilme oranı R 'yi içerdiğinden, çatlak gelişimini hesaplamada etkilidir. Aşırı yükleme oranı 2'den büyük olduğu durumda ϕ nin değeri hesaplanır. Bu model bası aşırı yüklemesinin etkisini hesaba katmaz.

$$\frac{d_a}{dN} = \frac{C(\Delta K_{eff})^m}{(1 - R_{eff})K_c - \Delta K_{eff}} \quad (2.27)$$

$$(K_{\max})_{eff} = K_{\max} - K_{red} \quad (2.28)$$

$$K_{red} = \phi \left[(K_{OL})_{\max} \left[1 - \left(\frac{a_n - a_{OL}}{\gamma_{POL}} \right) \right]^{1/2} - K_{\max} \right] \quad (2.29)$$

$(K_{OL})_{\max}$ = aşırı yüklemenin sebep olduğu maksimum gerilme yoğunluk faktörü

a_n = mevcut çatlak boyu

a_{OL} = aşırı yüklemenin oluşturduğu çatlak boyu

γ_{POL} = aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölge

$$\phi = \frac{1 - \frac{K_{\max,th}}{K_{\max}}}{\left(\frac{(K_{OL})_{\max}}{K_{\max}} - 1 \right)}, R_{eff} = \frac{(K_{\min})_{eff}}{(K_{\max})_{eff}} \text{ dir.} \quad (2.30)$$

2.3.6. Johnson modeli

Değişken genlikli yüklemelerde karşılıklı etkileşimi ihtiva eden, çatlak gelişimini modellemek için sistematik bir teknik sunmaktadır. Johnson (1981), çatlak gelişim gecikmesini, hızlanmasını ve bası aşırı yüklemesi altında gerilme oranını yükselterek

yada artırarak, çatlak gelişimi gecikmesini, hızlanmasını ve bası aşırı yüklemesinin etkisini sunan, çok parametrelili bir akma bölgesi modeli öne sürmüştür. Johnson, yeniden düzenlenmiş Forman tipinde çatlak gelişim eşitliği kullanmıştır. Yük etkileşimi çatlak üzerindeki plastik deformasyondan dolayı oluşan artık gerilme yoğunluğunun bir sonucudur. Johnson değişken genlikli yükleme altındaki ΔK 'nın eşik değerini hesaplamak için sabit genlikli yükleme verilerini kullanmıştır.

$$\frac{d_a}{d_N} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1 - R_{eff})^n K_c - \Delta K} \quad (2.31)$$

$R \geq 0$ olduğunda $n = 1$

$R < 0$ olduğunda $n = 2$

Değişken genlikli yükleme için eşik gerilme yoğunluk faktör farkı;

$$\Delta K_{th}^* = (1 - R_{eff}) \Delta K_{th}, \quad (2.32)$$

$$R_{eff} = \frac{K_{min} - K_{red}}{K_{max} - K_{red}} = \frac{K_{min\,eff}}{K_{max\,eff}}, \quad (2.33)$$

ve, elde edilebilir maksimum gerilme oranı;

$$R_{max} = \left[\frac{0.2 Z_{OL}}{t} \right] + 0.6 \quad (2.34)$$

Burada,

Z_{OL} = Uygulanan K_{max} değeri için plastik bölge boyutu

t = malzeme kalınlığıdır.

2.3.7. Hudson modeli

Hudson (1981), maksimum ve minimum gerilmenin ortalama gerilmeye uygunluğunu tanımlamak için her bir numunenin yükleme durumunu analiz etmiştir. Bu metot, değişken genlikli yükleme altında ortalama bir yorulma çatlak gelişim oranı verir. Eğer yük etkileşiminin etkisi düşük seviyede ise bu metot iyi sonuç vermektedir. Yük silsilesi içerisinde rölatif olarak düşük seviyedeki, yüksek yük çevrileri yorulma çatlak gelişiminde daha uzun “ertelemeye” sebep olur ki bu uygun bir yaklaşım değildir. Bu metot yük etkileşiminin etkisini dikkate almaz.

$$\frac{d_a}{d_N} = \frac{C\Delta K_{rms}^m}{(1 - R_{rms})K_c - \Delta K_{rms}}, \quad (2.35)$$

ve

$$\Delta K_{rms} = (K_{\max})_{rms} - (K_{\min})_{rms} \quad (2.36)$$

burada

$$R_{rms} = \frac{(\sigma_{\min})_{rms}}{(\sigma_{\max})_{rms}} \quad (2.37)$$

ve

$$\sigma_{(\max/\min),rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\sigma_{(\max/\min)} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.38)$$

$N = \sigma_{\max/\min}$ değerinin toplam sayısı

$$K_{(\max/\min),rms} = \sigma_{(\max/\min),rms} \beta \sqrt{\pi a} \text{ dir.} \quad (2.39)$$

2.3.8. Cahang Szamossi ve Liu modeli

Deneyler, yorulma çatlak gelişimini ve arta kalan ömrü tahmin etmek için merkez çatlaklı çeki numunesi üzerine rastgele dağılımlı yükleme ile yapılmıştır. Durum iki farklı yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Birinci yaklaşımda yorulma çatlak gelişiminde yük etkileşiminin etkisi dikkate alınmamıştır. Diğer yaklaşımda ise hem aşırı yüklemenin sebep olduğu çatlak gecikmesi hem de bası aşırı yüklemesinin sebep olduğu çatlak hızlanması hesaba katılmıştır. Buna ilaveten çeki aşırı yüklemesini takiben aniden uygulanan bası aşırı yüklemesinin aşırı yükleme gecikmesinde sebep olduğu azalma da dikkate alınmıştır. Burada “ γ ” sabiti deneysel olarak tespit edilmelidir. Bu modelin sınırlı kaldığı husus olarak, analitik bir çatlak gelişim çalışmasında “ R_{cut}^+ , ΔK_{tho} ” gibi karmaşık verilere ihtiyaç duyulmasıdır.

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{\Delta K}{(1 - \bar{R})^{1-\gamma}} \right]^m, \quad (2.40)$$

eğer $\Delta K > \Delta K_{th}$ ise

$$0 \leq \bar{R} < R_{cut}^+, \bar{R} = R$$

$$0 \leq \bar{R} \geq R_{cut}^+, \bar{R} = R_{cut}^+$$

$$\Delta K \leq \Delta K_{th} \frac{da}{dN} = 0 \text{ için} \quad (2.41)$$

R = gerilme oranı,

R_{cut}^+ = gerilme oranının cut değeri

burada

$$\Delta K_{th} = (1 - R)\Delta K_{tho} \quad (2.42)$$

ve

$\Delta K_{tho} = R=0$ için ΔK nin eşik değeridir.

2.3.9. Newman Jr modeli

Newman, çatlak kapanmasının etkisini içeren yorulma çatlak gelişiminin analitik bir modelinin uygulama ve geliştirmesini yapmıştır. Bu model Dugdale modeline benzer bir kavram kullanmıştır. Fakat, ilerlemiş çatlak ağzındaki plastik bölge ile bağlantılı olarak bir modifikasyon yapmıştır. Deneyler, değişken genlikli yükleme altında çatlak gelişim oranı üzerinde yük etkileşiminin sebep olduğu çatlak kapanmasının önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Bu tahmin yaklaşımında bazı yükleme durumları için çatlak gelişim hızlanması ve gecikmesinin neredeyse birbirini yok ettiği gözlenmiştir. Bu modelin en büyük sınırlaması C_1 , C_5 sabitlerinin deneysel olarak tespit edilmesinin gerekliliğidir.

$$\frac{d_a}{d_N} = C_1 \Delta K_{eff}^{C_2} \left[\frac{1 - \left(\frac{\Delta K_0}{\Delta K_{eff}} \right)^2}{1 - \left(\frac{K_{max}}{C_5} \right)^2} \right] \quad (2.43)$$

Burada,

$$\Delta K_0 = C_3 \left(1 - C_4 \frac{\sigma_{op}}{\sigma_{max}} \right), \quad (2.44)$$

ve

$$K_{max} = \sigma_{max} \beta \sqrt{\pi a}$$

$$\Delta K_{eff} = (\sigma_{max} - \sigma_o) \sqrt{\pi a} \beta \quad (2.45)$$

σ_{op} = Çatlak açılma gerilmesi, C_1 den C_5 e kadar sabitler

β = şekil faktörü

2.3.10. Rudd ve Engle modeli

Bu model uçuş esnasındaki rastgele yükleri temsil eden yüklemeye maruz, merkezinden çatlak açılmış paneller üzerindeki çatlak gelişimini tahmin etmede kullanılmaktadır. Bu modelde analiz yapılırken bası yükleri ihmal edilerek Walker'in çatlak gelişim oranı eşitliğini kullanmakta ve çeki yüklerinin oluşturduğu çatlak gecikmesi etkisi, genelleştirilmiş Willenborg modeline göre hesaba katılmıştır. Ayrıca bir çeki aşırı yüklemesinden sonra ani uygulanan bası aşırı yüklemesinin etkisi de ihmal edilmiştir. Çeki yüklemesinin oluşturduğu çatlak gecikmesinde ΔK yerine ΔK_{eff} ve R yerine R_{eff}

kullanılmıştır. Bu modelin sınırlı kaldığı husus “ γ ” sabitinin deneysel olarak tespit edilmesinin gerekliliğidir.

$$\frac{d_a}{dN} = C \left[\frac{\Delta K_{eff}}{(1 - R_{eff})^{1-\gamma}} \right]^m, \quad (2.46)$$

Burada,

$$\Delta K_{eff} = (K_{max})_{eff} - (K_{min})_{eff} \quad (2.47)$$

$$R_{eff} = \frac{(K_{min})_{eff}}{(K_{max})_{eff}} \quad (2.48)$$

c, m, γ Deneysel sabitlerdir.

2.3.11. Modifiye edilmiş Miner modeli

Bu model modifiye edilmiş Miner kuralını temel alır ve değişken yada rastgele yorulma yükleri altında yorulma çatlak gelişim oranını tahmin etmek için bir çevrimin etkisini diğer çevrimlerle olan etkileşimiyle açıklamaz.

$$\Delta K_{eff} = \Sigma \left[\frac{n_i \Delta K_i^m}{N_T} \right]^{1/m}, = \Sigma \left(\frac{n_i}{N_T} \right)^{1/m} \Delta K_i \quad (2.49)$$

Burada,

ΔK_{eff} = efektif gerilme yoğunluk faktör farkı

n_i = ΔK_i için çevrim sayısı

ΔK_i = i th çevrim için gerilme yoğunluk faktör farkı

N_T = toplan çevrim sayısı

m = sabit dir.

2.3.12. Nasgro modeli

Modifiye edilmiş genelleştirilmiş Willenborg modeli kullanılmıştır. Genelleştirilmiş Willenborg modelini genişletmiştir. Bası aşırı yüklemesinden sonra çatlak ilerleme gecikmesindeki azalmayı hesaplamada etkilidir. Bu modeli sınırlayan hususlardan biri ϕ_0 değerinin deneysel olarak hesaplanması gerekliliğidir. Bu model hava araçlarının tasarımında kullanılmaya uygundur.

$$\frac{d_a}{dN} = \frac{C(\Delta K_{eff})^m}{(1 - R_{eff})K_c - \Delta K_{eff}} \quad (2.50)$$

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

$$K_{\min,eff} = K_{\max} - K_{red} \quad (2.52)$$

$$K_{\min,eff} = \max\{(K_{\min} - K_{red}), 0\}, \quad (K_{\min} > 0 \text{ için}) \quad (2.53)$$

$$= K_{\min} \quad (K_{\min} \leq 0 \text{ için})$$

$$K_{red} = \phi \left[(K_{OL})_{\max} \left[1 - \left(\frac{a_n - a_{OL}}{rP_{OL}} \right) \right]^{1/2} - K_{\max} \right] \quad (2.54)$$

$$\phi = 2.523\phi_0 / (1.0 + 3.5(2.5 - R_U)0.6), R_U < 0.25$$

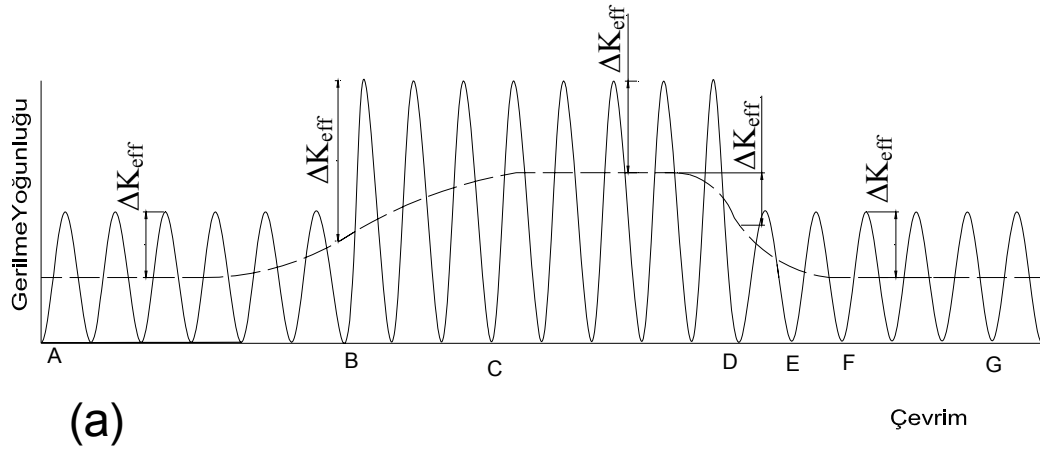
$$= 1.0 \quad R_U \geq 0.25 \text{ dir.} \quad (2.55)$$

Burada

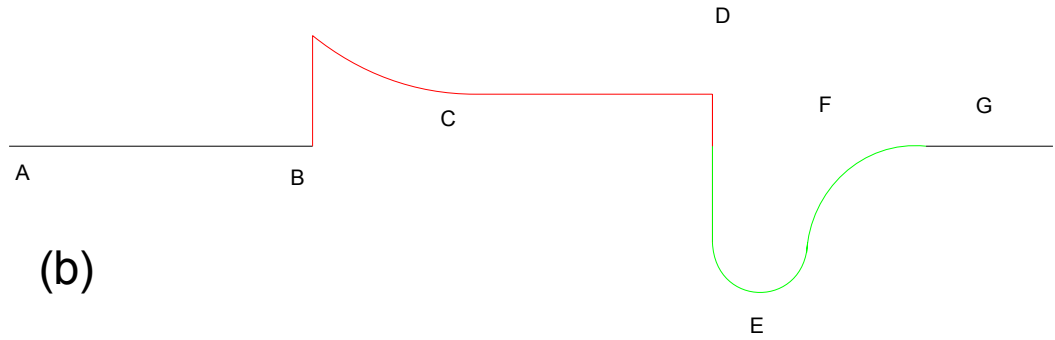
$$R_U = \sigma_{UL} / \sigma_{\max, OL}, \phi_0 = 0.2 \text{ den } 0.8 \text{ e kadar değer alır.} \quad (2.56)$$

2.4. Karmaşık Yüklemlere Çatlak Kapanması Kavramının Uygulanması

Çatlak kapanması modeli bazı durumları diğer yöntemlerden daha iyi açıklayabilir. Şekil 2.26'da çatlak kapanması izah edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.26. Çatlak kapanmasının etkisinin şematik gösterimi (Manson and Halford 2006)

*(a) uygulanan düşük-yüksek-düşük yük silsilesi (b) yüklemeye çatlak gelişiminin verdiği karşılık

Şekil 2.26(a)'da düşük-yüksek-düşük yükleme durumu gösterilmiştir. Burada başlangıçta nominal yükleme durumunda stabil ve nispeten düşük bir ΔK_{eff} değeri mevcuttur. Blok aşırı yükleme ile tekrar istikrarlı bir çatlak ilerlemesine ulaşmıyca kadar daha yüksek bir ΔK_{eff} değeri elde edilir. Son olarak tekrar nominal yükleme durumuna dönülmesiyle gerilme yoğunluk faktörü farkı orijinal ilk değerine düşer. Şekil 2.26'da gösterilen kesikli çizgi ile maksimum yükleme arasındaki uzaklık çatlak açılmasının yayıldığı bölgeyi temsil eder. Çatlak açılmasına etki eden ΔK_{eff} deki bu değişim sabit bir şekilde olmaz, şekilde şematik olarak gösterildiği gibi derece derece olur. Bu durum, plastik bölgede kalıcı gerilmelerin dereceli olarak yükselmesi ve alçalması neticesinde olur. Şu noktaya dikkat edilmelidir ki B-C arasındaki bölgede efektif ΔK nın değeri, en yüksek yüklemenin olduğu efektif ΔK nın değerinden dahi

daha büyüktür. D-E bölgesinde ise efektif ΔK 'nın değeri, en küçük yüklemenin olduğu bölgedeki efektif ΔK nın değerinden daha küçüktür.

Gözlemlerden elde edilen veriler ise Şekil 2.26(b)'de gösterilmiştir. A-B bölgesinde çatlak gelişim oranı düşük yüklerden dolayı düşüktür. Daha yüksek yük bloğunun ilk çevrimlerinde efektif ΔK , yüksek değerdeki yükleme esnasında oluşan efektif ΔK değerinden daha yüksektir. Dolayısıyla çatlak gelişme oranı şekilde B'-C noktalarında gösterildiği gibi daha yüksek değerlere sıçar. C-D noktaları arasındaki bölgede çatlak gelişim oranı yüksek yüklemeye oluşan ve B-C noktaları arasındakinden daha düşük olan sabit değerine düşer. D-E arasındaki bölgede ise efektif ΔK 'nın değeri çok düşük olduğundan çatlak gelişme oranı dramatik bir şekilde düşmektedir. Ancak EF bölgesinde çatlak ilerleme oranı yavaşça nominal seviyesine doğru yükselir ve nihayet FG bölgesinde çatlak gelişme oranı AB bölgesindeki ilk düşük seviyesine geri dönmüş olur.

Çatlak kapanma modeli, Willenborg ve Wheeler modellerine göre deneysel verilere ciddi bir şekilde daha yakın tahminler ortaya koymaktadır. Çatlak kapanması deneysel olarak gözlenebildiğinden, bu yöntem çatlak gelişimini ve genel davranışını çalışmak için çok faydalı bir araçtır.

Von Euw *et al.* (1972) bir aşırı yüklemeyi takiben devam eden temel yükleme çevriminde çatlak gecikmesi durumunu çalışmışlardır. Elde ettikleri verilerle çatlak kapanması modeli tahminleri birbiriyle uymaktadır.

2.5. Yorulma Çatlak Gelişimi Test Donanımı ve Testi

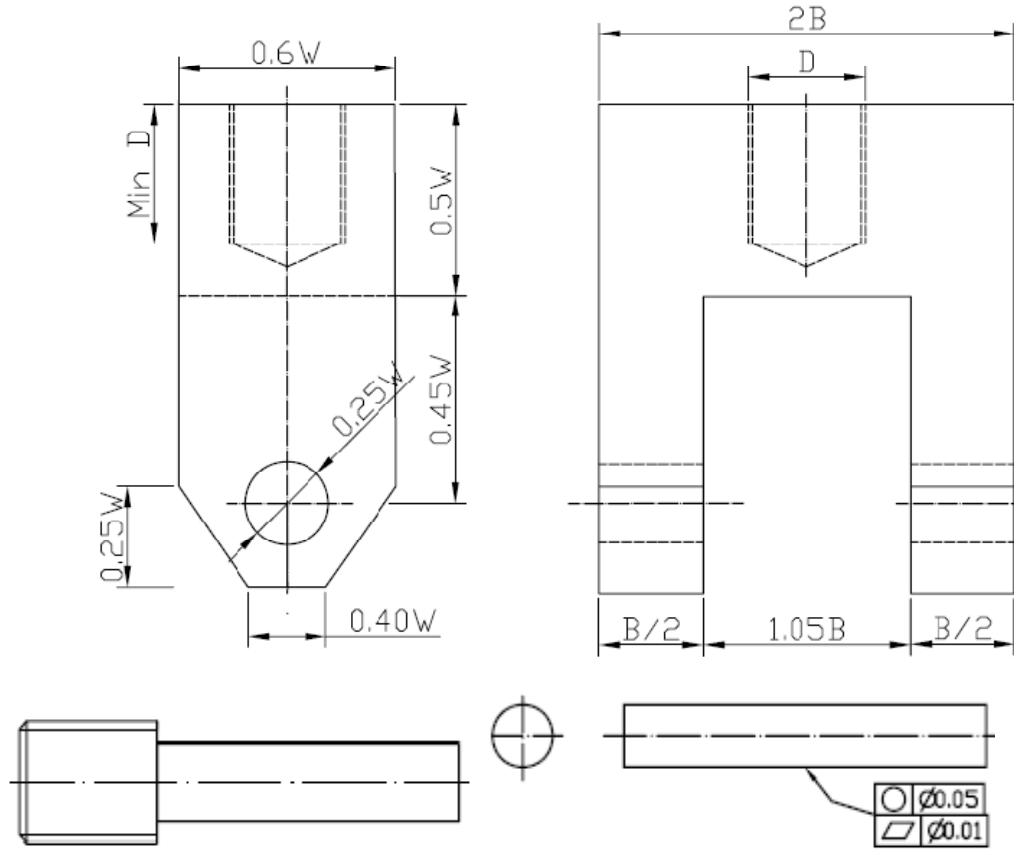
Yorulma çatlak gelişim testi esnasında, numunenin üzerindeki çentiğe kuvvet simetrik olarak dağıtılmalıdır. Test makinesine farklı değerlerde yükleme yapıldığında ΔP ve P_{max} değerleri test süresince $\pm\%2$ aralığında kalmalıdır (ASTM E647 2008).

ASTM E675 (2008) deney prosedürünün kullanımı çatlak gelişim hızı 10^{-8} m/çevrimin üzerindeyken uygundur. Ön çatlaktan dolayı çatlak gelişim oranının 10^{-8} m/çevrimin altına düştüğü durumda kullanmak zordur. Sabit genlikli kuvvet test prosedürünü kullanırken, sabit Δp değerinde frekans gibi yükleme karakteristikleri sabitlenerek, her bir numune test edilir. Fakat sınırlı sayıdaki numune ile geniş kapsamlı bilgi edinmek mümkün olmayabilir. Yük genliğinin değiştirilmesi durumunda potansiyel problem, çok sayıda farklı geçiş etkilerinin oluşmasıdır.

CT numunesinin test cihazının çenelerine bağlanabilmesi için test standardında belirtilen şekilde bir bağlantı aparatı kullanılmalıdır.

CT numunesi için bağlantı aparatı: Bir kilit ve pim mekanizması numunenin altından ve üstünden tutmaktadır ve numunenin düzlemsel olarak dönebilmesine izin vermektedir. Bu şekildeki numune ve yükleme mekanizması yalnızca çeki-çeki yüklemesine izin vermektedir. Lineer olmayan kuvvetleri ve numune ile pimin dönmesinin sebep olacağı yer değiştirmeleri azaltmaya yönelik düzenlenmiş pim-delik tasarımı Şekil 2.27’de verilmiştir. Ayrıca kesin ölçüde olmayan farklı genişlik W ve kalınlık B için bağlama pimi ve bağlantı mekanizması için önerilen ölçü ve toleranslar belirtilmiştir. Bu çalışmada, numune anma ölçüsü $w=50\text{mm}$ alınmış ve bağlantı aparatının ölçüleri bu değere göre teşkil edilmiştir.

Yüksek dayanımlı malzemelerin testinde bağlama aparatı üzerinde ya da numune yerleştirme kanallarının genişliğinin $1.05B$ nin üzerinde olması durumunda $0.225W$ ’dan daha büyük çaplı bir takviye pimine ihtiyaç duyulabilir. Bu durumda düz bir alt kilit deliği ya da şekilde gösterildiği gibi yükleme pimiyle $D=0.24W$ çapta uygun bir bağlantı kullanılabilir.



Şekil 2.27. CT numunesi için bağlama elemanı (ASTM E647 2008).

*Yüzey paralellikleri $\pm 0,05$ mm aralığında olmalıdır. Deliklerin ve yükleme piminin yüzey parlaklığı $R_a=0,8$ yada daha iyi olmalıdır.

2.5.1. Yorulma çatlak gelişim testi

Yorulma çatlak gelişim (YÇG-Fatigue Crack Growth FCG) deneyi yapılırken aralıklı olarak çatlak boyunun ölçümü yapılarak çatlak boyu çevrim sayısı ilişkisini tespit edilir. Dolayısıyla çatlak ilerleme hızı da/dN ile gerilme yoğunluk faktör farkı ΔK 'nın ölçümü ve aralarında grafik (Paris-Erdoğan eğrisi) çizilmesi mümkündür.

Çatlak ilerleme hızı 10^{-8} m/çevrimden daha büyük olduğunda, ΔK üzerinde tali etkenlerin etkisi az olmakta, ancak çatlak ilerleme hızı 10^{-8} m/çevrimden az iken ΔK 'da ki küçük değişiklikler önemli hal almaktadır. Mikro yapısal farklılıklar, artık gerilmeler, çatlak ucundaki geometri değişiklikleri (dallanma) yada çatlak tokluğu gibi etkilerin

çatlak ucundaki gerilmeleri etkilemesi, uygulanan kuvvetin hassasiyeti, çevre kontrolü ve verilerin hassaslığı gibi değişkenler, düşük hızda çatlak ilerleme rejiminde ($da/dN < 10^{-8}$ m/çevrim) önem arz eder. Eşik gerilme yoğunluğunun operasyonel tanımlamasında ya da eşik değer yakınında da/dN den ziyade ΔK nın değişimi daha anlamlıdır. da/dN ile ΔK grafiğinde özellikle üst üste gelen değerler için ön yorulma çatlağından teste geçişte K nın hem arttığı hem de azaldığı durumlarda çoklu test planlaması, testlerin tekrarlanması isabetli bir yaklaşım olacaktır. Test sayısının artmasıyla elde edilen verilerin artması daha güvenli sonuçlar elde edilmesine yardımcı olacaktır (ASTM E647 2008).

2.5.1.a. Yorulma ön çatlağı

Deneye başlamadan önce numunede bir yorulma çatlağı oluşturulmalı, bu çatlak bir miktar ilerletilmelidir. Yorulma ön çatlağının önemi, yeterli boyutta keskin bir yorulma çatlağı oluşturmak ve çatlak oluşumu için açılmış çentiğin geçirdiği işlemlerin etkisini, çentik ucu şeklinin etkisini ve önceden uygulanmış yüklerin etkilerini ortadan kaldırmaktır.

Yorulma ön çatlağı oluşturulurken aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır.

➤ Yorulma ön çatlağı oluşturulurken kuvvet dağılımı simetrik olmalı ve ön çatlak oluşturulurken K_{max} $\pm 5\%$ aralığında tutulmalıdır. Yorulma ön çatlağı oluşturulurken makul sınırlar içerisindeki her yük frekansı kullanılabilir. Yorulma ön çatlağı Şekil 3.3’de görüldüğü üzere açılmış olan çentiğe paralel doğrultuda uzanmalıdır. Bunlara ek olarak yorulma ön çatlağı; $0.10B$, h , ya da 1mm ’den (hangisi daha büyük ise) daha kısa olmamalıdır.

➤ Yorulma ön çatlağı oluşturulurken K_{max} değerinin yorulma testinin başlangıcındaki K_{max} değerini aşmaması uygun olur. Eğer ön çatlak açılırken uygulanacak kuvvet deney esnasında kullanılacak olandan daha yüksek bir K_{max} değerine denk geliyorsa da

uygulamanın bu şekilde yapılmasının bir mahsuru yoktur. Ancak bu durumda aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

a. Yorulma ön çatlğından gerçek teste geçerken maksimum yükteki azalma %20 den daha fazla olmamalıdır.

b. Ön çatlak oluşturulurken elde edilen K nın gerçekte geçildiğinde oluşan K dan büyük olduğı durum için, yukarıda anlatılan tedbirlere rağmen ilk yükleme, çatlak gelişim oranının sınır değerini etkileyebilir. Burada yorulma ön çatlğını oluştururken gerilme yoğunluğunu mümkün olduğı kadar düşük tutmak makul bir yaklaşımdır. Ön çatlak gelişim hızının 10^{-8} m/çevrimden daha az olması önerilir. Oluşabilecek bir bası kuvveti, ön çatlak oluşturma kuvvetine eşit ya da daha az olmalıdır. Zira bası kuvveti yorulma ön çatlğını hızlandırabilir ve bu durum testi etkileyebilir.

➤ Numunenin ön yüzeyi ve arka yüzeyinden ölçülen çatlak boyları arasındaki fark 0.1mm ile 0.002w kadar (hangisi büyükse) olmalıdır. Eğer $W > 127$ ise 0.1mm yerine 0.25mm olarak değerlendirilir. Ön yüzeyden ve arka yüzeyden ölçülen çatlak boyutları arasında 0.25B den daha fazla fark var ise, yorulma ön çatlğı uygun şekilde açılmamıştır ve yapılacak olan test geçersizdir. Eğer yukarıdaki gereklilikler yerine getirilemiyor ise yükleme sistemi, yorulma çentiğinin işlenmesi ve artık gerilme durumu gibi materyal problemleri kontrol edilmelidir (ASTM E647 2008).

2.5.2. Yorulma çatlak gelişim (FCG) deneyinde çatlak boyu ölçümünde kullanılan yöntemler

Çatlak boyunun ölçülmesi: Geçmiş çevrimlerin bir fonksiyonu olarak yorulma çatlak boyunun ölçümü, görsel ya da buna denk sonuç verecek başka bir yöntemle (Elektrik boşalması v.b) yapılır. Görsel yöntemde malzeme üzerinde bir referans nokta belirlenerek hareketli bir mikroskopla deney durdurulmadan (çoğı zaman durdurulması icap edebilir) çatlak boyu ölçümü yapılabilir. Elektrik boşalması yönteminde ise yük altında çatlak açık pozisyondayken ölçüm yapılır. Bu çalışmada görsel metot olarak, iki

adet CCD (Charge-coupled Device) kameralar yardımıyla çatlak ilerleme görüntüleri alınmış, bilahare görüntüler üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

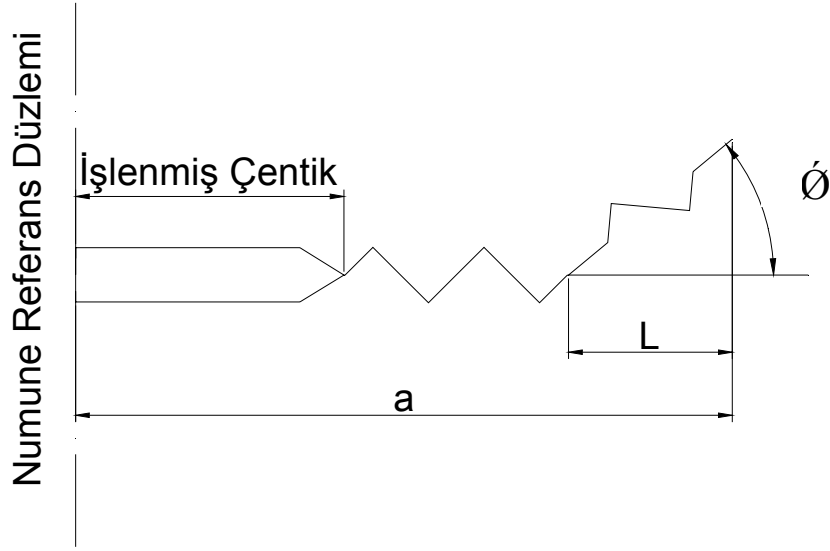
Çatlak boyunun ölçümü için iki ölçüm arasındaki çatlak boyu değişiminin (Δa) 0,25mm ye kadar olması tavsiye edilir. Fakat ihtiyaca göre 0,25mm nin altında olması gerekebilir. Eşik değer tespitinde eşik değer yakınında birkaç noktada da/dN , ΔK verisine ihtiyaç vardır.

CT numunesi için tavsiye edilen, iki ölçüm noktası arasındaki maksimum aralık;

$$\begin{aligned} 0,25 \leq a/w \leq 0,40 \text{ için} \quad \Delta a &\leq 0,04 w, \\ 0,40 \leq a/w \leq 0,60 \text{ için} \quad \Delta a &\leq 0,02 w, \\ a/w > 0,60 \text{ için} \quad \Delta a &\leq 0,10 w \quad \text{dur (ASTM E647 2008).} \end{aligned}$$

Kural olarak çatlak boyu ölçümü çatlak ilerlemesinde simetrikliğin takibi açısından, numunenin hem önünden hem de arkasından yapılır. Alınan ölçünün ortalama değeri çatlak boyu olarak kabul edilerek hesaplamalarda bu değer kullanılır. Çatlak gözlemlerinin tek taraflı yapılması, yalnızca daha önce yapılmış deneyler ile aynı numune, aynı materyal, aynı test düzenlemesi ve aynı çatlak ilerleme rejimi kullanılmasıyla mümkün olabilir. Bu çalışmada bütün deneyler için hem önden hem de arkadan çatlak boyu gözlenmiştir.

Bu test metoduna göre çatlak ilerlerken 0,1W veya daha büyük boydaki çatlak ilerlemesi, çatlak ilerleme düzleminden $\pm 20^\circ$ 'den daha fazla sapması durumunda test geçersiz olur. Sapma $\pm 10^\circ$ ile $\pm 20^\circ$ arasında kalmalıdır (Şekil 2.28). Eğer ön yüzey ile arka yüzey arasındaki çatlak ilerleme miktarı farkı 0,25B den daha büyük olursa yine deney geçersiz olur.



Şekil 2.28. Çatlak ilerlemesinin çatlak ilerleme düzlemi dışına çıkması (ASTM E647 2008)

*Eğer $\theta \leq 10^\circ$ ise geçerlidir. Eğer $10^\circ < \theta \leq 20^\circ$ ise durum gözlenmelidir. Eğer $L \geq 0,1W$ için $\theta > 20^\circ$ ise deney geçersiz olur.

2.5.2.a. Elektriksel potansiyel fark (EPD) yöntemi ile çatlak boyutunun tanımlanması

CT numunesi ile YÇG deneyi yapılırken, çatlak boyutu elektriksel potansiyel fark (EPD) yöntemiyle tespit edilebilir.

EPD için temel metot: Deney numunelerinde çatlak boyunun ölçülmesinde hem doğru akım (DC), hem de alternatif akım (AC) kullanılmaktadır. Daha yaygın olarak kullanılan DC yönteminde, sabit bir akım numuneden geçirilir ve sabit numune kalınlığından dolayı kalınlık yönünde bütün noktalardan iki boyutlu bir elektriksel alan oluşur. Alternatif akım tekniğinde ise sabit bir genlikte (normal sinüzoidal) akım, çatlak ucunda voltaj düşümü üretmek için numune üzerinden geçirilir. Doğru akım DC uygulandığı durumda alan iki boyutludur ve kalınlık boyunca her noktada sabittir. AC tekniğinde; numuneden, çatlak ucunda elektriksel potansiyel fark düşümü oluşturacak sabit genlikli (normal sinüzoidal), bir akım geçirilir. Rölatif olarak düşük frekanslı (çoğu malzeme için 100Hz'den az) durum için doğru akımda olduğu gibi alternatif akımda da aşağı yukarı iki boyutlu bir elektrik alanı oluşur. AC durumunda yüksek frekansta,

numunenin manyetikleşebilme kabiliyetine ve akımın frekansına bağlı olarak, numunenin kalınlığı yönünde uniform olmayan bir akım dağılımı oluşur. Bu durum, akımın yalnızca numunenin yüzeyi ve yüzeye yakın bölgesinden akma eğilimi göstermesinden dolayı, “Skin Efeği” (deri etkisi) olarak adlandırılır. Bazı malzemeler için, kısmen ferromanyetik malzemeler, 100Hz ya da altındaki frekanslarda da deri etkisi önemli olabilir. Bu yüzden alternatif akım metotları iki alt gruba ayrılabilir. Düşük frekanslı metot (deri etkisi ihmal edilebilir) ve yüksek frekanslı metot (deri etkisi dikkate alınır).

Voltaj ölçümü, numuneye uygulanan maksimum çeki yükü ya da ona yakın değerde yük aralığında yapılmalıdır. Alternatif akım frekansına ya da doğru akım voltajına bağlı olarak voltaj düşümü ölçülürken numune yükleme frekansı düşürülmeli ya da maksimum çeki yükü durumunda testin tamamen durdurulması gerekli olabilir. Ancak yine de maksimum yük durumunda dahi yüzeyler arasında temastan dolayı hala bir miktar hata olabilir. Bu hata hariç, deney sonunda elde edilen kırılma yüzeylerindeki çatlak boylarının incelenmesiyle durum açıklanabilir. Bu yaklaşımda elektrik potansiyel ölçümleriyle kırılma yüzey ölçümlerinden yararlanılarak başlangıç ve son çatlak ölçüleri eşleştirilerek hesap kesinleştirilir.

Voltaj ölçümü yapılırken numunenin değiştirilmesi ile voltajda kısmi değişiklikler olabilir. Örneğin numune sıcaklığındaki 1°C’lik değişim, malzemenin elektrik direncinin değişmesinden dolayı, EPD sinyalinde birkaç μV luk değişim gerçekleşebilir. Yükselticiden gelen sinyal artışından ya da voltaj metrenin kalibrasyonundan kaynaklanan voltaj değişimleri meydana gelebilir. Bu etkiyi dengelemek için voltaj ölçümleri, referans bir yerden ölçümler alınarak, normalleştirilebilir. Referans yer olarak ya aynı numune olabilir ya da aynı çevre şartlarına sahip alternatif bir numune olabilir.

2.5.2.b. Görsel yöntem

Çatlak boyu ölçmede kullanılan diğer bir yöntem görsel metottur. Görsel metotta numunenin karşısına her iki yüzeyden birer mikroskop yerleştirilir. Mikroskop hareketli bir tabla üzerine yerleştirilmiştir.

İlk önce mikroskobun pozisyonu numune üzerindeki sabit bir noktaya göre tespit edilir. Daha sonra mikroskobun “+” kılı çatlak ucuna getirilerek mikroskobun yeni pozisyonu mikrometreden okunur, çevrim sayısı ve pozisyon değerleri kaydedilir.

Bu çalışmada görsel metot olarak, iki adet CCD (Charge-coupled Device) kamera yardımıyla çatlak ilerleme görüntüleri alınmış, bilahare görüntüler üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

2.6. Dijital Görüntü İşleme ve Analizi (Digital Image Correlation-DIC)

Dijital görüntü işleme ve analizi yöntemi, gerilme altındaki cisimlerin yüzeylerindeki yer değiştirmelerin temas etmeksizin ölçmesini sağlayan bir tekniktir (Samarasinghe and Kulasiri 2004). Görsel sistemlerin gelişmesi ve ucuzlaması neticesinde DIC geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Sozen and Guler 2008). Mühendislikteki bu uygulama alanlarından biri de test esnasında malzemelerin uğradıkları deformasyonların tanımlanmasıdır. Alternatif deformasyon ölçüm yöntemi olarak dijital görüntü yöntemiyle yapmış olduğumuz bu yorulma çatlak gelişim çalışmasında diğer yöntemlerin bir takım mahsurlu yönleri ortadan kaldırılmaktadır.

Elektrik Düşüm yöntemi düşük maliyetli olması ve kolayca uyarlanabilmesi sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak elde edilen veriler; ortam sıcaklığı, malzeme cinsi ve şekil değiştirme genliği gibi parametrelerden kolayca etkilenmektedir. Elektrik düşüm yönteminde ortam sıcaklığının kontrol edilmesi gibi tedbirler alınarak daha

doğru sonuçlar elde etmek mümkündür. Ancak bu da fazladan bir maliyet getirmektedir ve pratik olmayan bir yöntemdir.

Görüntü yöntemlerinin temel ögesini oluşturan dijital görüntüler, genelde endüstriyel kameralar kullanılarak elde edilmektedir. Görüntüler, kameralardan bilgisayara aktarılarak kullanıcı tarafından değerlendirilmektedir.

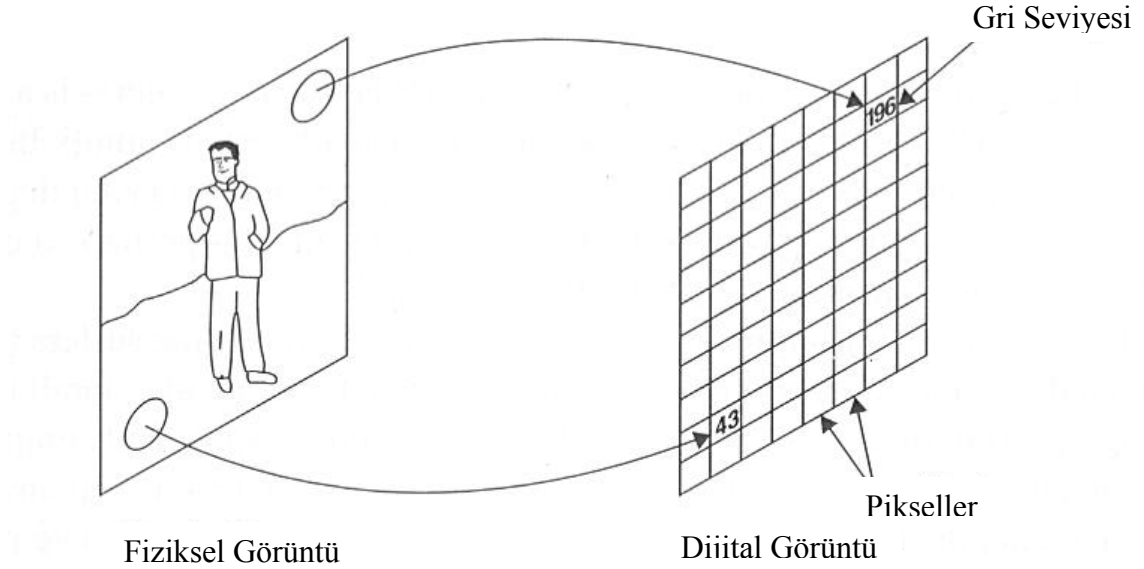
Son yıllarda araştırmacılar dijital görüntü yöntemlerini, temassız olması, verilerin saklanabilmesi ve deney süresini kısaltması gibi bazı avantajlarından dolayı daha fazla kullanmaktadırlar.

2.6.1. Dijital görüntü işleme

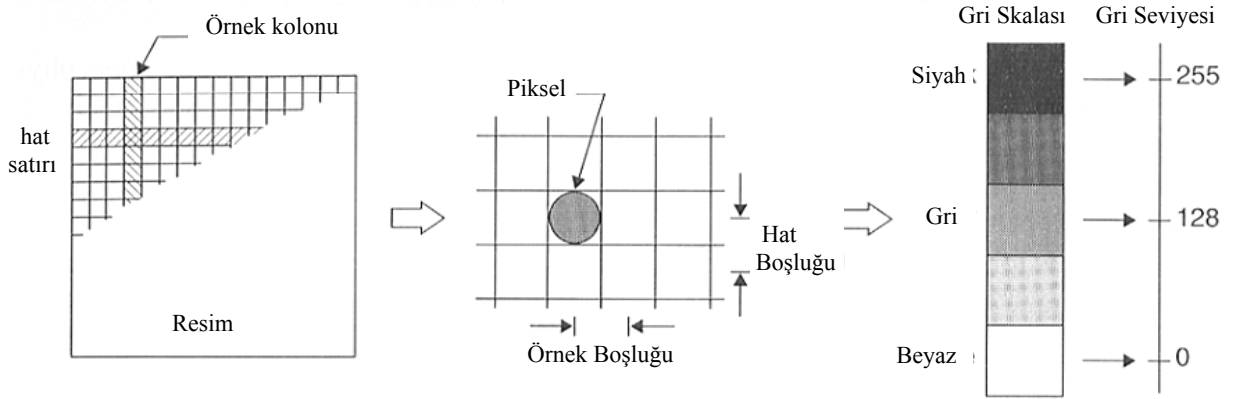
Gonzalez and Woods (2001) dijital görüntüyü 2 boyutlu fonksiyon olarak tanımlamaktadır. Bu fonksiyonun herhangi bir x ve y noktasındaki değeri o noktanın gri renk değeri olarak adlandırılır. Dijital görüntü normal görüntüden koordinat değerleri ve fonksiyonun değerinin aralıklı (discrete) olmasıyla ayrılır. Bu nedenle, dijital görüntünün bilgisayar tarafından işlenmeden önce hem koordinat değerleri hem de fonksiyon değeri bakımından sayısal hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Koordinat değerlerinin sayısal hale çevrilmesi örnekleme ve fonksiyon değerlerinin sayısal hale geçirilmesi ise nicelleştirme olarak adlandırılır (Güler *et al.* 2007).

Şekil 2.29 dikdörtgensel düzendeki sayıların dijital görüntüyü nasıl ifade ettiğini göstermektedir. Fiziksel resim piksel ya da resim elementi olarak adlandırılan bölgelere bölünür. Her bir piksel noktasına yerleştirilen sayı, o noktanın parlaklık değerine karşılık gelir. Bu dönüşüm işlemi sayısallaştırma olarak adlandırılır ve en sık kullanılan yöntemi Şekil 2.30'da gösterilmiştir. Her bir piksel noktasında, resmin parlaklığı örneklenir ve niceliklenir. Bu işlem, her piksel için o noktanın parlaklığı ya da koyuluğunu gösteren sayısal bir rakam oluşturur. Bu işlem tüm pikseller için

yapıldığında resim dikdörtgensel sayılar ile ifade edilmiş olunur. Böylece her bir piksel bir koordinata ve bir gri renk seviyesine sahip olur.



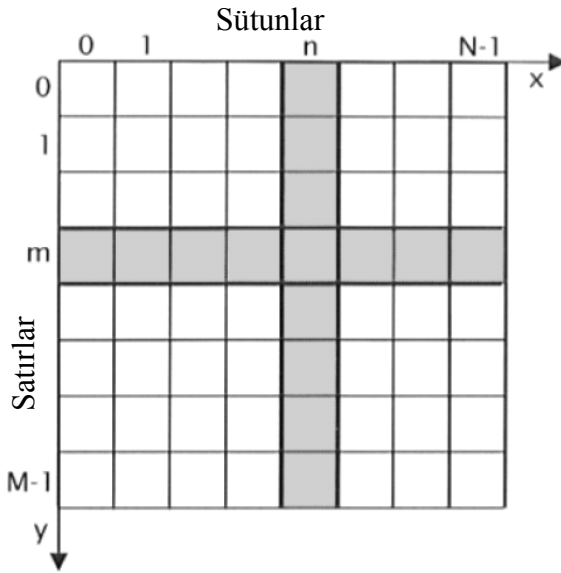
Şekil 2.29. Fiziksel görüntü ve buna karşılık gelen dijital görüntü (Castleman 1996)



Şekil 2.30. Görüntünün sayısallaştırılması (Castleman 1996)

Castleman (1996), dijital görüntüyü şu şekilde ifade etmiştir: “dijital resim, optik yöntemler kullanılarak eşit aralıklı dörtgensel şekiller halinde ve eşit sinyal büyüklükleri kullanılarak oluşturulmuş bir süreksiz fonksiyondur.” Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere, dijital resim temel olarak örneklenmiş iki boyutlu süreksiz bir fonksiyon olarak algılanabilir. Şekil 2.31 dijital görüntülerin gösterilmesi sırasında

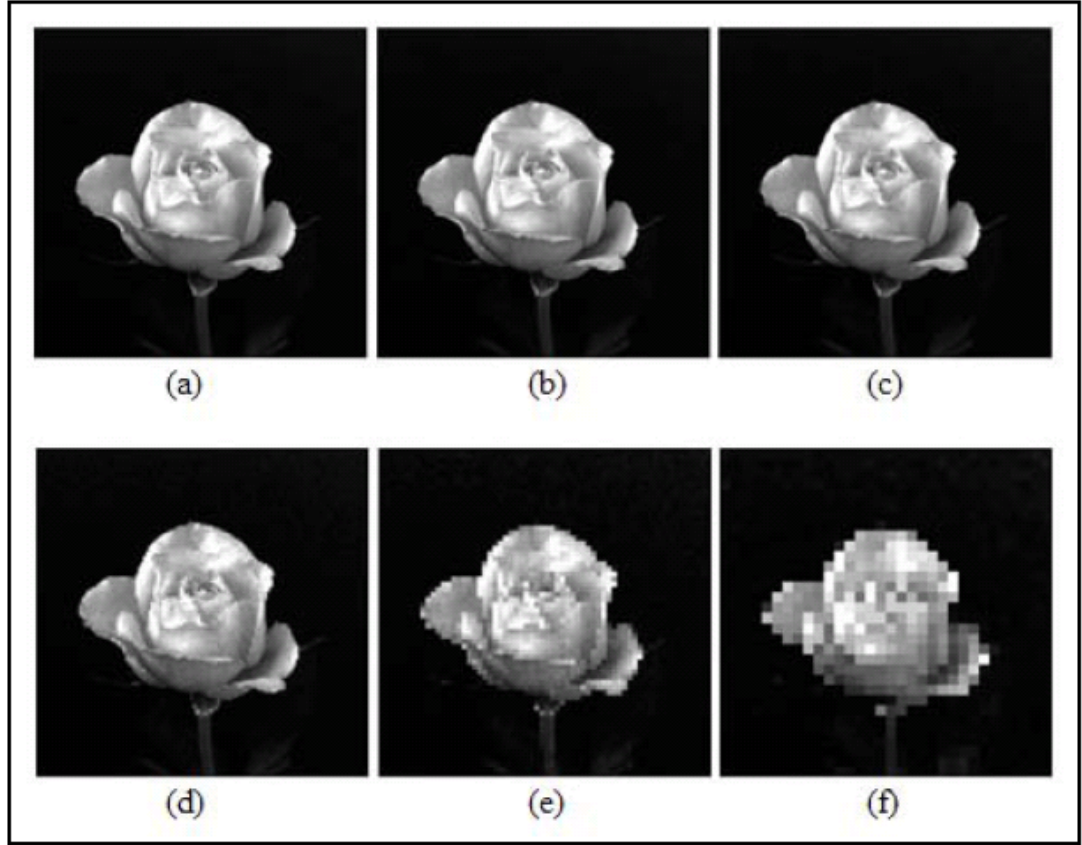
kullanılan koordinat düzenini göstermektedir. Görüldüğü gibi matrisler için kullanılan yöntemle aynıdır. İlk indeks, m , ve ikinci indeks n , satır ve sütunların pozisyonlarını ifade etmektedir. Eğer görüntü M satır ve N sütuna örneklenmiş ise $M \times N$ adet piksel içerir ve $M \times N$ görüntü olarak adlandırılır. Genellikle, düzenin ilk elementi $(m,n) = (0,0)$ olarak adlandırılır ve sütun indeksi 0 dan $M-1$ 'e kadar ve satır indeksi 0 dan $N-1$ 'e kadar değişir (Jahne 2005). Her bir piksel tarafından gösterilen alan, çözünürlük olarak ifade edilir.



Şekil 2.31. Dijital görüntünün ifade edilmesi

Şekil 2.32 aynı resmin farklı piksel sayıdaki pikseller ile ifade edilmesini göstermektedir. Şekil 2.32(a) 1024x1024, 256 düzeydeki dijital gül resmini göstermektedir. Şekil 2.32(b-f) çözünürlüğün $N = 1024$ 'den $N = 512, 256, 128, 64$, ve 32 'ye düşürülmesinin etkilerini göstermektedir. Şekil 2.32 (a) ve (b) görüldüğü gibi, sık örnekleme yüksek çözünürlükteki görüntüleri oluşturur ve bu görüntülerden her bir tanesinin küçük olanlara karşılık geldiği birçok piksel bulunur. Bu iki resmin birbirinden farklı olduğunu söylemek neredeyse imkânsızdır. Diğer taraftan, Şekil 2.32 (c-f) kaba örnekleme düşük çözünürlükteki görüntüleri oluşturur. Bu görüntülerde, her birinin geniş alanları gösterdiği daha az sayıda piksel bulunur. Düşük çözünürlükteki

görüntülerde piksel köşelerinde dama tahtası etkisi gözlemlenir. Bu etki ilk olarak Şekil 2.32(c)'de 256 x 256 çözünürlüğe görüntüde görülmektedir.



Şekil 2.32. Dijital görüntüde çözünürlük etkisi

Bu davranış 128 x 128 görüntüde daha gözlemlenir hale gelmiş, diğer resimlerde ise daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır (Gonzalez and Woods 2001). Daha öncede bahsedildiği gibi, görüntü fonksiyonunun sürekli değerlerinin dijital hale dönüştürülmesi gri düzey nicelleme olarak adlandırılır. Ne kadar çok nicelleme değeri kullanılırsa, görüntü fonksiyonundaki değişimler o kadar iyi ifade edilir. Her bir pikselin parlaklığını ifade etmek için kullanılan gri değer sayısı şu şekilde hesaplanır:

$$n = 2_b \quad (2.57)$$

n: nicelikleme sayısı; b = her bir pikseli saklamak için kullanılan bit sayısını ifade eder. n adet nicelikleme değeri 0, 1, 2, ve n-1 değerlerini kapsar. Bu sayılardan 0 siyahı ve n-1 beyazı ifade eder. Genellikle her bir piksel için 8 bit kullanılır. 8 bit durumunda 256 nicelikleme değeri kullanılır. Bu değerlerden 0 siyahı ve 255 beyazı ifade eder. Dijital görüntüyü saklamak için kullanılan bit sayısı aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$b = nMN \quad (2.58)$$

b: dijital görüntüyü saklamak için kullanılan bit sayısı; M ve N, dijital görüntüdeki toplam satır ve sütun sayısını göstermektedir.

2.6.2. Görüntü alma

Bu işlem, içerisinde yalnız farklı örneklerin işlenebildiği dijital formdaki resimsel bilgilerin örneklenmesidir. Bir görüntünün yatay ve düşey eksenindeki piksel sayısı onun boyutsal çözünürlüğünü tanımlar. Daha fazla sayıda piksel demek daha fazla çözünürlük demek ve dolayısıyla daha kaliteli ve detaylı görüntü demektir. Çözünürlük görüntü alma esnasında kullanılan donanıma bağlı bir olgudur. Yaygın olarak kullanılan cihazların çoğu 640x480 çözünürlüğü desteklemektedir. Bazı medikal uygulamalarda daha doğru ve kesin analizler yapabilmek amacıyla 1024x768 veya 1024x1 280 çözünürlükler kullanılmaktadır.

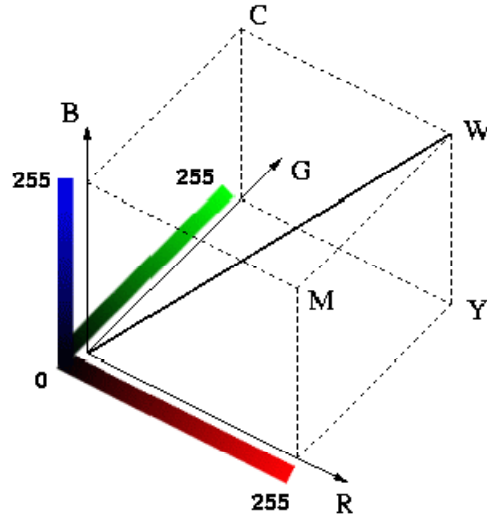
Diğer bir çözünürlük tipi parlaklık çözünürlüğü olarak bilinen orijinal parlaklığın örneklenmesidir. Bu çözünürlükte, piksel parlaklığının orijinal örnek parlaklığını ne kadar doğrulukla dikkate alındığı önemlidir. Parlaklık çözünürlüğü, orijinal sahneyi olabildiğince gerçekçi olarak ifade edebilen sürekli fondaki bir form ile renk tonları arasındaki geçişin derecesi olarak resim kalitesini belirler. Resim elemanlarında olduğu gibi orijinal sahnenin parlaklığı belirli bir aralıkta dijitalasyon işlemleriyle örneklenir. Dijitalasyon işleminde analog örnek parlaklıkları her piksel noktasında Analog/Dijital (A/D) dönüştürücü yardımıyla bir tam sayıya dönüştürülür. Bu işlem miktar ölçme

olarak adlandırılır. Bu miktar ölçmenin doğruluğu yine donanıma bağlı bir olgudur. Örneğin orijinal parlaklığını gösterecek üç bit'lik bir renksiz görüntüde 8 farklı gri ton bulunur ($8 = 2^3$) . Eğer miktar ölçme bir bayt'lık doğrulukla yapılırsa bu aralık 0–255 piksel aralığını tanımlayan 256 gri tona yükselmiş olur (Güler *et al.* 2007)

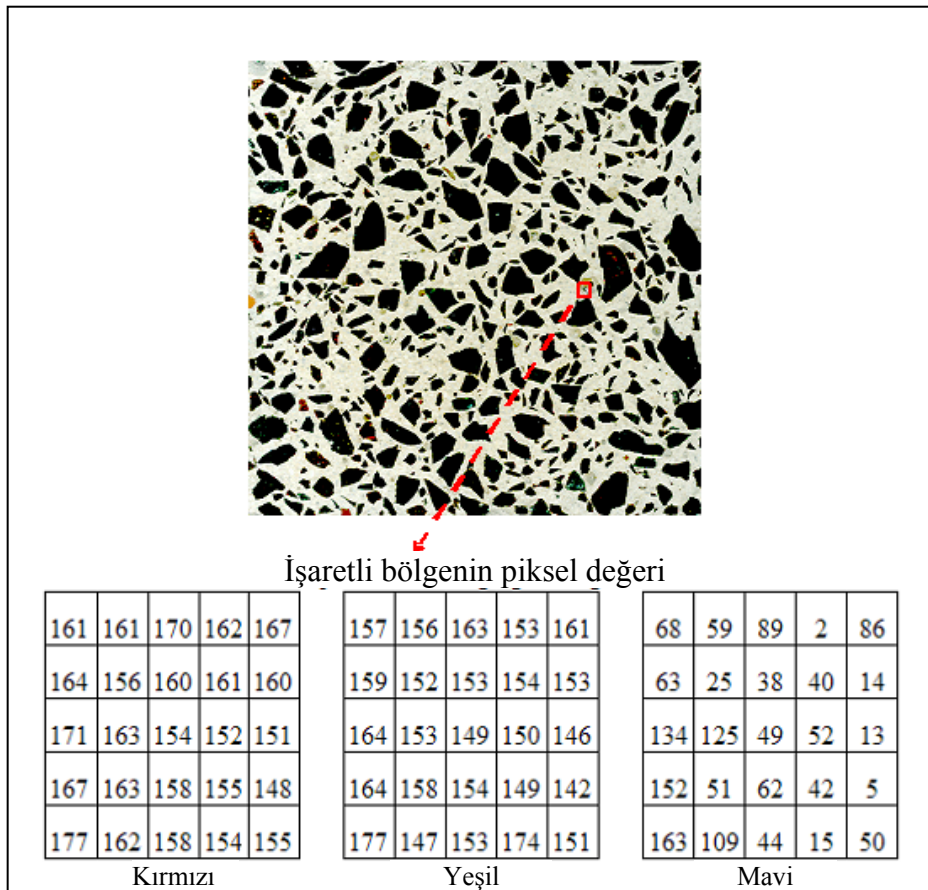
2.6.2.a. Dijital görüntülerde kullanılan renk modelleri

Gerçek renk ya da kırmızı-yeşil-mavi (RGB) renk modeli: Gerçek renk görüntülerde her bir piksel içerisindeki kırmızı, yeşil ve mavi düzeyi ile tanımlanır. Şekil 2.33 gerçek renk küpünü göstermektedir. Her bir eksen 0 ile 255 arasındaki kırmızı, yeşil ve mavi değerlerini gösterir. Küpün orijin noktası (0,0,0) siyah rengi ve orijinden en uzak köşesi (255,255,255) ise beyaz rengi göstermektedir.

Gerçek renk küpünün köşeleri kırmızı, yeşil, mavi ve bunların bileşiminden oluşan cam göbeği, mor, sarı ve beyaza karşılık gelmektedir. Renkler vektörler gibi birbirleriyle toplanarak yada birbirlerinden çıkarılarak diğer renkleri oluşturmaktadır. Şekil 2.33'de görüldüğü gibi 255 kırmızıya 255 yeşil eklenmesi sarıyı ve 255 kırmızıya 255 mavi eklenmesi moru oluşturmaktadır. Şekil 2.34'de görüldüğü üzere, gerçek renk görüntüler her bir pikselin kırmızı, yeşil ve mavi değerlerini gösteren 3 adet matristen oluşur. Gerçek renk görüntüler 24 bit görüntü olarak da anılmaktadırlar ve yaklaşık 16 milyon renk ($256 \times 256 \times 256$) içermektedirler

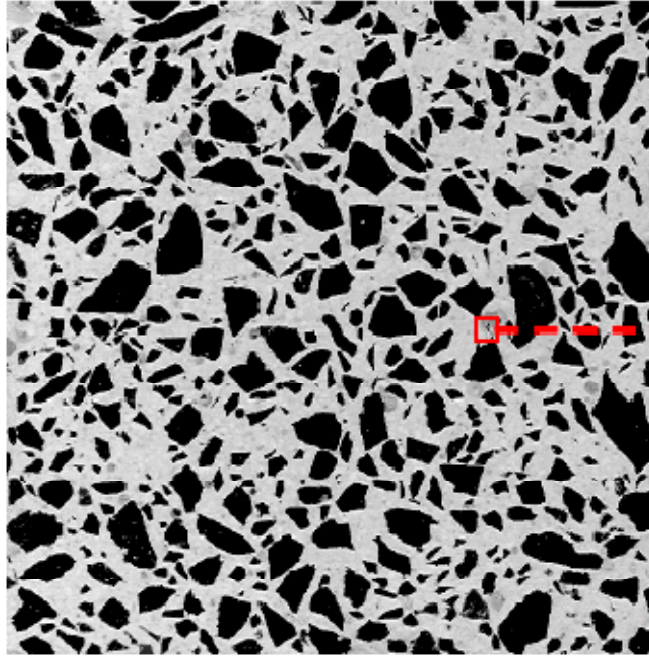


Şekil 2.33. Gerçek renk küpü



Şekil 2.34. Gerçek renk görüntü (Sözen and Güler 2008)

Gri ton renk modeli: Gri ton modeli Şekil 2.34’de gösterilen gerçek renk küpünün ana diyagonalı ile tanımlanır. Bu çizgi orijindeki 0 değerine sahip siyah renk ile 255 değerine sahip beyaz renk arasındadır. Gri ton görüntülerde her pikselin kırmızı, yeşil ve mavi değerleri birbirine eşittir. Şekil 2.35 gri ton görüntüye örnek teşkil etmektedir.



İşaretli bölgenin piksel değeri

180	173	194	241	171
208	197	194	210	194
179	173	195	200	224
141	131	201	203	215
199	194	205	232	262

Şekil 2.35. Gri ton görüntü (Sözen and Güler 2008)

2.7. Plazma Nitrürleme

Metal parçaların yüzeylerinin sertleştirilmesi ve aşınmaya, yorulmaya karşı olan mukavemetlerinin artırılmasının yöntemlerinden biri de yabancı atomları bu yüzey üzerine etki ettirerek ince bir tabaka oluşturulmasıyla sağlanmasıdır.

Nitrürleme, ferritik şartlarda (592°C sıcaklığın altı) malzeme yüzeyine azot girişini içine alan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu nedenle nitrürleme ile yüzey kompozisyonunun değiştirilmesi karbürlemeye benzemesine rağmen azot, yüzeye ostenitik sıcaklık yerine ferritik şartlarda yayılır. Yüzey sertliği ve sertleşme derinliği öncelikle işlem zamanına, sıcaklığa, gaz karışımına ve demir esaslı malzemenin alaşım içeriğine bağlıdır. Bu işlem

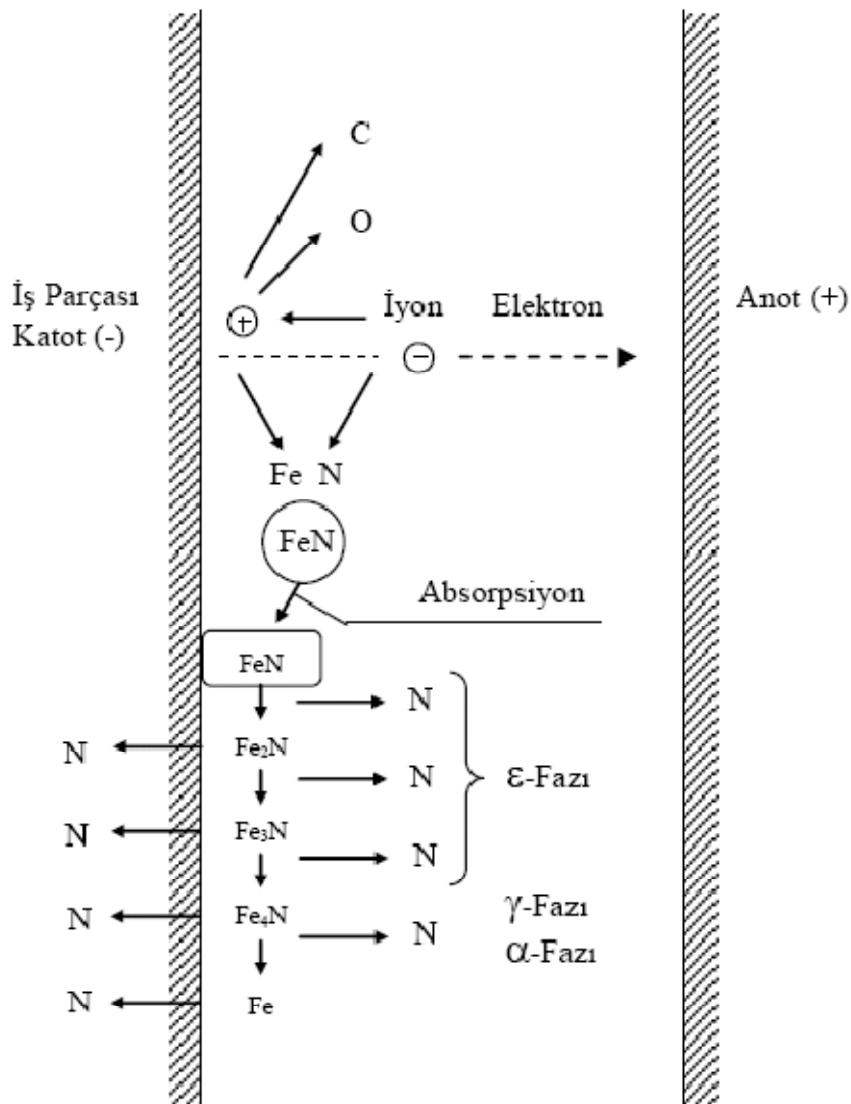
düşük sıcaklık nedeniyle minimum distorsiyon ve mükemmel boyutsal kontrolle yapılabilir. Azot demir içinde yayılarak nitrürler oluşturur. Nitrürler, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük parçacıklar halinde yapıya dağılmıştır. Yapıyı sertleştiren bu nitridlerdir. Nitridleme, termokimyasal işlem olup genellikle atomik azotun ferrit fazına geçişini kapsamakta ve sonuç olarak oda sıcaklığına yapılan soğuma sırasında herhangi bir faz dönüşümünün oluşması söz konusu olmamaktadır.

Plazma ile nitridleme, metalik malzemelerin yüzeylerine bir plazma ortamında azot difüzyonu sağlayan termokimyasal bir işlemdir. Nitridleme katı, sıvı, gaz ve plazma ortamında gerçekleştirilebilir. Nitridleme işlemi ile yüzey sertliği, yorulma dayanımı, aşınma ve korozyon direnci artırılabilir. Plazma ile nitridleme 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 nitridleme işlemi N_2 , H_2 , Ar ve NH_3 gaz ortamında, 350-590°C arasında gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek malzemenin Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elementlerini içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. Plazma ile nitridleme işlemi sonrası en dışta beyaz tabaka ve onun altında da difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşur (Alsaran 2001).

2.7.1. Plazma nitridleme işleminin mekanizması

Elektriksel boşalma şartları altında azot gazı iyonize olur. Azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenir ve katoda bağlı iş parçasını bombardımana uğratır. Yüzeye çarpan iyonlar, yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açar. Bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elementleri, metalik olmayan element atomları (karbon, oksijen, azot) ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır (saçılma). Yüzeye çarpan iyonların ancak çok az bir kısmı iş parçasına yayılır (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

nitritlere (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N) dönüşür (Şekil 2.36). Dönüşme sırasında serbest kalan azot atomları ya metale yayılır 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 (Yıldız 2010).



Şekil 2.36. Plazma nitritleme işleminin mekanizması (Edenhofer 1974)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme

Bu çalışmada, ısıtılma işlemi iyi cevap veren ve nitrürleme ile sertleşebilen AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Deneyde kullanılan AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1’de verilmiştir. Kimyasal kompozisyon analizi Ankara KOSGEB laboratuvarlarında yapılmıştır.

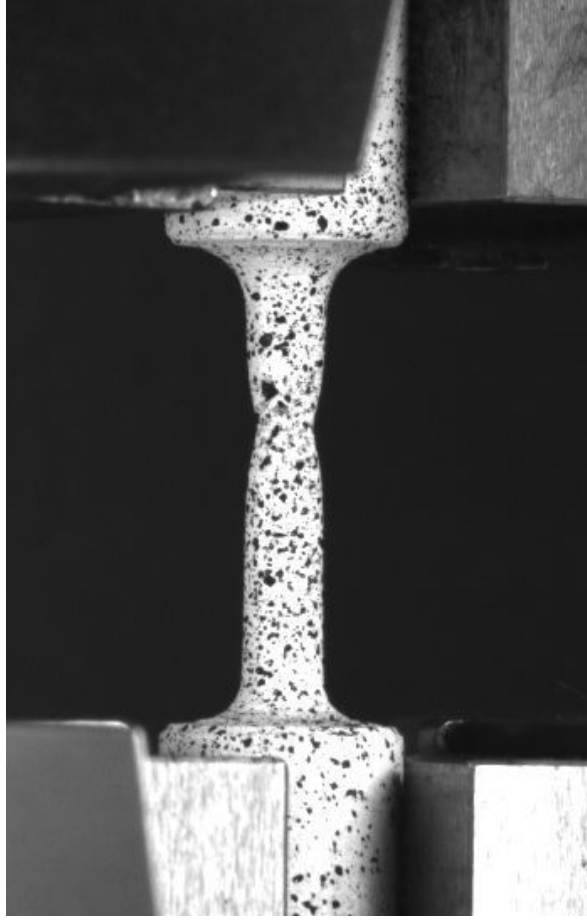
Çizelge 3.1 Kullanılan AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Ağırlıkça %)

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Ağr.%	0,428	0,779	0,260	1,090	0,154	0,210

Çekme testleri (ASTM E8) test standardına göre hazırlanan 7 adet numune ile Instron 8872 servo hidrolik test cihazında “BlueHill” yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de çekme deneyinin yapılışı esnasında numune kopmadan önce numunenin boyun verme anı görüntüsü görülmektedir. Elde edilen mekanik değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. AISI 4140 çelik malzemenin mekanik özellikleri

	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme gerilmesi (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
AISI 4140	483	500	213



Şekil 3.1. Çekme deneyi numune görüntüsü

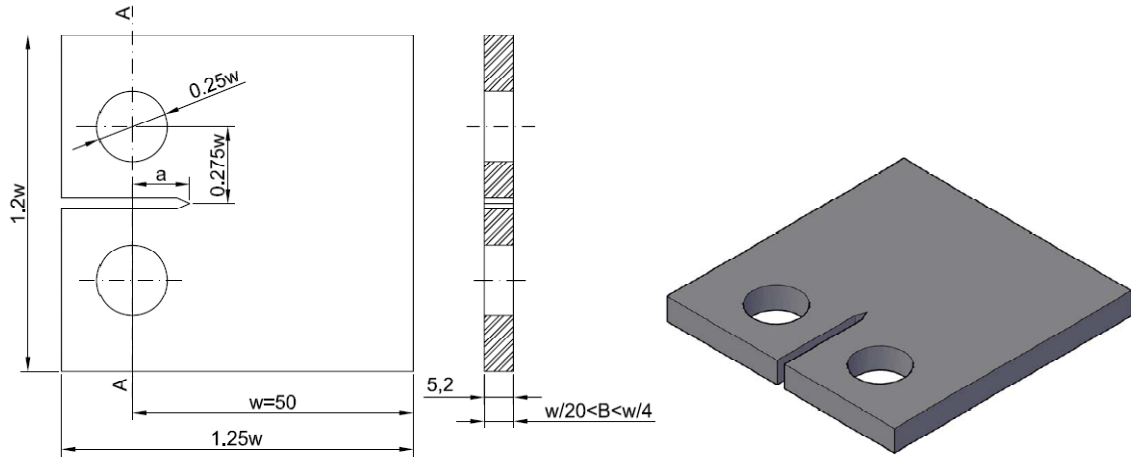
* renk karışıklığı oluşturmak için numune boyanmıştır.

3.1.1. Numune boyutu ve hazırlanması

Yorulma çatlak gelişim (YÇG-Fatigue Crack Growth FCG) testleri, ASTM E647 (2008) test standardına göre CT (compact tension) bir kenarı üzerinde çentik açılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Literatürde bu tür çalışmalarda genellikle CT ya da MT (middle tension) numunesi kullanılır (Liljedahl *et al.* 2008; Romeiro *et al.* 2009; Varfolomeev *et al.* 2010). Her iki numunenin kendine has avantaj ve dezavantajları vardır. CT numunesi, çatlak gelişim davranışını test etmede diğer bazı numune türlerine göre daha az sayıda numune gerektirmektedir. CT numunesi bası yüklenmesi durumunda çatlak ucunda belirsizlikler ortaya çıkardığından çeki-bası yüklemesinde tavsiye edilmez. Daha çok çeki-çeki yüklemesine elverişlidir. Literatürde

çeki-bası yüklemesi ile çalışılacaksa genellikle MT numunesi tercih edilmektedir (Romeiro *et al.* 2009). Anizotropik malzemelerde ya da süreksiz yükleme durumlarında da yine CT numunesi yerine MT numunesi ya da ESET (Eccentrically-Loaded Single Edge Crack Tension) numunesi kullanmak daha uygun olur (ASTM E647 2008). Bu çalışmada çeki-çeki yük şartları altında çalışılacağından CT numunesi tercih edilmiştir.

Kullanılan ASTM E647-08 test standardına göre tasarlanmış olan CT numunesinin teknik resmi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Yorulma çatlak gelişim oranı testi için standart CT numunesi (ASTM E647 2008)

*Yüzeyler $R_a = 0.8$ yada daha yüksek kalite, Min $w=25\text{mm}$ olmalı

Numunenin kalınlık yönündeki kırılma eğrisine göre kalınlık B ve genişlik W belirli limitler arasında bağımsız olarak değişkenlik gösterebilir. CT numunesi için kalınlığın $W/20 \leq B \leq W/4$ arasında olması tavsiye edilir (ASTM E647 2008). Deneylerde kullanılan numunelerin kalınlıkları bu limitler içersinde kalacak şekilde seçilmiştir.

Bu metot ile doğru bir değerlendirme yapabilmek için, uygulanan bütün yüklerde malzeme elastik davranış göstermelidir. Düzlemsel ve spesifik numune yapılandırmasında minimum numune boyutu için temel gereklilik budur. Ancak çatlak

ucunda plastik davranış kaçınılmazdır. Bu durum ihmal edilebilir ve yaklaşım tarzımızda bir değişikliğe sebep teşkil etmez.

Hazırlanan CT numunesi standarda istendiği üzere aşağıdaki bağıntıyı sağlamaktadır.

$$(w-a) \geq (4/\pi) (K_{\max}/\sigma_a)^2 \quad (3.1)$$

Burada, $(w-a)$: numunenin çatlaksız bölümü (Şekil 3.2),

σ_a : Yorulma çatlak gelişiminin ölçüldüğü sıcaklıktaki akma dayanımıdır.

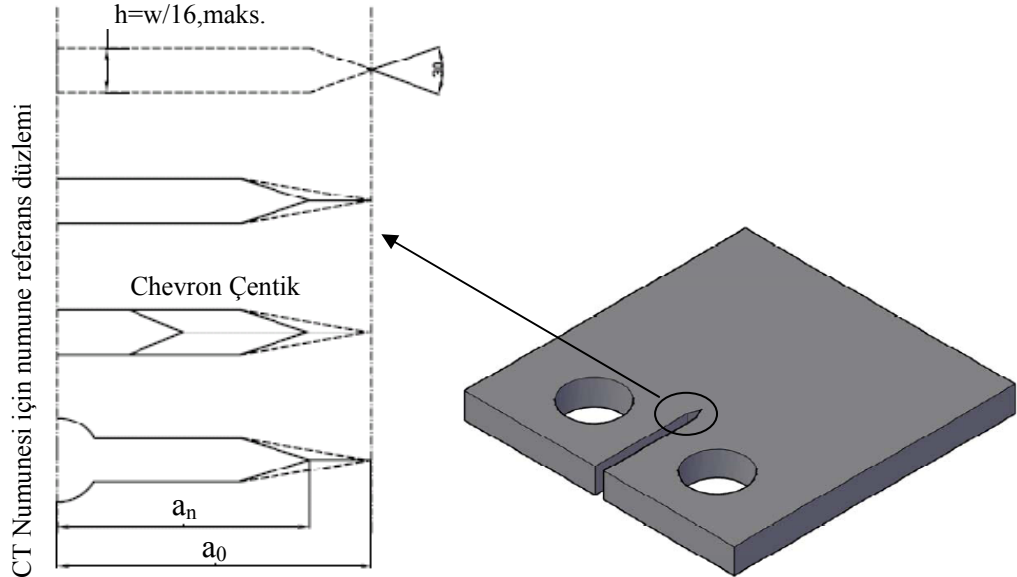
Bu test metoduna göre geçerli bir sonuç elde etmek için uygulanan bütün yüklerde elastik gerilme durumu ağır basmalıdır. Numune boyutu için çeşitli numune türlerinde geçerli olmak üzere, sabit sıcaklık ve yük oranı altında düşük şekil değiştirme sertleşmesine uğramış malzemelerde $\sigma_{ULT}/\sigma_{ys} \leq 1.3$ dür. Bu gerekliliklere göre numune boyutları için ilk önce ön deneyler yapılmış, literatür incelenmiş bilahare ASTM E 647'e uygun olarak numune boyutlarına Şekil 3.2'de gösterilmiş olan son hâli verilmiştir.

Numunenin B/w oranı küçük tutularak kalınlık yönünde artık gerilmelerin etkisi azaltılmak suretiyle çatlağın düşey yönde gelişimi azaltılabilir (ASTM E647 2008). Artık gerilmelerin çatlak gelişimindeki etkisi en aza indirgeyebilmek için numunenin şekli ve boyutu dikkatlice seçilmiştir. Numunenin bu şekilde düzenlenmesiyle da/dN ve ΔK nın hesaplanmasında karışıklıklara sebep olan çatlak kavislenmesi ve diğer çatlak önündeki düzensizlikler en aza indirgenmiştir. Artık gerilmelerin çatlak ilerleme yönüne paralel olması da çatlağın tutulması ya da çatlak ucu civarında açılma momenti gibi şaşırtıcı test sonuçları verebilmektedir. Bu durum CT numunesi gibi ön çentikli numunelerde kısmen etkilidir. Bu numunelerde açılmış çatlak ağzında önemli miktarda hareket gözlenebilir. Numune üzerine çentik açılırken oluşacak artık gerilme alanının küçük olması önemlidir. Çatlağın, çeki ya da bası alanının içine tamamen gömüleceği kadar büyük bir artık gerilme alanı mevcut ise çatlak ucunda oluşan gerilme, uygulanan

tekrarlı yüklere göre hesaplanandan farklı olacaktır. Bu durumda uygulanacak tek yol farklı bir numune yapılandırmasına gitmek ya da $da/dN-\Delta K$ ilişkisinde artık gerilmeleri önemsemek suretiyle ele alarak değerlendirme yapmaktır.

Bundan dolayı test standardı yorulma çatlak başlangıcı için açılacak çentiği tanımlamıştır. Bilahare yeterince ince bir çatlak başlangıcı için ön yorulma çatlak oluşturulmasını gerekli kılmıştır. Şekil 3.3’de numune üzerine açılacak olan çentiğe ait detaylar verilmiştir.

Yüklemeye noktasından itibaren $a_n = 0,2W$ kadar ön çatlak açılmış olmalıdır. Şekil 3.3’de CT numunesi ve ön çatlak detayları verilmiştir. Standart numunede ön çatlak için çentik; tel erezyon, talaşlı işleme ya da testere ile kesme yoluyla oluşturulabilir. Bu çalışmada ön çatlak başlatmak amacıyla hassas bir işçilik kullanılarak talaşlı işleme yöntemiyle çentik açılmıştır.



Şekil 3.3. Çentik detayı ve minimum yorulma ön çatlak

*Minimum yorulma ön çatlak: 0,1B, h, 1,0mm hangisi daha büyük ise (ASTM E647 2008)

3.1.2. Plazma nitrürleme işlemi

Plazma ile nitrürleme işlemi Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde imal edilen ve Şekil 3.4’de gösterilen laboratuvar tipi deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Vakum ünitesi, gaz dağıtım tertibatı, güç ünitesi ve paslanmaz çelik vakum odası, plazma ile nitrürleme ünitesinin temel elemanlarını oluşturmaktadır.

Vakum odası içerisine, anot ve katot yerleştirilmiş olup, tam orta noktaya yerleştirilen katot numune tutucu olarak kullanılmaktadır. Katoda, izoleli bir şekilde negatif kutup ve termokupul bağlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri katot üzerinde bulunan numunelerin altından açılan delikten geçirilen 0.5mm çapında Ni-Cr-Ni termokupuldan alınmıştır. Numuneler silindirik bir anotla çevrilidir. Bu silindirik anot vasıtası ile numuneler, plazma içerisinde homojen bir şekilde bombardıman edilmektedir.



Şekil 3.4. Plazma nitrürasyon işlemi uygulama görüntüsü

3.1.3. Yapısal ve mekanik özelliklerin tayini

XRD Çalışmaları: AISI 4140 çeliği üzerine plazma nitrürleme işlemiyle oluşturulan nitrür tabakasının kristalografik yönelmelerin tespitinde, $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ (0,154 nm) dalga boyuna sahip Cu-K α kaynaklı Rigaku-2000D/Max XRD (X ışını kırınım ölçer) cihazı kullanılmıştır. Çalışma şartları olarak 30–90° tarama açısı aralığında, 2,5 derece/dak tarama hızında, 0,1 derece tarama adımında ve 30mA 30kV enerji değerlerinde analizler yapılmıştır. Elde edilen veriler, XRD cihazını kontrol eden bilgisayarda mevcut standart JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) pik listeleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Mikro Sertlik Çalışmaları: Çelik taban malzemeler üzerinde plazma nitrürleme yöntemiyle oluşturulan nitrür tabakasının mikro sertlik ölçümleri, piramit uç ile 25g yük ve 15 saniye yük uygulama süresi altında Buehler Micromet 2001 Mikro sertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır.

SEM (Scanning Electron Microscop) Çalışmaları: Numunenin kırılma yüzeyleri, iç yapısı ve yüzey görünümünü görsel olarak incelemek amacıyla “Jeol 6400” marka Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır.

3.2. Çatlak İlerleme Testleri

ASTM E647 (2008) test standardında ön görüldüğü şekilde $w=50\text{mm}$ anma ölçüsünde, Şekil 3.2’de gösterilmiş olan CT (Compact Tension) numuneleri imal edilmiştir. Daha sonra 850°C sıcaklıkta argon gazı ortamında yarım saat süreyle normalizasyon tavına tabi tutularak durgun argon gazı atmosferinde soğumaya bırakılmıştır. Numunenin görüntü alınacak yüzeyleri temizlenip zımparalanarak 3 μm ’lik alümina ile parlatılmıştır.

Plazma nitrürleme işlemi yapılacak olan numuneler 500°C sıcaklıkta %50 H₂-N₂ gaz karışımında 2 saat süreyle plazma nitrürasyon işlemine tabi tutulmuştur.

ASTM E647-08 test standardına uygun olarak yapılan yorulma çatlak gelişim deney şartları: Servo hidrolik test cihazına (Instron 8872) bağlanan numuneler yük kontrollü olarak 5000 N'luk dinamik yük uygulanarak takriben net 6,7mm boyunda ASTM E647-08 test standardına uygun olarak yorulma ön çatlak oluşturuluncaya kadar yorulma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.5). Yorulma çatlak gelişimi (YÇG-Fatigue Crack Growth FCG) deneyi; eksenel çeki-çeki yükü altında $R=0,1$ ($\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$), sinüs eğrisi dalga formunda, oda sıcaklığında ve ortam havasında yapılmıştır. Hem nitrürlenmiş olan hem de işlemsiz numuneler önce sabit genlik altında yorulma çatlak ilerlemesi testine tutulmuştur. Birinci yükleme durumu olarak 500–5000N ($R=0,1$), 30Hz sabit genlikli yorulma yüklemesi (SGY) uygulanmıştır. Bu yükleme durumu hem işlemsiz hem de nitrürlenmiş numuneler için tekrarlanmıştır. Elde edilen değerler daha sonraki deneyler için referans değer teşkil etmiştir. Yapılan bütün deneylerden elde edilen değerler, işlemsiz numuneye sabit genlikli dinamik yükleme uygulanması durumundan elde edilen YÇG ömrü ile yüzde (%) olarak mukayese edilerek değerlendirme yapılmıştır. Daha sonra her deneyden dörder tekrar yapılmak üzere ve aşırı yükleme oranı 2 olmak üzere, AY bloğu çevrim sayısı, 1, 10, 20, 100, 1000 ve 3000 çevrim olan değişken genlikli yükleme (DGY) deneyleri yapılmıştır. Bilahare aşırı yükleme oranı ($AYO- R_{AY}$) değiştirilerek 1 çevrimlik AYO 1,5, 2, 2,5 ve 3 olan farklı aşırı yükleme oranlarıyla DGY deneyleri yapılmıştır. Yapılan bütün deneyler hem işlemsiz hem de nitrürlenmiş olan numuneler için uygulanmıştır.

Sabit genlikli yüklemelerde $P_{\min}=500N$, $P_{\max}=5000N$. Aşırı yükleme deneylerinde ise $P_{\min}=500N$ ve $P_{\max}$: $R_{AY}=1,5$ için 7500N, 2 için 10000N, 2,5 için 12500N ve 3 için 15000N alınmıştır.

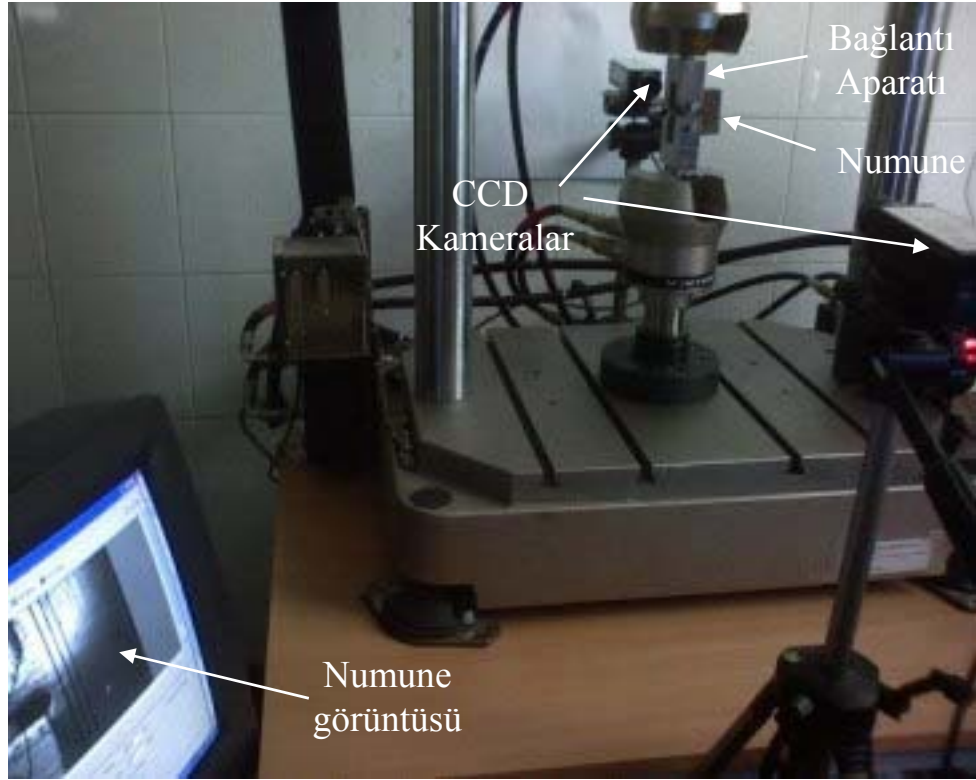
Yorulma çatlaklarının ilerlemesi tespiti için her iki yüzeyden de görüntü alınarak görüntü üzerinden ölçümler yapılmak suretiyle değerlendirilme yapılmıştır. Toplam çatlak boyu $a=17.5mm$ değeri deney başlangıç noktası olarak kabul edilmiş deney bu noktadan

sonra başlatılmıştır. Çatlak boyu ve buna karşılık gelen çevrim sayıları tespitinde, çatlak boyu 20mm'ye ulaştıktan sonraki değerler dikkate alınmıştır.

Görüntü alma işlemi: Görüntüleri almak için iki adet endüstriyel tip SONY marka dijital video kamera kullanılmıştır. Görüntü toplama sistemi toplam dört farklı birimden oluşmaktadır. Bunlar:

- SONY XCD-X910 C dijital kameralar,
- C Mount Lensler (50, 25 ve 10mm sabit odaklı-fixed focal length),
- Görüntü toplama kartı (NI IEEE-1394 FireWire Driver/Board),
- LabView dilinde yazılmış kullanıcı ara yüz programı,

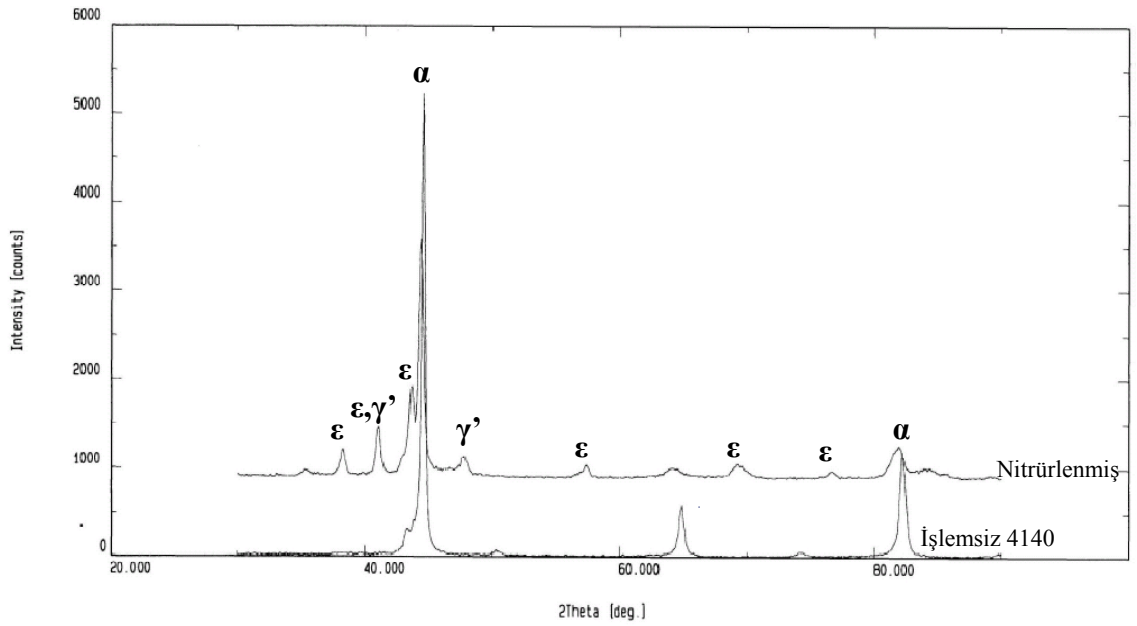
Kullanılan kameraların bilgisayarla iletişimi FireWire olarak isimlendirilen bir iletişim portu aracılığıyla sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan her iki kamera, ayrı ayrı her bir kamera için bir adet olmak üzere toplam iki adet iletişim portuna bağlanarak alınan görüntülerin bilgisayara iletimi sağlanmıştır. 50, 25 ve 10mm odak uzunluklarına sahip lensler iki kamera üzerinde kullanıldığından teste tabi tutulan deney örneğinin her iki yüzeyinde ayrı ayrı görüntü alınmıştır. Böylelikle numunenin her iki yüzeyi arasındaki çatlak ilerleme miktarları arasındaki fark takip edilerek deneyin geçerli olduğu teyit edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. YÇG test düzeneği ve dijital görüntü alma işlemi

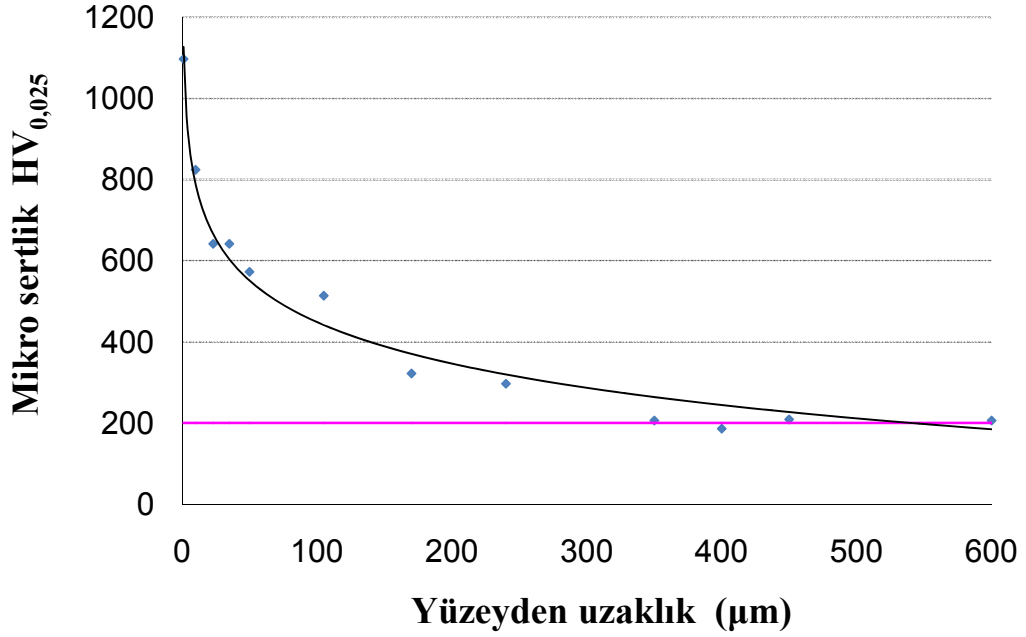
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin XRD analizi Şekil 4.1’de verilmiştir. Nitrürleme işlem sonrasında yüzeyde ϵ ve γ' fazlarından oluşan demir nitrürler oluşmuştur.



Şekil 4.1. Plazma nitrürleme işlemi sonrası oluşan kristalografik yapıların X Ray difraktometre analizi (ϵ :Fe₂₋₃N, γ' :Fe₄-N)

Şekil 4.2’de AISI 4140 çeliğinde işlemsiz taban malzeme ile nitrürlenmiş olan yüzeye ait yüzeyden merkeze doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Nitrürlenmiş numune için en yüksek sertlik yüzeyde oluşmuştur. İşlemsiz şartlarda taban malzemenin sertliği ise 200 HV_{0,025} olarak ölçülmüştür. Nitrürlenmiş malzemede yüksek yüzey sertliğinin oluşumu, yüzeyde meydana gelen nitrür tabakasından kaynaklanmaktadır. Nitrür tabakası iki kısımdan meydana gelir. Birincisi en dıştaki beyaz tabakadır. Beyaz tabakada ϵ :Fe₂₋₃N, γ' :Fe₄-N yapıları meydana gelmiştir. Diğer tabaka difüzyon tabakasıdır. Difüzyon tabakasında malzemenin bünyesinde bulunan Cr, Al, Mo ve Mn gibi alaşım elementleri ile azot birleşerek sertleşme işlemini meydana getirmektedir (Alsaran 2001).



Şekil 4.2. AISI 4140 çeliğine uygulanan plazma nitrürleme işlemi sonrasında yüzeyden itibaren sertlik dağılımı

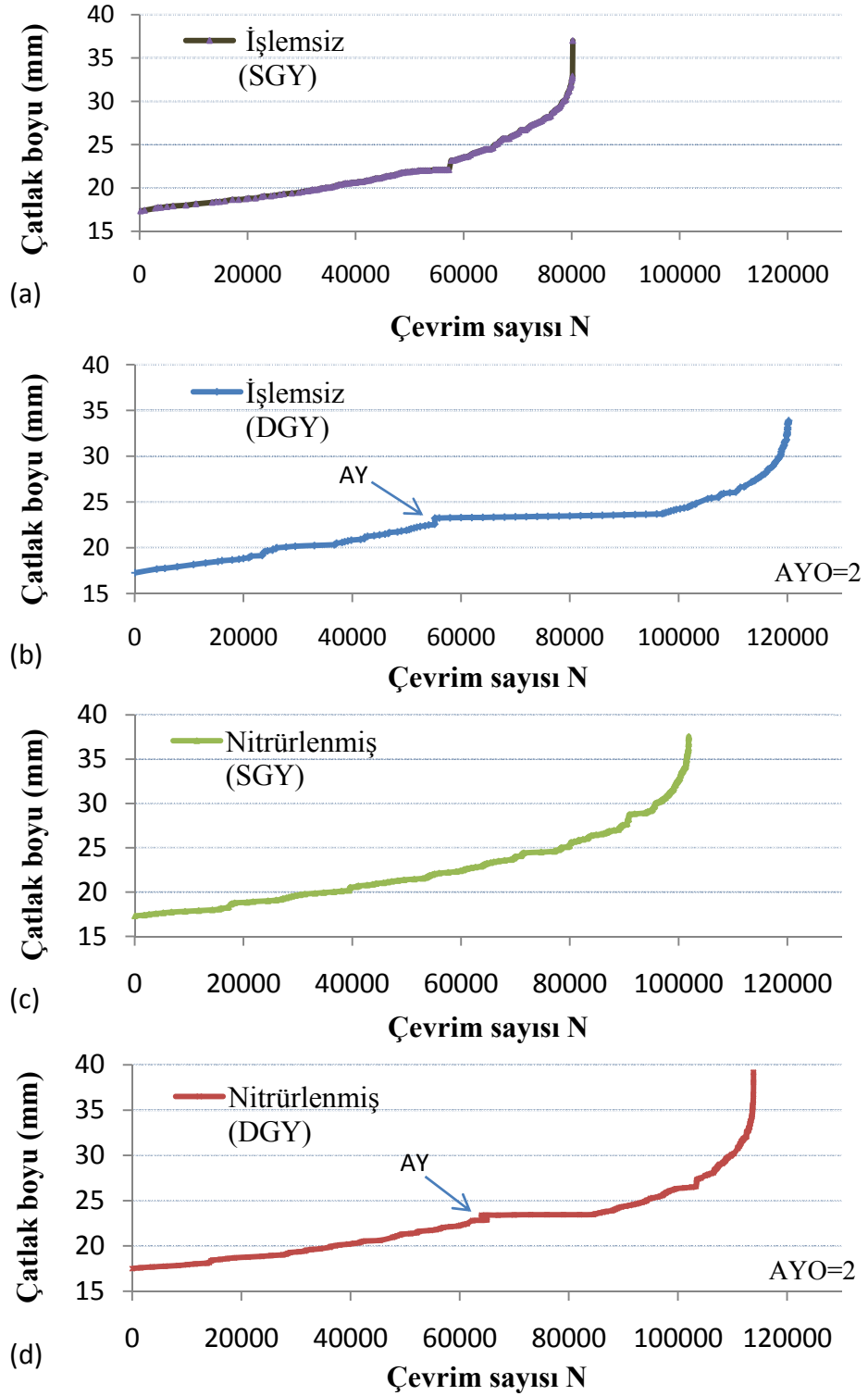
4.1. Plazma Nitrürleme İşleminin Değişken Genlikli Yük Altında Yorulma Çatlak Gelişimi Üzerindeki Etkisini Araştırma Çalışmaları

Plazma nitrürleme işleminin değişken genlikli yük altında yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkisini araştırma çalışmaları üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar; sabit genlikli yükleme ve 10 çevrimlik blok aşırı yükleme altında çatlak gelişim davranışını araştırma çalışmaları, aşırı yükleme çevrim sayısının yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini araştırma çalışmaları ve aşırı yükleme oranını yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini araştırma çalışmaları şeklinde olmuştur

4.1.1. Sabit genlikli yükleme ve 10 çevrimlik blok aşırı yükleme altında çatlak gelişim davranışını araştırma çalışmaları

İşlemsiz ve nitrülenmiş AISI 4140 çeliği için SGY ve DGY şartlarında elde edilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrileri Şekil 4.3’de karşılaştırılmıştır (her bir eğri ortalama değerleri değil, yalnızca bir deneyi temsil etmektedir). SGY sabit sinüs eğrisi dalga formulu yorulma yüklemesini temsil etmektedir. Burada yük $P_{min}=500N$, $P_{max}=5000N$ ve frekans 30Hz dir. Plazma nitrüleme işlemi SGY şartları altında YÇG ömrünü önemli ölçüde arttırmıştır. Değerlendirmeler yapılırken çalışma aralığı olarak w ; numune anma ölçüsü olmak üzere, çatlak boyunun $a/w= 0,40$ ($a=20mm$) olduğu nokta ile son kırılma arasındaki bölgede ki çatlak ilerleme ömrü esas alınmıştır. Aşırı yükleme noktası olarak $a/w=0,45$ ($a=22,5mm$) seçilmiştir. İşlemsiz numune için, SGY altında yorulma çatlak gelişim ömrü ortalama 46000 çevrim olarak ölçülmüştür. Nitrülenmiş numune için SGY altında YÇG ömrü ortalama 62400 çevrim olarak ölçülmüştür. Bu durum SGY altında YÇG ömründe %37 lik ömür artışını göstermektedir. Bu ömür artışı (Şekil 4.3(a) ve (b) eğrileri) beklenmekte idi. Çünkü plazma nitrülemenin yüzey setliğini ve toplam yorulma ömrünü arttırdığı bilinmektedir (Çelik and Karadeniz 1995; Şirin *et al.* 2008; Terres *et al.* 2010). Yüzeyde sertliğin artmasıyla dislokasyon hareketleri de zorlaşmaktadır (Sadeler and Şengül 2006). Yüksek çevrimli yorulma direncinin artması, nitrüleme sonrasında sert yüzey tabakası oluşumu ve makro ve mikro bası artık gerilmeleri oluşmasıyla ilgilidir (Terent *et al.* 2007).

İşlemsiz numuneye 10 çevrimlik blok AY ($K_{AY}/K_{max}=2$) uygulanması halinde çatlak ilerlemesi oldukça uzun bir süre durmuştur (Şekil 4.3(a), (d)). Nitrülenmiş numuneye AY uygulandığında çatlak ilerlemesi bir miktar gecikmiştir (Şekil 4.3(b), (c)). Burada, nitrülenmiş olan numunede AY’nin sebep olduğu çatlak gecikmesinin, işlemsiz olana oranla çok daha düşük seviyede kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.3. AISI 4140 çeliği CT numunesi çatlak gelişim diyagramı

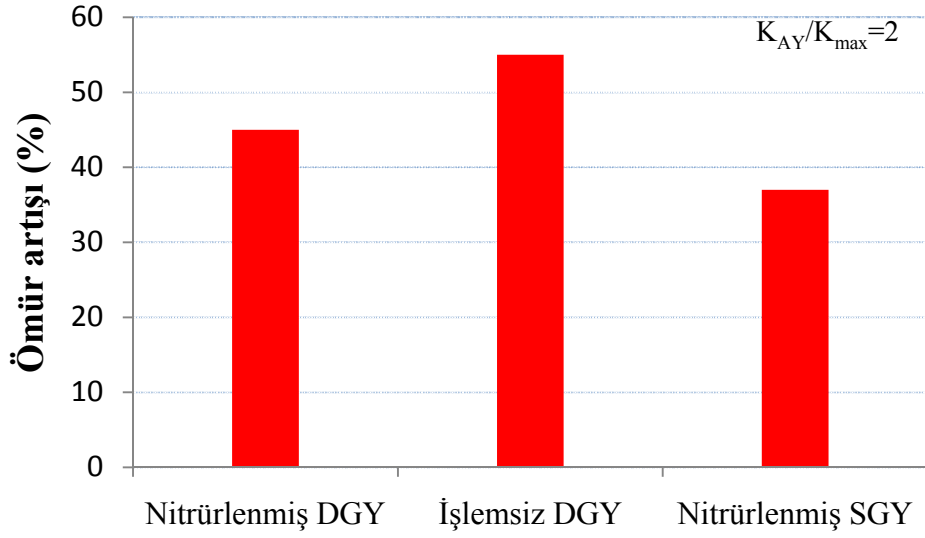
*(a) işlemsiz, (b) işlemsiz 10 çevrim AY, (c) nitrürlenmiş, (d) nitrürlenmiş 10 çevrim AY

DGY (AYO=2 olan 10 çevrimlik AY bloğu) altında YÇG ömrü üzerinde plazma nitrürlemenin etkisi Şekil 4.1(c) ve (d) eğrilerinde görünmektedir. İşlemsiz numune için (Şekil 4.3 (d) eğrisi) AY uygulaması YÇG ömrünü 46000 çevrimden 71200 çevrime (%55 artış (Şekil 4.4)) çıkarmıştır. Nitrürlenmiş numune için ise AY uygulaması YÇG ömrünü 62252 çevrimden 67061 çevrime çıkarmıştır. Bu sonuç AY'nin, nitrürlenmiş olan numunede, işlemsiz olana göre YÇG ömrünü %45 arttırdığı ve nitrülenmiş olana göre de %7 arttırmış olduğunu gösterir. AY sonrasında çatlak ilerlemesinin durduğu ya da yavaşladığı çevrim sayısı işlemsiz numune için yaklaşık 40000 çevrim olarak gerçekleşmiş iken, nitrürlenmiş numunede bu değer 18000 çevrimin altında kalmıştır. Bu değerler ele alındığında, plazma nitrürlemenin, AY'nin oluşturduğu çatlak gecikmesi üzerinde olumsuz etki yaptığı görülmektedir.

Çizelge 4.3'de SGY ve DGY durumunda, plazma nitrürlemenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde etkisini gösteren YÇG ömür değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı aşırı yükleme oranlarında yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde plazma nitrürlemenin ve aşırı yüklemenin etkisi

	Sabit Genlikli Yüklemde ömür	Değişken Genlikli Yüklemde (10 çevrim AY) ömür	İşlemsiz SGY durumuna göre ömür artışı (%)
İşlemsiz	46000	71200	55
Nitrürlenmiş	62252	67061	45
Ömür artışı (%)	37		

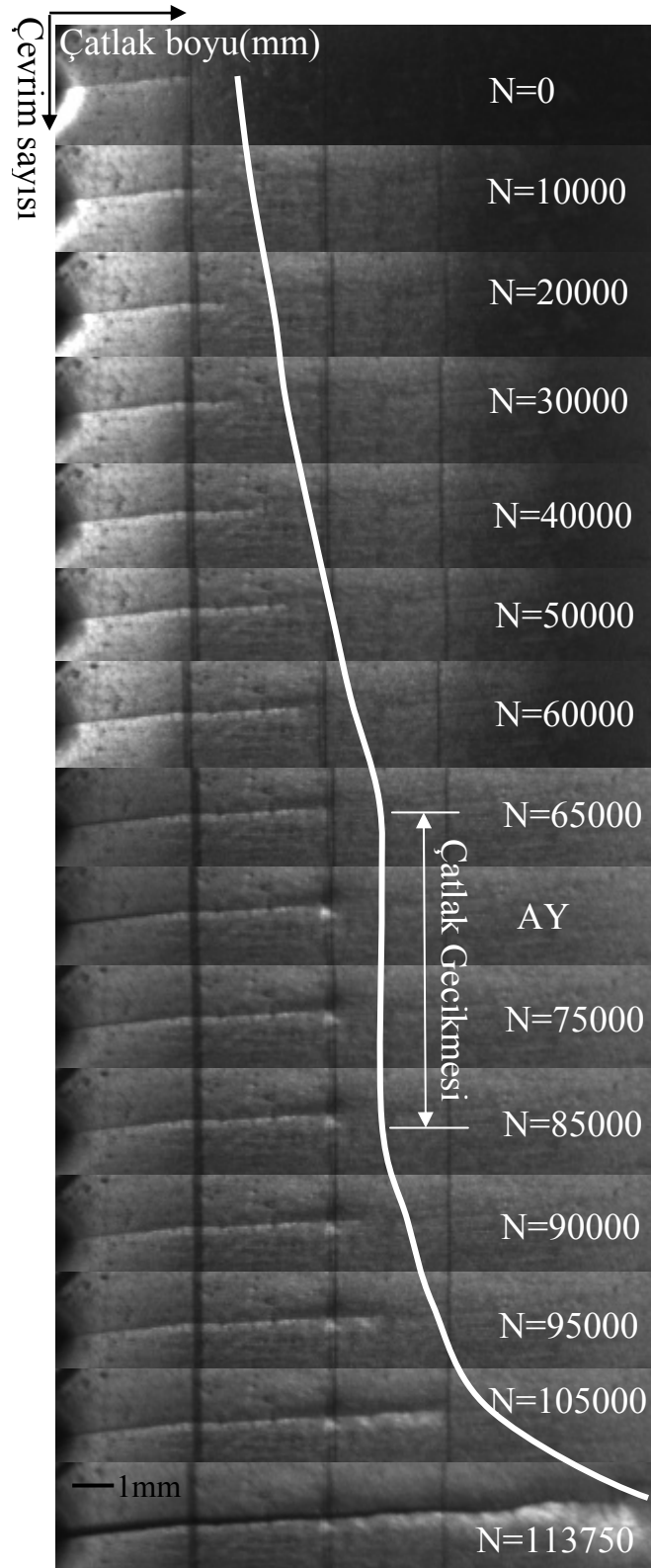


Şekil 4.4. SGY ve DGY altında nitrürlemenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerindeki etkisi

Şekil 4.4’de, İşlemsiz SGY durumundaki YÇG ömrü referans alınarak; nitrürlenmiş DGY, İşlemsiz DGY ve Nitrürlenmiş SGY durumlarındaki YÇG ömrü artışı yüzde (%) olarak verilmiştir. Plazma nitrürleme işlemi, %90 güven seviyesinde %5’lik hata payı ile SGY altında YÇG ömründe iyileşmeye (%37 artış) sebep olmuştur. Buna mukabil AY oranı 2 ($K_{AY}/K_{max}=2$) olan 10 çevrimlik blok AY uygulamasında ise; işlemsiz SGY durumuna göre YCG ömrü, işlemsiz olan %55 artmış iken nitrürlenmiş olan %45 artmıştır.

Nitrürlenmiş CT numunesinin 10 çevrimlik blok AY uygulaması durumunda elde edilen adım-adım çatlak ilerleme görüntüsü ve çatlak ilerleme durumunu temsil eden a-N eğrisi Şekil 4.5’de verilmiştir. AY uygulamasının ardından çatlak ilerlemesi 20000 çevrim kadar tamamen durmuştur. Daha sonra AY izinin aniden görülmesini (85000. çevrimde yorulma iz görülmez iken 90000. çevrimde ortaya çıkmıştır) müteakip çatlak ilerlemesi gittikçe hızlanarak numune tamamen kırılıncaya kadar devam etmiştir.

Ek 1’de verilen video 1’de 10 çevrimlik blok AY uygulanmış, işlemsiz CT numunesine ait çatlak ilerleme görüntüsü görülmektedir.

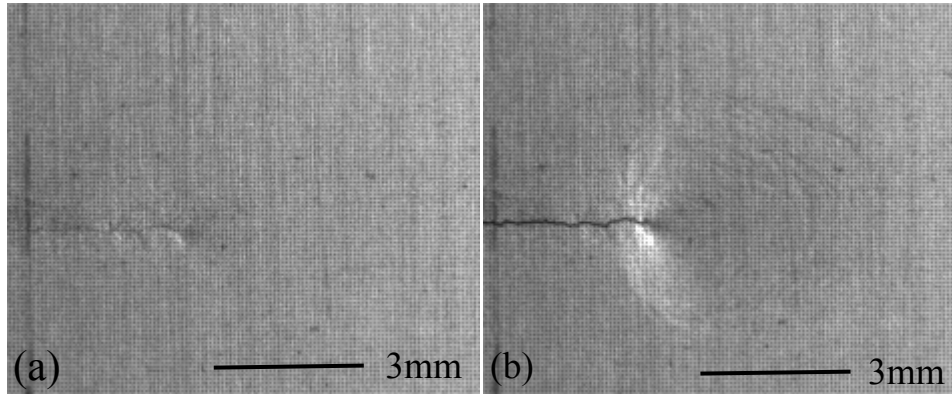


Şekil 4.5. Nitrürlenmiş CT numunesine ait çevrim sayılarına göre çatlak boyu görüntüleri

4.1.1.a. Çatlak ucu açılma deneyinde aşırı yüklemenin meydana getirdiği yüzey morfolojisi

AY uygulaması yorulma çatlak gelişimini önemli miktarda geciktirmektedir. AY ile ilgili ilk araştırmalarda bu durum AY sonrası oluşan büyük plastik bölgede bası artık gerilmelerinin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmekteydi. Daha sonraları, AY' nin oluşturduğu büyük plastik bölgede çatlak kapanmasının (Elber 1970) çatlak ilerlemesini yavaşlattığı fikri ön plana çıkmıştır. Ancak her ne şekilde olursa olsun bu iki teori de, çatlak ilerlemesindeki yavaşlamanın çatlak ucunda oluşan büyük plastik deformasyon ile ilgili olduğunu ileri sürmektedir (Schijve 2003).

Literatürde, çatlak ilerlemesindeki gecikmeye, plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasından kaynaklandığına dair deneysel çalışmalar mevcuttur (Shin and Fleck, 1987; Newman *et al.* 1988; Ward *et al.* 1989; Pereira *et al.* 2007; Schijve 2009). Şekil 4.6'de 10 çevrimlik 10000N değerindeki AY sonrasında çatlak ucunda oluşan büyük plastik bölgenin yüzey görüntüsü verilmiştir.

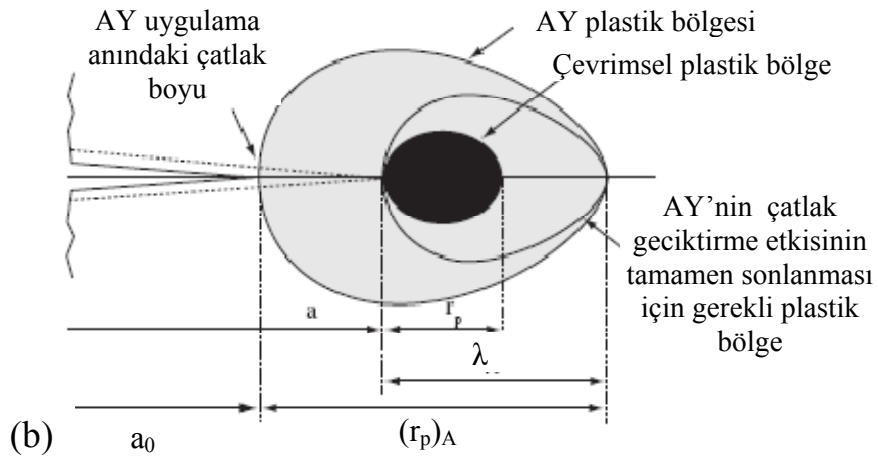
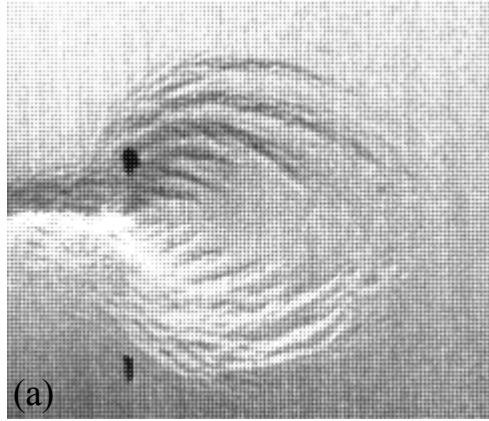


Şekil 4.6. Çatlak ucundaki plastik bölge yüzey görüntüsü

*(a) aşırı yükleme öncesi, (b) aşırı yükleme sonrası

Şekil 4.7'de AY neticesinde oluşan plastik bölgenin, deneysel olarak elde edilen yüzey görünümü ile Weehler teoreminde (Weehler 1972) teorik olarak çizilmiş olan şekli

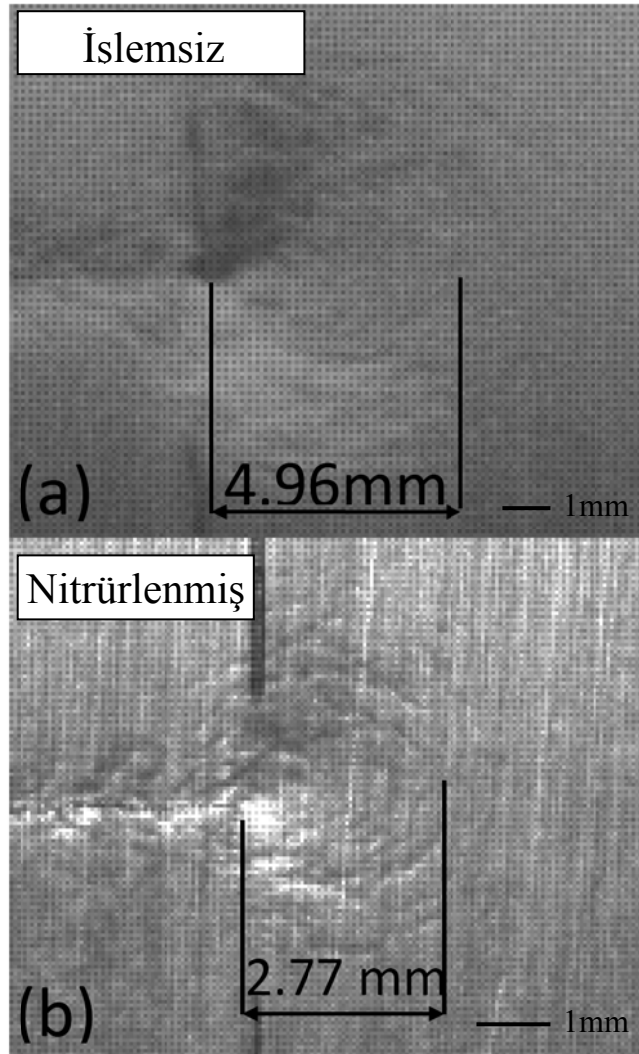
kıyaslanmıştır. Deneylerden elde edilen görüntü ile teorik çizim arasında büyük bir benzerlik olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.7. AY'nin oluşturduğu plastik bölge geometrisi

*(a) deneylerden elde ettiğimiz görüntü, (b) Weehler modeli (Pierra *et al.* 2007)

Şekil 4.8'de (a) işlemsiz, (b) nitrülenmiş numune için AY sonrasında çatlak ucunda oluşan plastik bölge büyüklükleri karşılaştırılmıştır. İşlemsiz numune için yüzeyde plastik bölge boyu 4,96mm olarak ölçülmüştür. Nitrülenmiş numune için ise 2,77mm olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm değerleri Şekil 4.2'de elde edilen işlemsiz numunenin, nitrülenmiş olandan daha uzun çatlak gecikmesi periyodu geçirmesi ile ve Elber'in (Elber 1970) plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanması teorisiyle uyum sağlamaktadır.



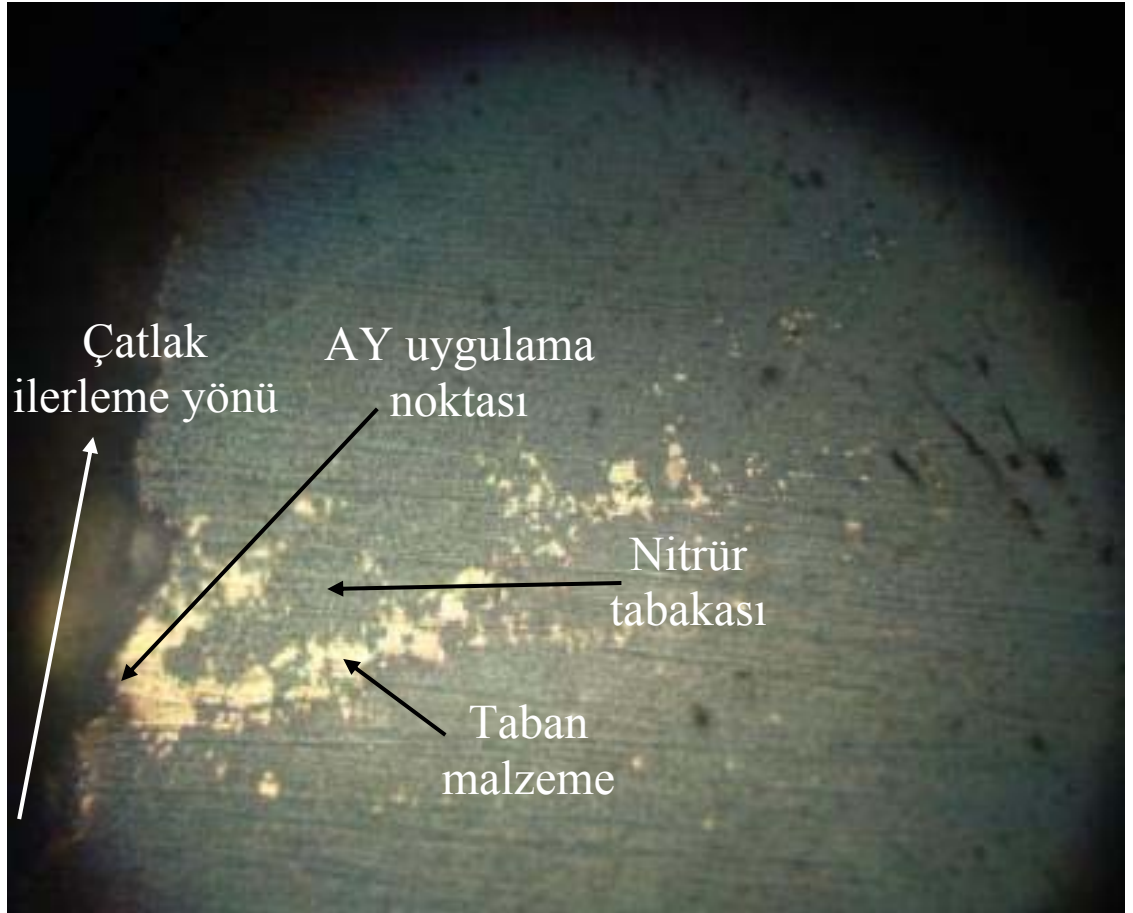
Şekil 4.8. AY sonrasında çatlak ucunda oluşan plastik bölge büyüklüklerinin karşılaştırılması

*(a) işlemsiz numune, (b) nitrülenmiş numune

YÇG deneyinde AY sonrasında işlemsiz numunede önemli miktarda çatlak gecikmesi oluşmuştur. Ancak nitrülenmiş numunede, işlemsize göre daha kısa bir çatlak gecikmesi rejimi meydana gelmiştir. Nitrülenmiş olan numunede AY esnasında sert nitrür tabakası, AY'nin çatlak ucunda oluşturduğu tahribatı sınırlandırmıştır. Dolayısıyla nitrülenmiş olan numunede çatlak ucunda daha küçük bir plastik bölge oluşmuş (Şekil 4.8) ve daha kısa bir çatlak gecikmesi süreci gerçekleşmiştir (Şekil 4.3, 4.4).

De la Cruz *et al.* (1998) yüzeydeki nitrür tabakası ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada elde ettikleri bulguları “plazma nitrürlenmiş malzemeler kompozit gibi davranırlar, yerel olarak kırılma tokluk değerleri çekirdek, geçiş bölgesi ve nitrür tabakasında farklılık arz eder. Nitrür tabakasının kırılma tokluğu $K_C=3,7 \text{ MPa m}^{1/2}$ olarak ölçüldü.” şeklinde ifade etmişlerdir.

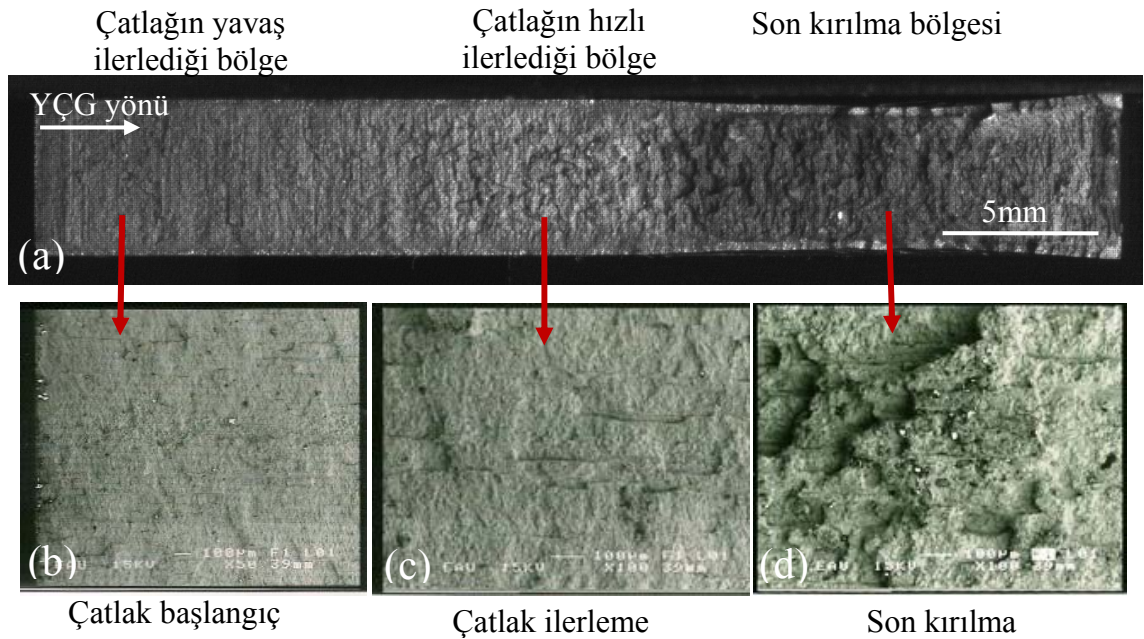
Şekil 4.9’da AY uygulaması esnasında yüzey hareketlerine direnç gösteren nitrür tabakasına ait kabarma ve dökülme durumu optik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.9. AY uygulamasından sonra yüzeydeki sert nitrür tabakasının kabarıp dökülmüş halinin optik görüntüsü

4.1.1.b. Yorulma çatlak gelişim deneyinde aşırı yüklemenin meydana getirdiği kırılma yüzeyi morfolojisi

İşlemsiz numunenin kırılma yüzeyinde taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere kırılma yüzey pürüzlülüğü çatlak ilerleme hızına göre değişim göstermiştir. Çatlağın ilk ilerleme evresi ile sonraki çatlak hızlanma evresi ve son kırılma anı farklılık arz etmektedir. Şekilde çatlağın ilk ilerleme evresinde, çatlağının düzgün olarak ilerlediği nispeten az pürüzlü homojen yorulma yüzeyi olduğu gözlenmektedir. Ancak çatlak bir miktar ilerledikten sonra yüzey pürüzlülüğünün giderek arttığı ve nihai kırılma esnasında oldukça pürüzlü bir bölgenin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yüzey ile iç bölgeler kıyaslandığında homojen bir görünüm izlenmiştir.



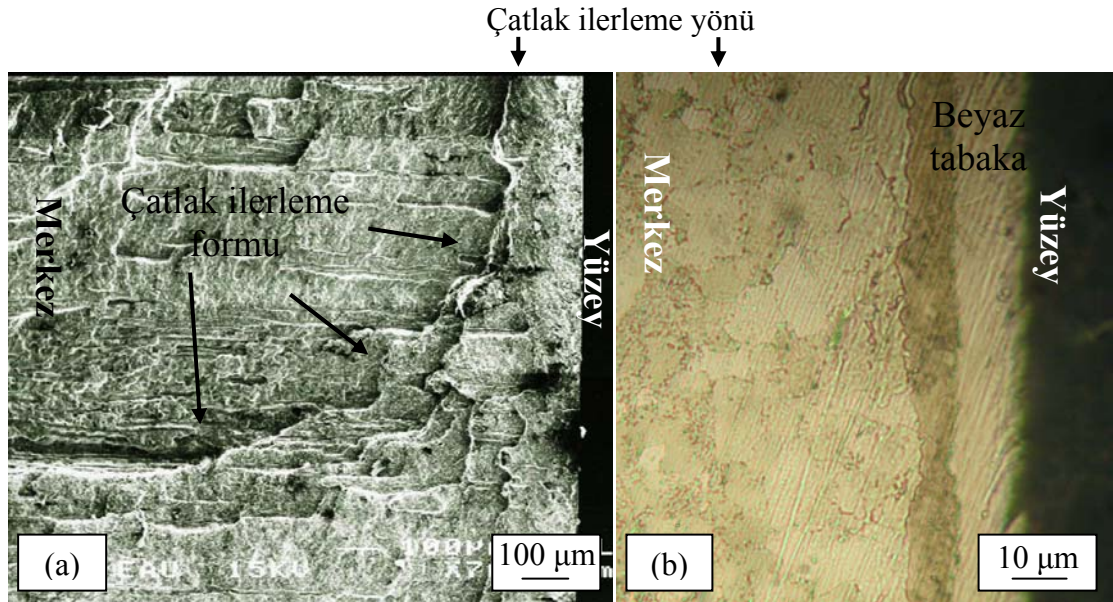
Şekil 4.10. İşlemsiz CT numunesinde kırılma yüzeylerine ait çatlak ilerleme evreleri SEM görüntüleri

*(a) CT numunesi kırılma yüzeyinin tamamını görüntüsü, (b) YÇG çatlak gelişim evresi, (c) çatlak hızlanma evresi, (d) son kırılma evresi

Şekil 4.10'da elde edilen görüntüden, çatlağın başlangıç evrelerinde yüzeyin az pürüzlü olup çatlak ilerledikçe pürüzlülüğün artması, tipik bir çatlak ilerleme rejimi göstererek,

çatlağın ilk önce yavaş ilerlediği sonra giderek hızlandığı ve sonunda aniden kırıldığı gözlenmiştir.

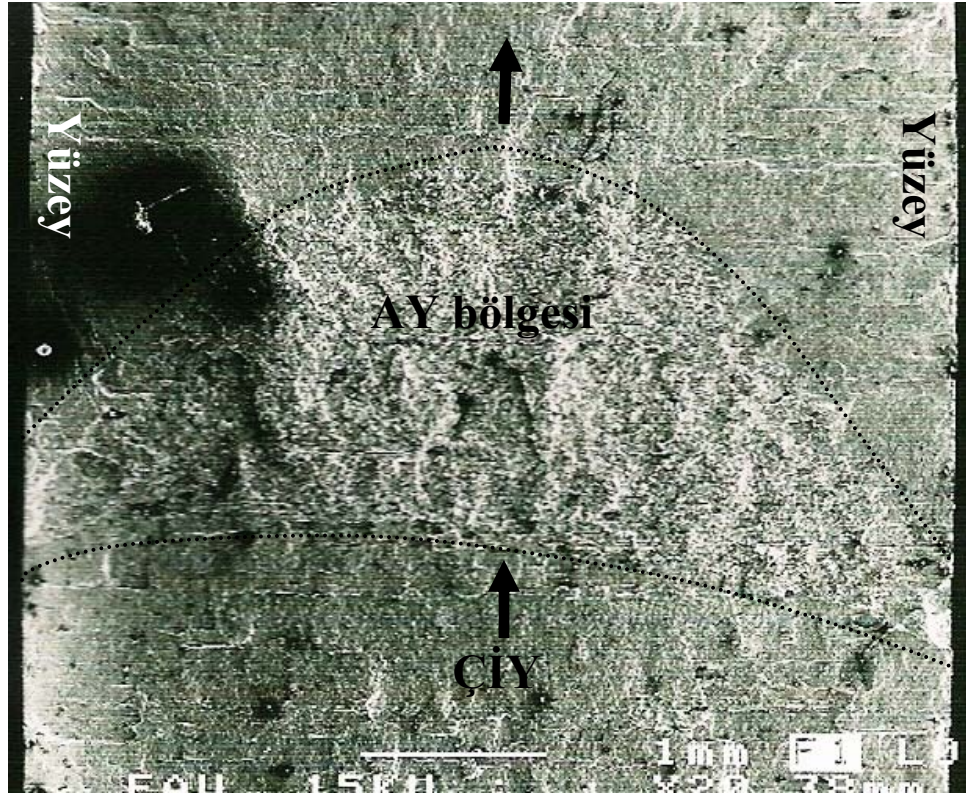
Şekil 4.11’de nitrülenmiş numunede kırılma yüzey şeklinin yüzey ile merkez arasındaki değişimi görülmektedir. Nitrülenmiş numunenin yüzeyi ile merkezi arasında homojen olmayan bir görünüm arz etmektedir. Şekil 4.11’de görülen sert yüzey tabakası SGY halinde çatlak gelişimini yavaşlatmaktadır. Ayrıca AY uygulamasında AY esnasında çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin büyüklüğünü sınırlandırmaktadır.



Şekil 4.11. Nitrülenmiş yüzey ile merkez arasındaki kırılma düzlemleri görüntüsü

*(a) kırılma yüzeyi SEM görüntüsü, (b) nitrülenmiş yüzeye ait kesit optik görüntüsü

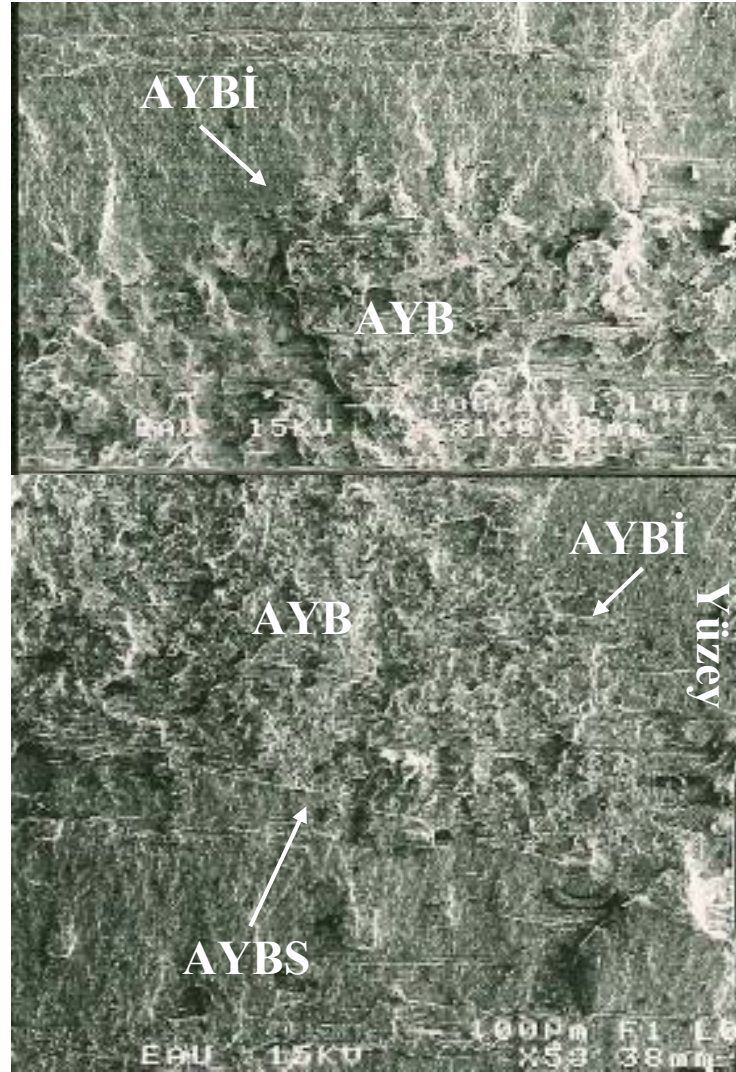
İşlemsiz ve nitrülenmiş numunelere 10 çevrimlik AY uygulanması durumunda, AY bölgesinde işlemsiz ve nitrülenmiş numuneler benzer görüntüler vermektedir. Aşırı yükleme öncesinde az pürüzlü hilal şeklinde ilerleyen düzgün bir görüntü mevcuttur. Aşırı yükleme bölgesinde hilal şeklinde pürüzlü bir yüzey oluştuktan sonra takip eden sabit genlikli yükleme bölgesinde yine düzgün az pürüzlü bir yüzey görünümü sergilemektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Aşırı yükleme bölgesi kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

*ÇİY: çatlak ilerleme yönü

Şekil 4.13’da SGY bölgesi-AY bölgesi sınırlarını göstermektedir. AY uygulanması durumunda, AY uygulanan bölge kırılma yüzeyinde yerel olarak ani kırılma görünümü mevcuttur. Morency (2006) tarafından yorulma bölgesinden hızlı kırılma bölgesine benzer geçiş görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.13. Aşırı yükleme-aşırı yükleme sonrası bölge sınırı SEM görüntüsü

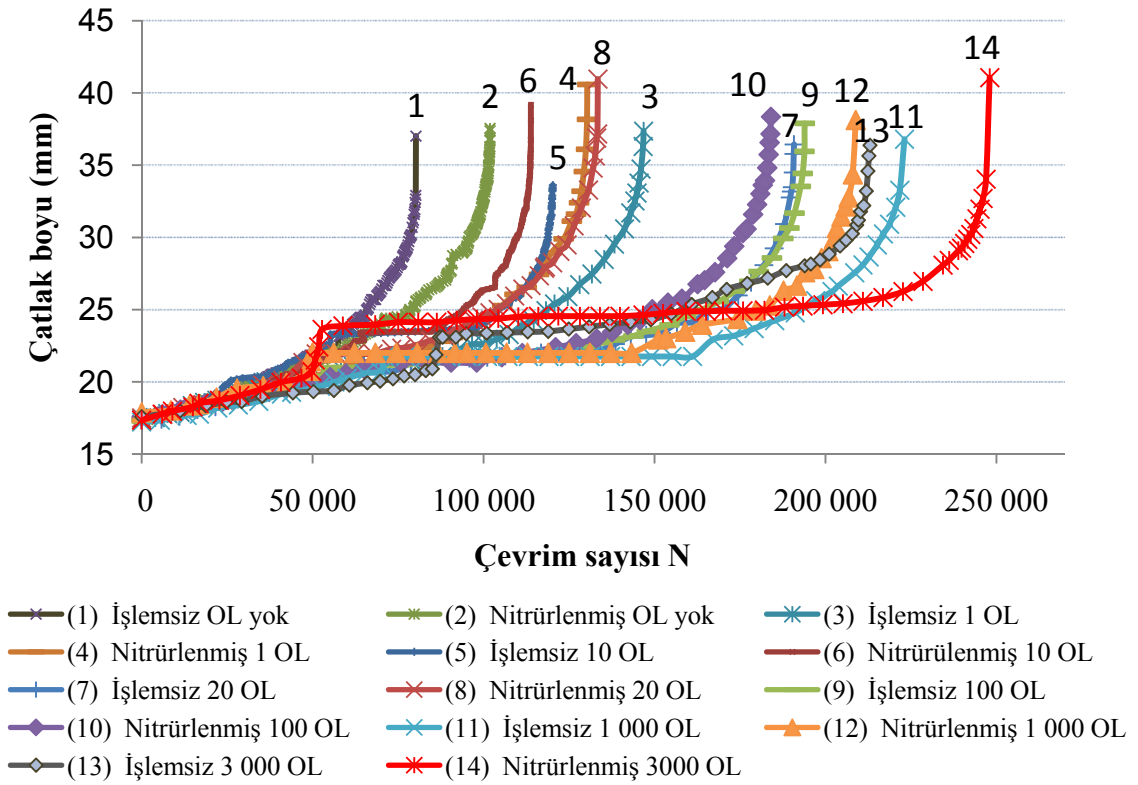
*AYBS: AY başlangıç sınırı, AYBİ: AY bitiş sınırı, AYB: AY bölgesi

4.1.2. Aşırı yükleme çevrim sayısının yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini araştırma çalışmaları

Çatlak, Aşırı yükleme esnasında blok aşırı yükleme durumunda, tek aşırı yükleme durumuna göre daha fazla ilerler. Çatlak boyu, blok aşırı yüklemekten sonra, tek aşırı yüklemeye göre daha uzun olacağından, çatlak ucu, blok aşırı yükleme çalışmasında aşırı yüklemekten sonra daha büyük değerlerde gerilmeye maruz kalacaktır. Dolayısıyla blok AY deneyinde çatlağın daha hızlı ilerlemesi beklenir. Ancak yapılan deneysel çalışmada durumun farklı olduğu görülmüştür. Çatlak gecikmesinin, blok AY

durumunda tek AY durumuna göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi, blok AY durumunda çatlak ucunda daha fazla tahribat ve daha büyük plastik bölge oluşmasıdır.

Şekil 4.14’de işlemsiz ve nitrürlenmiş, SGY ve farklı çevrim sayılı (1, 10, 20, 100, 1000, 3000) blok AY’ler uygulanış CT numuneleri için a-N eğrileri karşılaştırılmıştır. Her bir eğri bir deneyi temsil etmektedir. Şekil 4.14’deki (1), (2) eğrileri SGY altında işlemsiz ve nitrürlenmiş numunelere ait YÇG eğrileridir.



Şekil 4.14. Nitrürlenmiş ve işlemsiz CT numunelerinin farklı çevrim sayılarında (1, 10, 20, 100, 1000, 3000) AY uygulanarak yapılan yorulma çatlak gelişim testlerinden elde edilen a-N eğrileri

Şekil 4.14’de 1, 10, 20, 100 ve 1000 çevrimlik blok AY uygulamalarında işlemsiz numune, nitrürlenmiş olana göre daha uzun bir çatlak gecikmesi sergilemiştir. Plazma nitrürlenme işlemi, 1000 çevrime kadar aşırı uygulandığında yorulma çatlak

gecikmesinin azalmasına sebep olmuştur. Ancak, 3000 çevrimlik blok AY uygulamasında durum değişmiş nitrürlenmiş olan numune (eğri 14), işlemsiz olana göre daha uzun bir çatlak gecikmesi periyodu sergilemiştir

Şekil 4.14 üzerinde özet bir değerlendirme yapılacak olursa; SGY altında plazma nitrüleme YÇG ömrünü arttırmıştır ((1) ve (2) eğrileri). Yüzeydeki sert nitrür tabakası YÇG hızını azaltmıştır. Ancak 1, 10, 20, 100 ve 1000 çevrimlik blok AY uygulamalarında plazma nitrüleme AY'nin sebep olduğu çatlak gecikmesini ve toplam YÇG ömrünü azaltmıştır (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 12 eğrileri). Yüzeydeki sert nitrür tabakası AY esnasında oluşan büyük plastik bölgenin büyüklüğünü sınırlandırmıştır. Dolayısıyla daha küçük boyutlu AY plastik bölgesi daha kısa bir çatlak gecikmesine sebep olmuştur. 3000 çevrimlik blok AY uygulamasında ise nitrürlenmiş olan numune işlemsiz olana göre de uzun bir YÇG ömrü sergilemiştir (13 ve 14 eğrileri). 3000 çevrimlik AY bloğunda artık AY'nin kendisi çatlağı ilerleten mekanizma olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. Toplam yorulma ömründe 1000 çevrim AY'ye göre daha az artış görülmüştür. Nitrürlenmiş olan numunede yüzeydeki sert nitrür tabakası AY esnasında çatlağın ilerleme hızını düşürmüş dolayısıyla nitrürlenmiş olan numune daha uzun bir YÇG ömrü sergilemiştir.

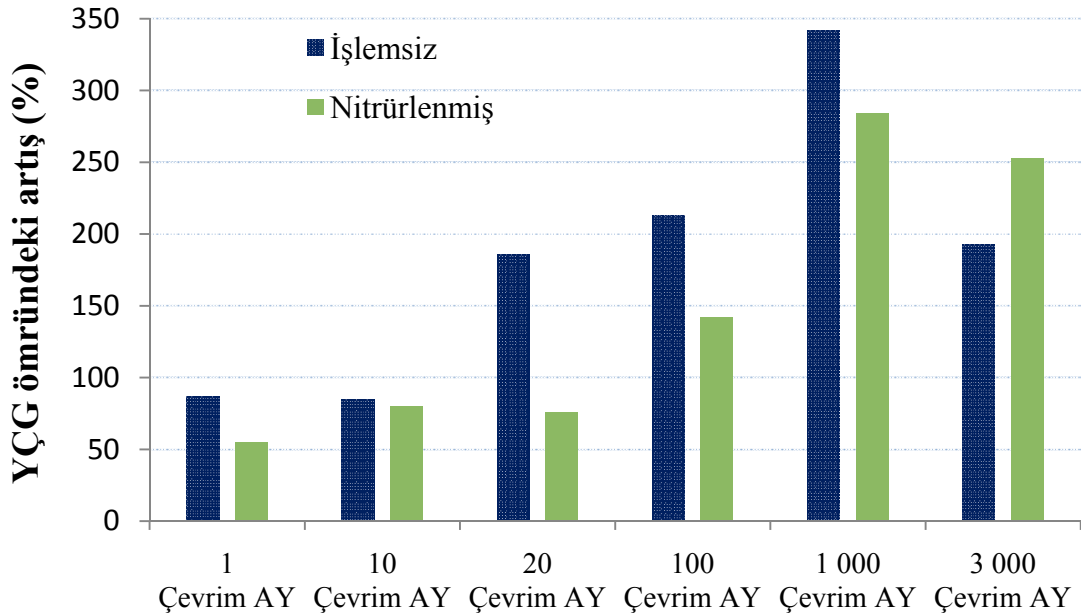
Çizelge 4.2'de yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde, farklı sayıdaki aşırı yükleme blok çevriminin ve plazma nitrülemenin etkisi (%) ömür olarak gösterilmiştir. İşlemsiz numunenin SGY altında YÇG ömrü %100 alınmış, diğer bütün yükleme ve yüzey işlemleri durumları bu değerle yüzde olarak mukayese edilmiştir.

Çizelge 4.2. Yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde, farklı sayıdaki aşırı yükleme blok çevriminin ve plazma nitrürlemenin etkisi

		İşlemsiz ömür (%)	İşlemsiz SGY durumuna göre ömür artışı (%)	Nitrürlenmiş ömür (%)	İşlemsiz SGY durumuna göre ömür artışı (%)
Sabit Genlikli Yükleme				135	35
Aşırı yükleme bloğu çevrim sayısı	1	187	87	155	55
	10	185	85	180	80
	20	286	186	176	76
	100	313	213	242	142
	1 000	442	342	384	284
	3 000	293	193	353	253

Şekil 4.15’de hem işlemsiz hem de nitrürlenmiş numuneler için AY çevrim sayısındaki artışın sebep olduğu çatlak ilerleme ömründeki artış miktarları yüzde (%) olarak görülmektedir. Bütün değerler işlemsiz SGY durumuyla yüzde olarak kıyaslanmaktadır.

İşlemsiz numunelerin AY çevrim sayısına karşı gösterdikleri çatlak ilerleme ömürleri incelendiğinde; 1 çevrimlik AY’dan itibaren AY’nin çatlak ilerleme ömrüne artma yönünde önemli miktarda etki ettiği (%87 artış) görülmektedir. 1-10 çevrim AY arasında bir ömür artış görülmemiş, 10-20 çevrim AY arasında YÇG ömrünün %100 daha arttığı görülmektedir. 20-100 çevrim arasında %27 ve 100-1000 çevrim arasında ise %129 daha YÇG ömrü artışı gözlenmiştir. 1000-3000 çevrimlik blok AY uygulamaları arasında ise YÇG ömrü 1000 çevrim AY’ye göre %149 azalmıştır. Çatlak ilerleme ömrü, 1000 çevrimlik blok aşırı yüklemeye kadar AY çevrim sayısındaki artışa paralel olarak sürekli artış göstermiş, 1000-3000 çevrim AY arasında bir en üst seviyeye ulaşarak 3000 çevrim AY’de sert bir düşüş göstermiştir.



Şekil 4.15. SGY ve DGY altında nitrürlenmenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerindeki etkisi

Nitrürlenmiş numunelerin AY çevrim sayısına karşı gösterdikleri çatlak ilerleme ömürleri incelendiğinde; 1, 10 ve 20 çevrimlik blok AY için bir miktar çatlak ilerleme gecikmesi görülse de asıl çatlak gelişimindeki ömür artışı 100 ve 1000 çevrimlik AY'den sonra etkili hale gelmiştir (1000 çevrim AY için %384 artış). 3000 çevrimlik AY bloğu uygulamasında ise YÇG ömrü (%253 artış) 1000 çevrimlik AY uygulamasına göre daha az artış görülmüştür.

AY çevrim sayısı arttıkça, AY esnasındaki çatlak ilerleme miktarı da artmıştır. 3000 çevrimlik blok AY esnasında çatlak oldukça fazla ilerlemiştir (nitrürlenmiş olan yaklaşık 3mm, işlemsiz olan yaklaşık 4mm (Şekil 4.17)). Yüksek çevrim sayılı AY esnasında çatlak daha fazla ilerlemiş, dolayısıyla çatlak ucuna gelen gerilme artmış olmasına rağmen, AY çevrim sayısı bir değere kadar arttıkça çatlak gecikmesinin de arttığı görülmüştür. Bu sonuç literatür ile uyumludur (Pommier and Freitas 2002).

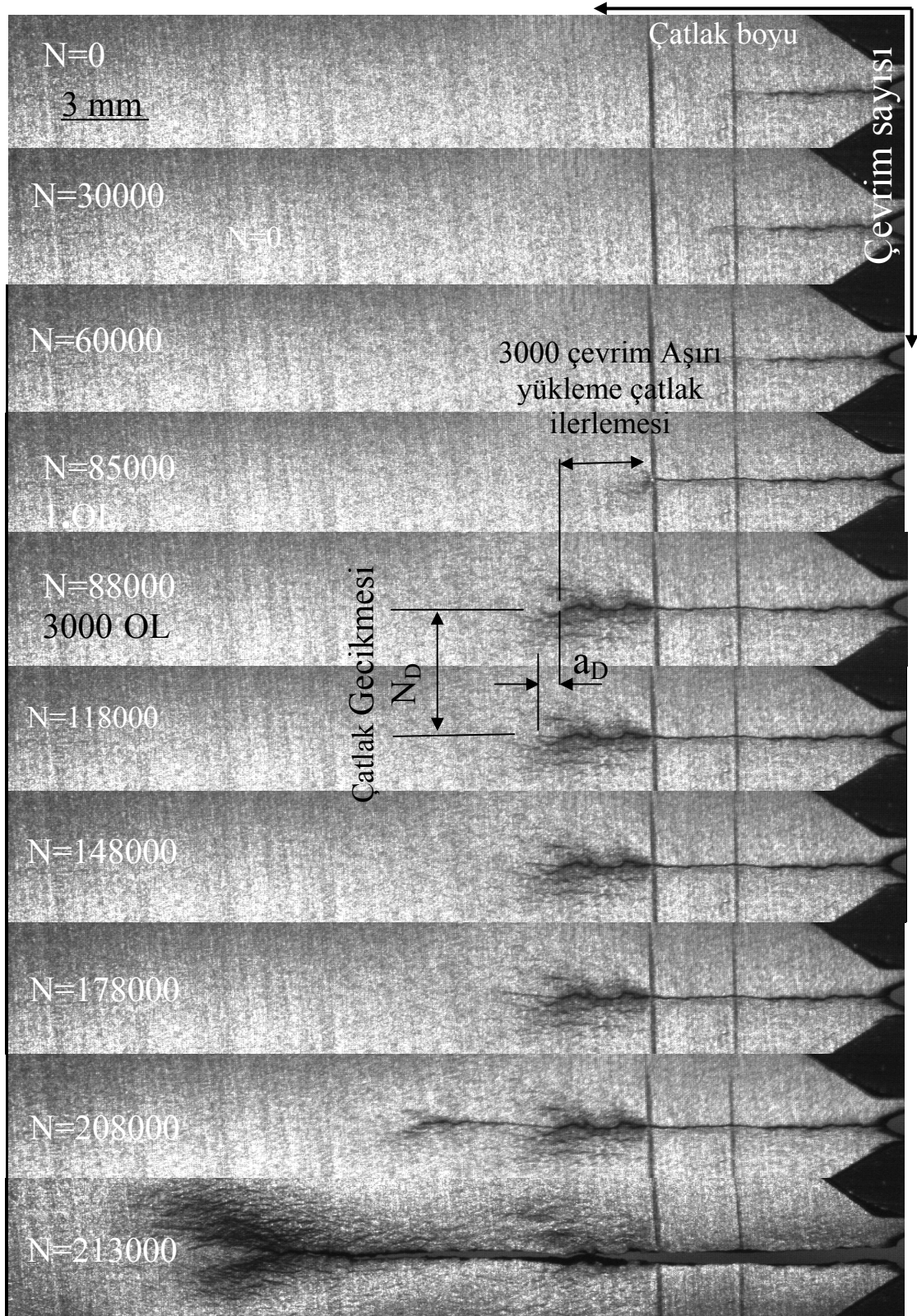
Şekil 4.15 üzerinde işlemsiz ve nitrürlenmiş numuneler için şu durumlar tespit edilmiştir: SGY altında nitrürlenme işlemi YÇG ömrünü arttırmıştır (%35). Hem işlemsiz

hem de nitr rl nmiş numunelerde AY uygulaması olumlu tesir etmiş Y G ömrünü arttırmıştır. Hem işlemsiz hem de nitr rl nmiş numunelerde AY bloğunun çevrim sayısı arttıka Y G  mr  de belli bir noktaya kadar artmıştır. 1000 çevrimlik blok AY'den sonra, AY  evrim sayısı arttıka, AY'nin çatlak geciktirici faydalı etkisi azalmaya başlamıştır. İşlemsiz numuneler üzerinde AY'nin Y G  mr  üzerindeki olumlu etkisi hemen ön plana çıkmış iken, nitr rl nmiş olanda daha az etkili olmuştur. Ancak 3000 çevrimlik blok AY'de durum değişmiş, nitr rl nmiş olan da AY'nin faydalı etkisi daha fazla görülmüştür.

şekil 4.15'de görüldüğü gibi bütün AY bloklarında aşırı yükleminin sebep olduğu Y G  mr , işlemsiz numunelerde daha fazladır. Ancak 3000 çevrimlik blok AY durumunda nitr rl nmiş olan numune daha uzun bir çatlak gelişim ömrü sergilemiştir. Belirli bir AY  evrim sayısından sonra AY kendisi çatlak ilerleten bir etken olarak ortaya çıktığından AY  evrim sayısının daha fazla arttırılması faydalı değil zararlı olmaktadır. Bu noktada plazma nitrürleme işlemi AY açısından faydalı etkisini ortaya koymaktadır. Nitrürleme işlemi, AY  evrim sayısının artmasıyla Y G  mr ndeki artışın pik yaparak azaldığı noktayı daha ilerilere taşıtmaktadır. Nitrürleme AY  evrim sayısının çok fazla arttırılmasıyla oluşan çatlak gelişimindeki kötüye gidişi azaltmaktadır.

Pommier and Freitas (2002) AY'nin sebep olduğu çatlak gecikmesinde, 10 çevrimlik aşırı yükleme uygulamasının 1 çevrimlik olandan daha etkili olduğunu, 100 çevrimlik AY durumunda ise çatlak gecikmesi etkisinin azaldığını rapor etmişlerdir. Buna sebep olarak ilk önce, çok az bir miktarda sertleşmeye sebep olacak olmasına rağmen, AY  evrimleri sırasında artık gerilmeler oluşarak çevrimsel sertleşmeye sebep olacağı d ş n leceğini belirtmişlerdir. Ancak çok çevrimlik AY durumunda toplam plastik şekil değiştirme artsa bile çatlak ucundaki maksimum gerilmenin sabit kaldığını, bu yüzden çevrimsel sertleşmeden dolayı bası artık gerilmelerin artmasının daha fazla çatlak gecikmesine sebep olamayacağını  ne sürmüşlerdir (AY  evrim sayısının etkinliğinin, ilgili çalışmada kullanılan SGY ve DGY değerlerine bağlı olduğu unutulmamalıdır).

Şekil 4.16’da işlemsiz CT numunesinde çatlak sabit genlik altında ilerlerken 3000 çevrimlik blok AY uygulanmış ardından tekrar temel seviye ile çatlak ilerlemesinin devam ettirilmesi durumuna ait adım adım çatlak ilerleme evreleri verilmiştir.



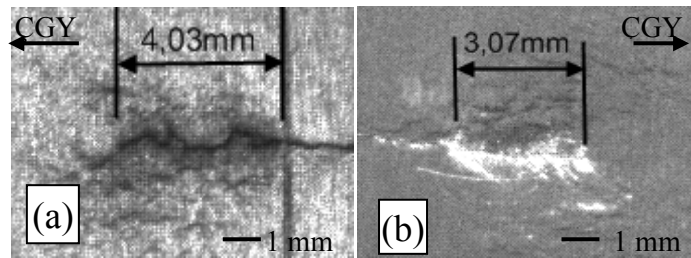
Şekil 4.16. İşlemsiz CT numunesinin 3000 çevrimlik AY uygulanması durumunda adım adım çatlak ilerleme görüntüsü

*(a_D) çatlak gecikmesi evresinde çatlak ilerleme miktarı

Şekil 4.16'da AY noktasına gelinceye kadar çatlak lineer bir şekilde ilerlemiş ($0,35 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), 3000 çevrimlik AY esnasında çatlak bir hayli hızlı ilerlemiş ($13,6 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), AY sonrası 90000 çevrim oldukça yavaş ilerlemiş ($0,28 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), son 38000 çevrimde gittikçe hızlanarak ($2,32 \times 10^{-4}$ mm/çevrim) kırılmıştır. Çatlak ilerleme hızları arasındaki çok büyük farklılık görülmektedir. Çatlağın AY uygulanan bölgesinde yüzeyde büyük plastik bölge mevcuttur. Literatürde AY sonrası çatlak gecikmesine, plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasının sebep olduğuna dair deneysel çalışmalar mevcuttur (Shin and Fleck 1987; Newman *et al.* 1988; Ward *et al.* 1989; Pereira *et al.* 2007; Schijve 2009).

4.1.2.a. Yorulma çatlak gelişiminde farklı çevrim sayılarında ki aşırı yüklemenin meydana getirdiği yüzey morfolojisi

Şekil 4.17'de blok AY esnasında oluşan çatlak yüzey durumları gözükmemektedir. Şekil 4.17 (a)'da işlemsiz numune 3000 çevrimlik AY sonrası, (b)'de nitrürlenmiş numune 3000 çevrimlik AY sonrası çatlak yüzey durumu görülmektedir. 3000 çevrimlik AY neticesinde işlemsiz numunede çatlak yüzeyde 4,03mm ilerlerken nitrürlenmiş olanda 3,07mm ilerlemiştir. Nitrürlenme işlemi blok AY'nin sebep olduğu çatlak ilerleme miktarını azaltmıştır.

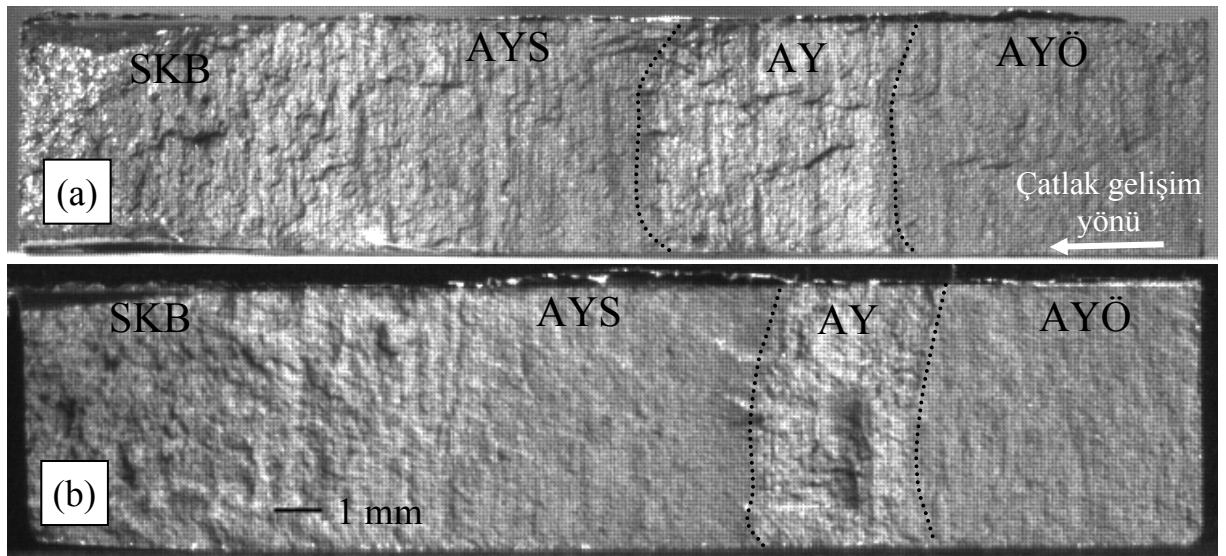


Şekil 4.17. 3000 çevrimlik aşırı yüklenme sırasında oluşan çatlak ilerleme miktarları

*(a) işlemsiz 3000 çevrim AY sonrası (b) nitrürlenmiş 3000 çevrim AY sonrası. ÇGY: çatlak gelişim yönü

4.1.2.b. Yorulma çatlak gelişiminde farklı çevrim sayılarında AY meydana getirdiği kırılma yüzeyi morfolojisi

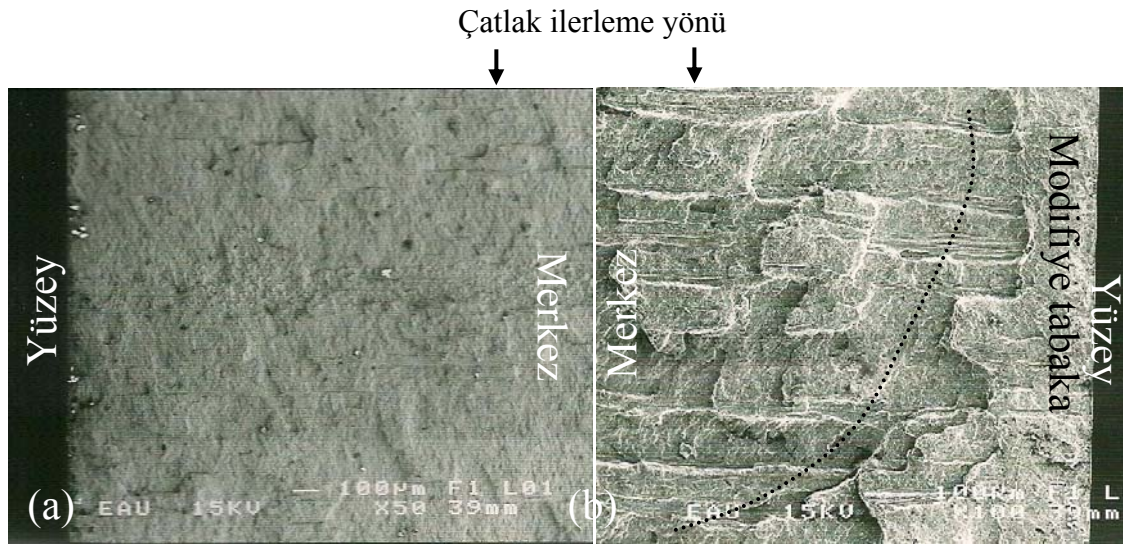
Şekil 4.18’de (a) işlemsiz numune için, (b) nitrürlenmiş numune için; SGY altında çatlak ilerlemesi devam ederken 3000 çevrim AY uygulandıktan sonra tekrar temel yükleme seviyesine dönüldüğü durumdaki kırılma yüzeyi görülmektedir. Şekilde aşırı yükleme öncesi (AYÖ) bölge gerilmenin ve dolayısıyla çatlak ilerleme hızının düşük olmasından dolayı az pürüzlüdür. Aşırı yükleme bölgesinde (AYB) ise çatlak ilerleme hızı çok yüksek ve pürüzlü bir görünüm söz konusudur. Son olarak aşırı yükleme sonrası (AYS) bölgede ilk önceleri düşük çatlak ilerleme hızından dolayı az pürüzlü, daha sonraki son kırılma evresinde yüksek çatlak ilerleme hızından dolayı pürüzlü bir yüzey görülmektedir. Şekil 4.18’de işlemsiz olan numunede (a), nitrürlenmiş (b) olana göre AYB daha büyüktür. Yani, 3000 çevrimlik AY esnasında, işlemsiz numunede nitrürlenmiş olana göre, çatlak daha fazla ilerlemiştir. Nitrürlenmiş numunede oldukça sert olan yüzey tabakası çatlağın ilerlemesini azaltmıştır. Aynı şekilde nitrürlenme işlemi AY ile oluşan büyük plastik bölgenin büyüklüğünü de sınırlandırmaktadır. Bu durum nitrürlenme işleminin, AY oluşturduğu faydalı çatlak gecikmesini azaltmasını izah edebilir (Şekil 4.15).



Şekil 4.18. 3000 çevrimlik blok AY sonrasında (a) işlemsiz, (b) nitrürlenmiş numuneye ait kırılma yüzey görüntüsü

*AYÖ: aşırı yükleme öncesi, AYB: aşırı yükleme bölgesi, AYS: aşırı yükleme sonrası, SKB: son kırılma bölgesi

Şekil 4.19 (a)'da işlemsiz ve (b)'de nitrürlenmiş olan numunenin yorulma hasarı kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü verilmiştir. İşlemsiz numune kırılma yüzeyi, yüzey ile iç bölge arasında homojen bir görünüm sergiler iken, nitrürlenmiş olanda durum farklıdır. Nitrürlenmiş olan numunenin yüzeyi ile merkezi arasında farklı yönelimler mevcuttur ve merkez ile yüzey arasında homojen olmayan bir yapı söz konusudur.



Şekil 4.19. Yüzeyden iç bölge doğrultusunda kırılma düzlemi SEM görüntüsü

*(a) işlemsiz numune, (b) nitrürlenmiş numune

4.1.3. Aşırı yükleme oranının yorulma çatlak gelişimi üzerindeki etkilerini araştırma çalışmaları

Plazma nitrürlenme işleminin Aşırı Yükleme Oranı (AYO) üzerindeki (ya da tersi) etkisini araştırmak maksadıyla, SGY deneyleriyle kıyaslayarak değerlendirmek üzere, farklı AYO'ları ile deneyler yapılmıştır. Bir çevrimlik AYO=1,5, 2,0, 2,5 ve 3,0 olan çeki AY uygulanmıştır.

Şekil 4.20'de işlemsiz ve nitrürlenmiş numuneler için SGY ve farklı AYO'nda DGY durumlarında elde edilen a-N grafikleri karşılaştırılmıştır (her bir eğri ortalama değerleri değil yalnızca bir deneyi temsil etmektedir). Şekil 4.20'deki (1) ve (2) eğrileri

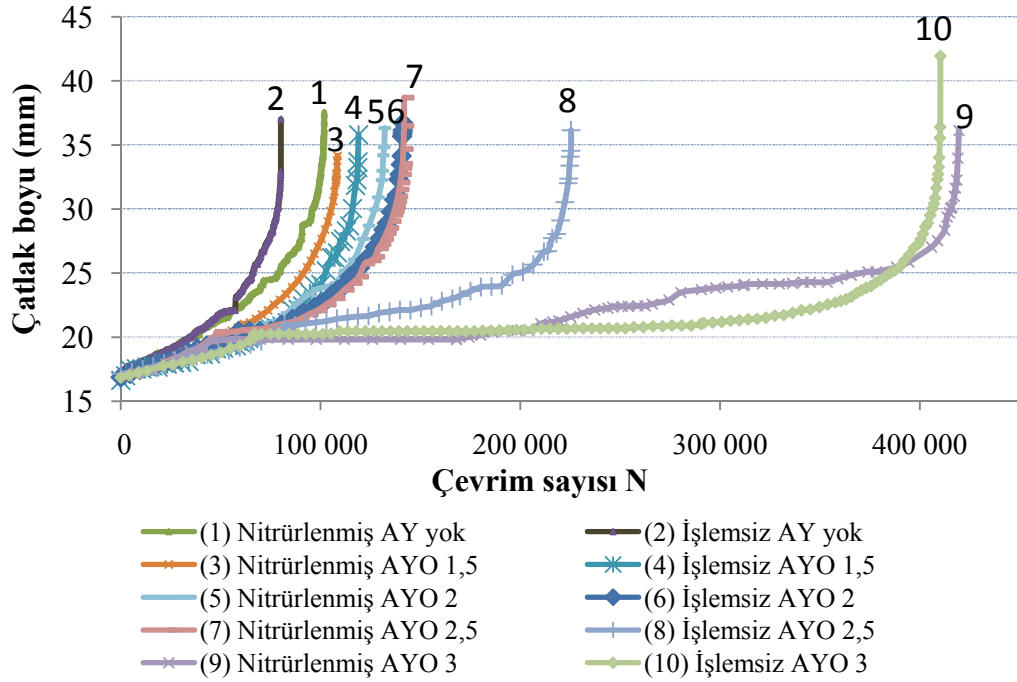
nitr rl nmiş ve işlemsiz numuneler için SGY durumunda elde edilen a-N eğrileridir. Bu iki temel eğri karşılaştırma için şekil 4.3 ve 4.14’de de kullanılmıştır.

şekil 4.20’deki (3) ve (4) numaralı eğriler nitr rl nmiş ve işlemsiz numuneler için bir çevrimlik AY uygulamasını ihtiva etmektedir. Temel seviye yükleme $P_{\min}=500\text{N}$ ve $P_{\max}=5000\text{N}$ dur. Bir  evrimlik AYO 1,5 olan AY uygulaması için ise $P_{\max \text{ AY}}=7500\text{N}$, $P_{\min \text{ AY}}=500\text{N}$ dur.

şekil 4.20’deki (5) ve (6) numaralı eğriler, nitr rl nmiş ve işlemsiz numuneler için bir çevrimlik AYO=2 olan AY uygulaması neticesinde elde edilen a-N eğrilerini göstermektedir.

şekil 4.20’deki (7) ve (8) numaralı eğriler, nitr rl nmiş ve işlemsiz numuneler için bir çevrimlik AYO=2,5 olan AY uygulaması neticesinde elde edilen a-N eğrilerini göstermektedir.

şekil 4.20’deki (9) ve (10) numaralı eğriler, nitr rl nmiş ve işlemsiz numuneler için bir çevrimlik AYO=3 olan AY uygulaması neticesinde elde edilen a-N eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.20. Farklı AY oranlarında yüklemeye tabi tutulmuş, nitrülenmemiş ve nitrülenmiş CT numunelerinin YÇG testlerinden elde edilen a-N eğrileri

Şekil 4.20’de 1 ve 2 numaralı eğriler üzerinde, SGY altında, plazma nitrüllemenin yorulma çatlak ilerleme ömrünü arttırdığı görülmektedir. Ancak AYO 1,5, 2,0 ve 2,5 olan aşırı yükleme durumlarında, plazma nitrüllemenin, aşırı yüklemenin sebep olduğu, yorulma çatlak ilerlemesindeki gecikmeyi azalttığı ve neticede toplam yorulma çatlak ilerleme ömrünü azalttığı görülmüştür (3,4,5,6,7,8 numaralı eğriler). AYO 3 olan aşırı yükleme durumunda ise nitrülenmiş olan numune işlemsiz olana göre daha uzun bir yorulma çatlak gelişim ömrü sergilemiştir (9 ve 10 numaralı eğriler).

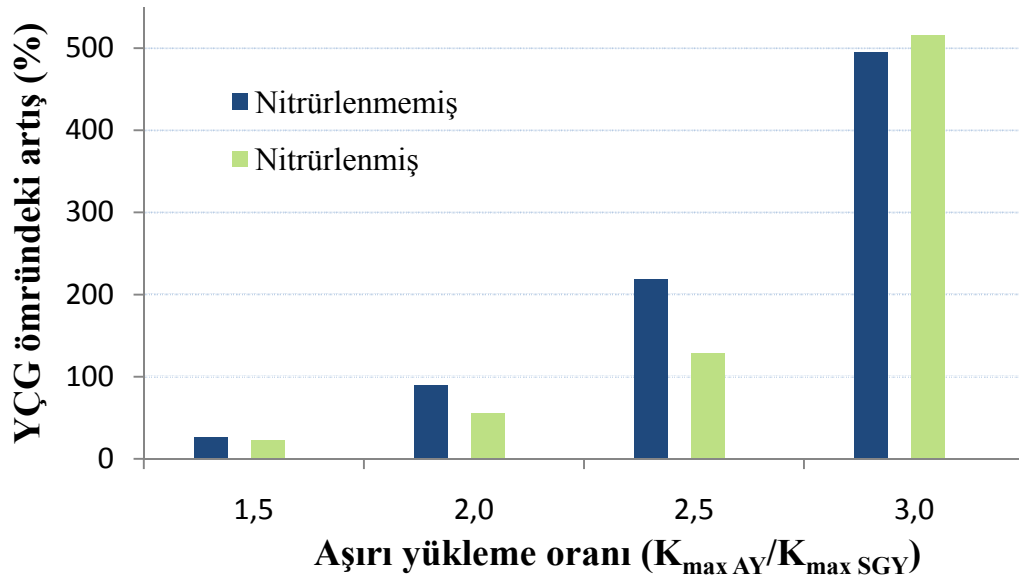
Çizelge 4.3’de Farklı aşırı yükleme oranlarında yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde plazma nitrüllemenin ve aşırı yükleme oranının etkisi (%) ömür olarak gösterilmiştir. İşlemsiz numunenin SGY altında YÇG ömrü %100 alınmış, diğer bütün yükleme ve yüzey işleme durumları bu değerle yüzde olarak mukayese edilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı aşırı yükleme oranlarında yorulma çatlak gelişim ömrü üzerinde plazma nitrürlenmenin ve aşırı yükleme oranının etkisi

		İşlemsiz ömür (%)	İşlemsiz SGY durumuna göre ömür artışı (%)	Nitrürlenmiş ömür (%)	İşlemsiz SGY durumuna göre ömür artışı (%)
Sabit Genlikli Yükleme				135	35
Aşırı yükleme oranı	1,5	126	26	123	23
	2,0	189	89	156	56
	2,5	319	219	228	128
	3,0	596	496	615	515

Şekil 4.21’de hem işlemsiz hem de nitrürlenmiş CT numuneleri için AYO’nın YÇG ömrü üzerindeki etkisi yüzde ömür olarak ele alınmıştır. Şekil 4.20 üzerinde işlemsiz numunenin farklı AYO’ları altında YÇG ömürleri incelendiğinde; AYO=1,5 olan bir çevrimlik AY uygulamasında YÇG ömrünün %26 artarak, toplam YÇG ömrünün %126’ya ulaştığı görülmüştür. Yine aynı şekilde AYO=2 için YÇG ömrünün %189’a, AYO=2,5 için %319’a, AYO=3 için en yüksek değer olarak % 595’e ulaştığı görülmüştür (bu noktadan sonra AYO=3,5’e çıkarıldığında numunenin AY anında kırıldığı görülmüştür).

Şekil 4.21 üzerinde nitrürlenmiş numunenin farklı AYO’ları altında YÇG ömürleri incelendiğinde; Sabit genlikli yükleme altında YÇG ömrünün %34 artarak, toplam YÇG ömrünün %134’e ulaştığı görülmüştür. AYO=1,5 için YÇG ömrünün %123’e, AYO=2 için %156’ya, AYO=2,5 için %228’e, AYO=3 için en yüksek değer olarak %615’e ulaştığı görülmüştür (bu noktadan sonra AYO=3,5’e çıkarıldığında numunenin AY anında kırıldığı görülmüştür).



Şekil 4.21. Farklı aşırı yükleme oranlarında YÇG ömrü üzerinde plazma nitrürlenmenin etkisi

Şekil 4.21 üzerinde işlemsiz ve nitrülenmiş numuneler için AYO'nın etkisi karşılaştırıldığında; SGY altında nitrüleme işlemi YÇG ömrünü arttırmıştır (%35). Hem işlemsiz hem de nitrülenmiş numunelerde AY uygulaması olumlu tesir etmiş YÇG ömrünü önemli miktarda arttırmıştır. İşlemsiz numunelerde AYO arttıkça YÇG ömrü de artmıştır. Nitrülenmiş numunede ise AYO=1,5 için SGY'ye göre bir iyileşme görülmemiş ancak AYO=2'den sonra AYO arttıkça YÇG ömrü de artmıştır. İşlemsiz numunede AYO arttıkça YÇG ömrü tedricen artmıştır. Nitrülenmiş olan numune ise AYO=2,5 olana kadar YÇG ömrü azar azar artmış (%228'e kadar), AYO=3 olduğunda YÇG ömrü olağan üstü bir artış göstermiştir (%615). Hem işlemsiz hem de nitrülenmiş numunede AYO=3'de maksimum YÇG ömrü gözlenmiştir. AYO=1,5, 2 ve 2,5 iken işlemsiz numunede nitrülenmiş olana göre daha uzun YÇG ömrü görülmüştür. Ancak AYO=3 olduğunda durum değişmiş, işlemsiz olan ile nitrülenmiş olan arasında dikkate değer bir fark olamadığı gözlenmiştir.

Aşırı yükleme oranını arttıkça, YÇG ömrünün de artış göstermiş olması literatür ile uyum göstermektedir (Borrego *et al.* 2003; Sander and Richard 2003).

Plazma nitrürlemenin çeliklerde yüzey sertliğini arttırdığı bilinmektedir. Ayrıca plazma nitrürlemenin yorulma dayanımı üzerinde faydalı etkisinin olduğu da bilinmektedir (Çelik and Karadeniz 1995; Terent *et al.* 2007; Terres *et al.* 2010). Yüksek çevrimli yorulma testinde, yorulma dayanımındaki artışın, nitrürleme işleminden sonra daha mukavim bir yüzey tabakası oluşumu ile makroskopik ve mikroskopik artık gerilmelerin oluşumuyla ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

AYO'nun 1,5, 2 ve 2,5 olduğu durumlarda; yüzeydeki sert nitrür tabakası AY esnasında oluşan plastik bölgenin büyüklüğünü sınırlandırmaktadır. Bundan dolayı nitrürlenmiş numunede görülen çatlak gecikmesi, işlemsiz olanlara göre, daha kısa süreli olmuştur. Bu çalışmada kullanılan temel yükleme seviyesinde, AYO=3 olduğu durumda AYO faydalı olma sınırına ulaşmış, bu noktadan sonra AY esnasında plastik bölge daha fazla büyümeyip malzemede ani kırılma görülmüştür. AYO=3,5 seçildiğinde malzeme AY esnasında kırılmıştır.

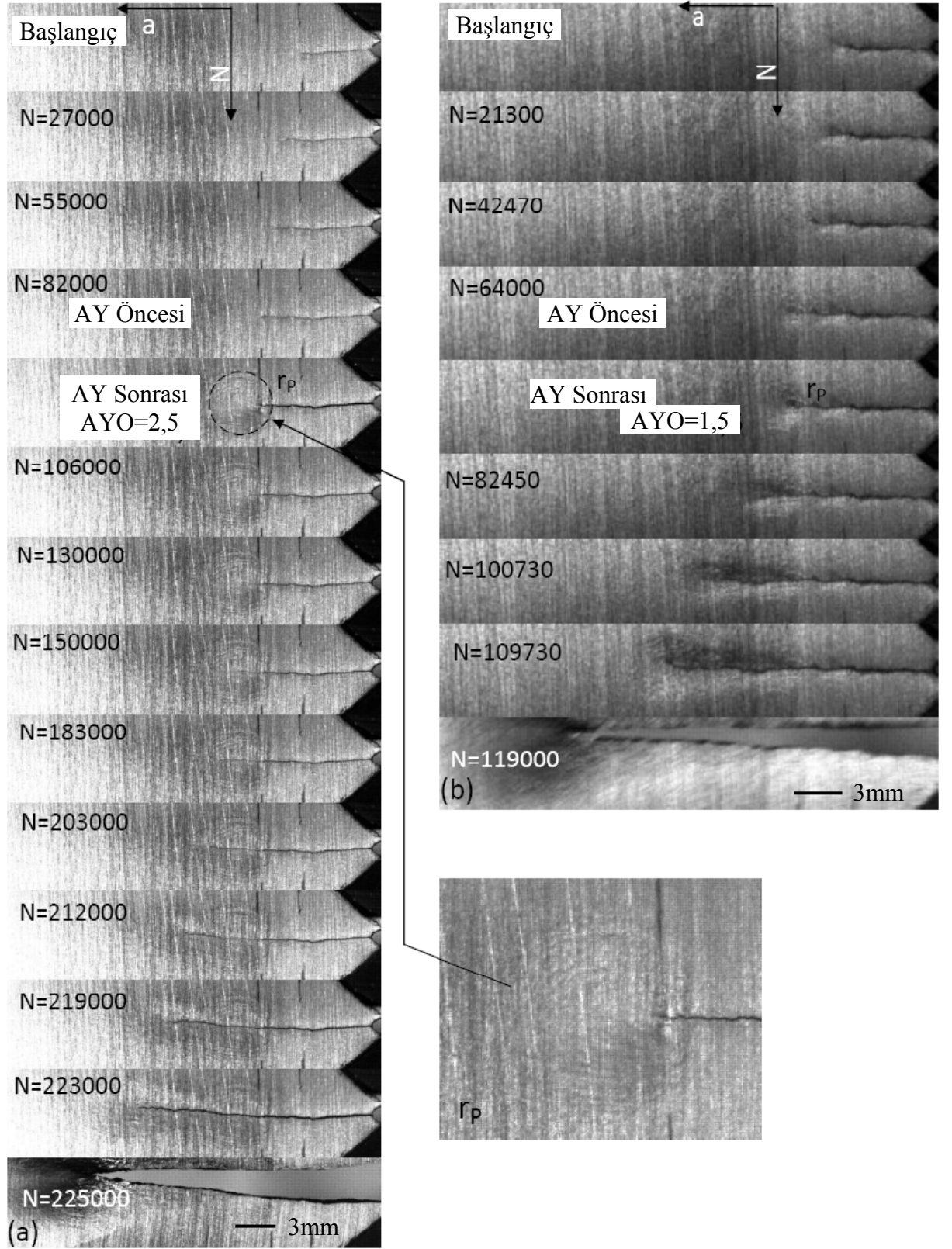
Nitrürlenmiş olan numunede, yüzeydeki sert nitrür tabakası, AY esnasında meydana gelen plastik bölgenin daha fazla büyümesini engellemiştir. Bu durum AYO'nin düşük değerlerinde çatlak gecikmesini azaltmıştır. Fakat AYO'nin yüksek değerlerinde (AYO=3) çatlak gecikmesini işlemsiz olanın seviyesine çıkmış, başka bir deyişle AYO=3 iken nitrürlemenin AY'nin sebep olduğu çatlak gecikmesini azaltıcı etkisi ortadan kalkmıştır. AYO=3 noktasında, işlemsiz olan numunede meydana gelen plastik bölgenin büyüklüğü faydalı olma sınırını aşmaya başlamış, bu noktadan sonra AY esnasında malzeme hasar görmeye başlamıştır. Nitrürleme işlemi, AYO'nin faydalı olma sınırı daha büyük değerlere taşınmıştır.

Şekil 4.22'de nitrürlenmiş olan numuneye AYO 1,5 ve 2,5 olan bir çevrimlik AY uygulanması hâlinde meydana gelen, çatlak ilerleme durumunu adım adım gösterilmiştir. Şekil 4.22'de AY sonrası, çatlak AY plastik bölgesini, AYO=1,5 için yaklaşık 6000 çevrimde, AYO=2,5 için yaklaşık 120000 çevrimde, geçmiştir. Çatlak ilerlemesi, AY plastik bölgesini geçtikten sonra hızlanmıştır.

Şekil 4.22 (a)'da nitrülenmiş CT numunesine $AYO=2.5$ olan AY uygulanması neticesinde; AY noktasına gelinceye kadar çatlak lineer bir şekilde ilerlemiş ($0,42 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), AY sonrası, boyu 5,538mm olarak ölçülen plastik bölge geçilirken, 120000 çevrim yavaş ilerlemiş ($0,46 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), son 22000 çevrimde gittikçe hızlanmış ($4,07 \times 10^{-4}$ mm/çevrim) ve son kırılma bölgesinde numune aniden kırılmıştır. Çatlak ilerleme hızları arasındaki çok büyük farklılık görülmüştür.

Şekil 4.22'de çatlağın AY uygulanan bölgesinde yüzeyde büyük plastik bölge görünmektedir. Literatürde AY sonrası çatlak gecikmesine, plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasının sebep olduğuna dair deneysel çalışmalar mevcuttur (Shin and Fleck 1987; Newman *et al.* 1988; Ward *et al.* 1989; Pereira *et al.* 2007; Schijve 2009).

Şekil 4.22 (b)'de işlemsiz CT numunesine $AYO=1.5$ olan AY uygulanması neticesinde; AY noktasına gelinceye kadar çatlak lineer bir şekilde ilerlemiş ($0,54 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), AY sonrası 6000 çevrim yavaş ilerlemiş ($0,23 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), son 49000 çevrimde gittikçe hızlanarak ($2,61 \times 10^{-4}$ mm/çevrim) kırılmıştır.



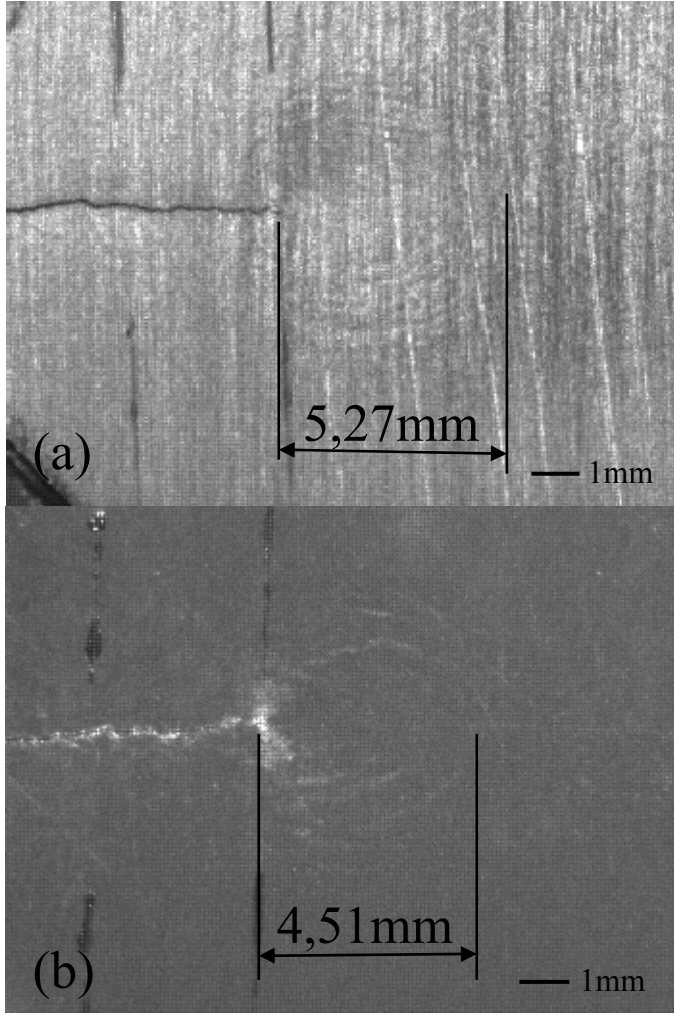
Şekil 4.22. DGY altında nitrülenmiş numunede adım adım çatlak gelişimi
 *(a) AYO=2,5 için, (b) AYO=1,5 için.

Ek 2’de verilmiş olan Video 2’de nitr rl nmiş CT numunesine AYO=3 olan AY uygulanması neticesinde; AY noktasına gelinceye kadar çatlak lineer bir şekilde ilerlemiş ($0,56 \times 10^{-4}$ mm/ evrim), AY sonrası, yüzey görüntüsünden boyu 5,985mm olarak ölçülen plastik bölge geçilirken 336278 çevrim gayet yavaş ilerlemiş ($0,18 \times 10^{-4}$ mm/çevrim), son 27577 çevrimde gittikçe hızlanarak ($3,80 \times 10^{-4}$ mm/çevrim) numune kırılmıştır.

Ek 3’de verilmiş olan Video 3’de nitr rl nmiş CT numunesine AYO=1,5 olan AY uygulanması neticesinde, AY sonrasında dikkate değer bir çatlak gecikmesi gözlenmemiştir.

4.1.3.a. Yorulma  atlak gelişiminde farklı AY oranlarındaki AY’nin meydana getirdiği yüzey morfolojisi

şekil 4.23’de AYO=2,5 olan (a) işlemsiz numuneye ait, (b) nitr rl nmiş numuneye ait; AY sonrası oluşan plastik bölge yüzey görüntüleri karşılaştırılmıştır. Yüzey görüntüsü üzerinden işlemsiz numunede oluşan plastik bölge 5,27mm olarak ölçülmüştür. Nitr rl nmiş olan numunede oluşan plastik bölge boyu ise 4,51mm olarak ölçülmüştür. şekil üzerinde yapılan ölçümler ortalama değer değildir, yalnızca bir numune üzerinden alınmış ölçülerdir.



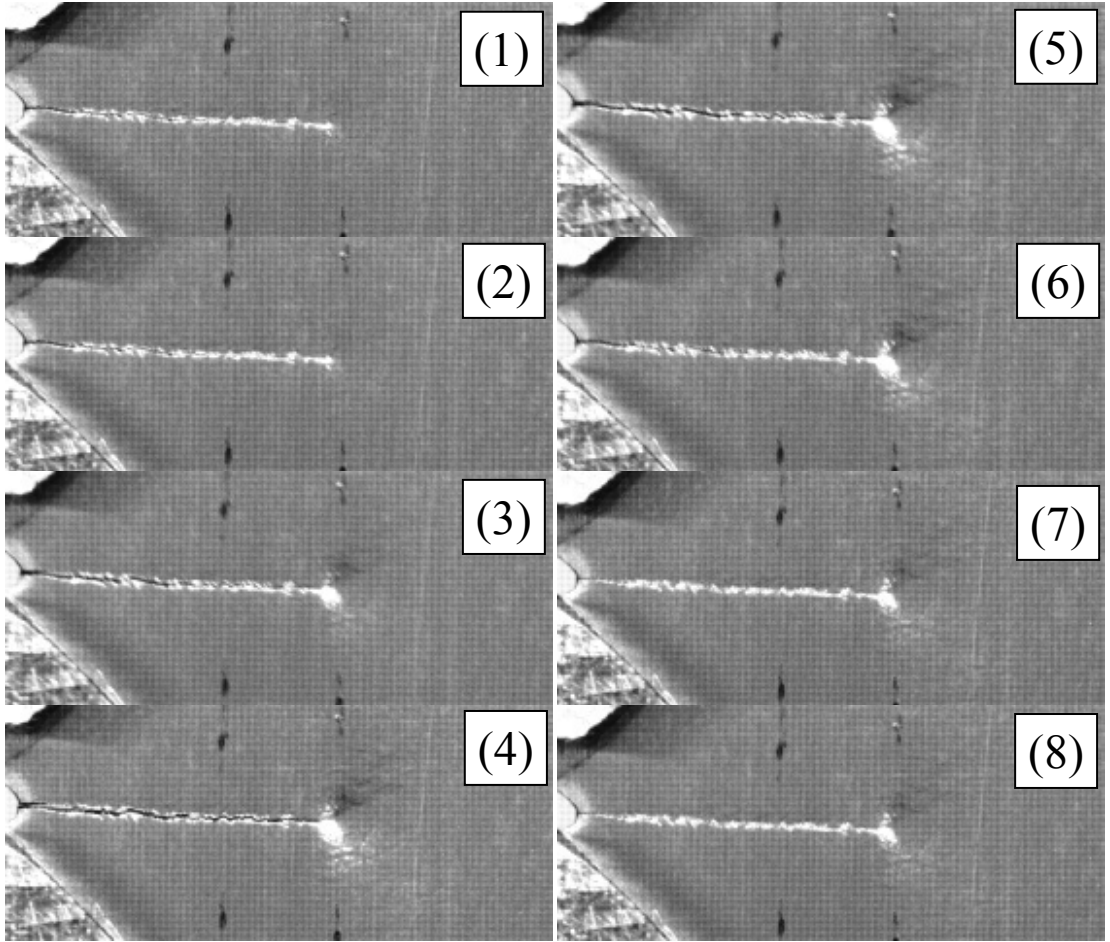
Şekil 4.23. AYO=2,5 olan AY sonrası oluşan plastik bölge görüntüleri
 *(a) işlemsiz numune, (b) nitrülenmiş numune

Şekil 4.23’de ölçülen plastik bölge boyutları ile Şekil 4.21’den elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumludur. Ayrıca işlemsiz numunede daha büyük boyutlu plastik bölgede daha uzun bir çatlak gecikmesi periyodu gerçekleşmesi, plastisitenin sebep olduğu çatlak gecikmesi teorisine de (Elber 1970) uygun düşmektedir.

AYO’nun 1,5, 2 ve 2,5 olduğu durumlarda aşırı yükleme sonrasında nitrülenmiş olan numunede çatlak gecikmesinin işlemsiz olandan daha kısa olmasının sebebi; Şekil 4.23(b)’de görülen daha küçük boyutlu AY sonrası plastik bölge oluşmasıdır.

Yüzeydeki sert nitrür tabakası AY'nin oluşturduğu plastik bölgenin büyümesini sınırlandırmıştır.

Şekil 4.24'de bir çevrimlik AY uygulamasının gelişim evreleri yüzey görüntüleri verilmiştir.



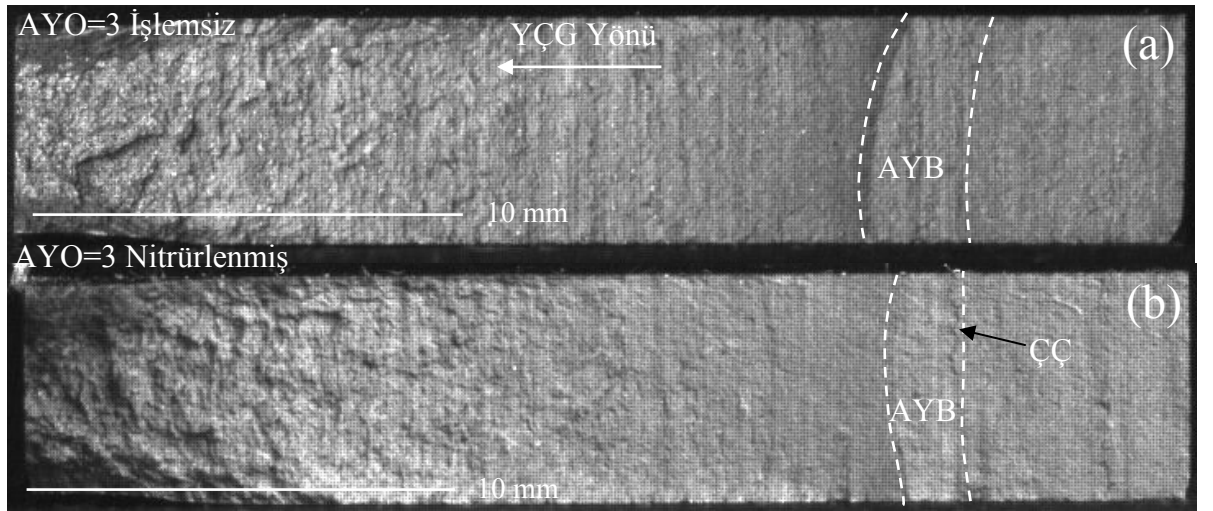
Şekil 4.24. İşlemsiz numune $AYO=3$ olan 1 çevrimlik AY uygulaması esnasında çatlak ucu plastik bölge gelişim evreleri yüzey görüntüleri

Şekil 4.24'de aşırı yükleme başlangıcında çatlak ağzı açıldıkça (Şekil 4.24 (1-4)), çatlak ucundaki plastik bölgede büyümeye devam etmektedir. Yük maksimum değere ulaştıktan sonra düşmeye başladığında çatlak ucundaki plastik bölge bir miktar küçülmüş (Şekil 4.24 (5-8)), daha sonra boyutu sabit kalmıştır. AY esnasında çatlak

ucunda oluşan plastik deformasyona ilaveten, plastik bölgenin büyüklüğü en üst bir değere ulaştıktan sonra az bir miktar küçülmesinden dolayı, bir miktar da elastik deformasyonun olduğu tespit edilmiştir. Oluşan elastik deformasyon, AY işlemi neticelendiğinde ortadan kalkmıştır.

4.1.3.b. Yorulma çatlak gelişiminde farklı AY oranlarındaki AY'nin meydana getirdiği kırılma yüzeyi morfolojisi

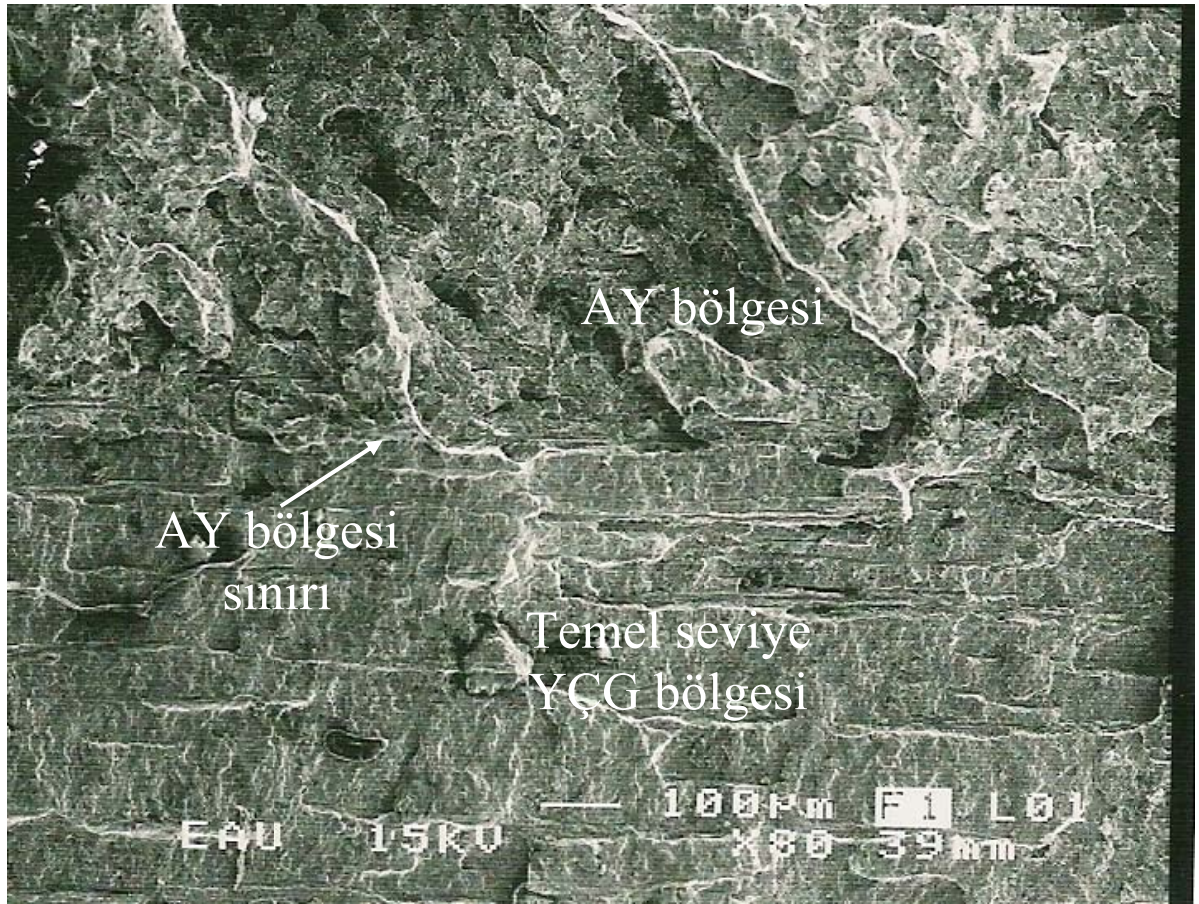
Şekil 4.25'de $AYO=3$ olan bir çevrimlik AY uygulanmış CT numunesine ait kırılma yüzeyi görüntüleri (a) işlemsiz numune için, (b) nitrülenmiş numune için verilmiştir. Aşırı yükleme bölgesi (AYB) Şekil 4.25 (a)'da, (b)'ye göre daha büyüktür. $AYO=3$ olan AY uygulamasında, AY esnasında, çatlak işlemsiz numunede nitrülenmiş olana göre daha fazla ilerlemiştir. Nitrülenmiş numunelerde oldukça sert olan yüzey tabakası AY esnasında çatlağın ilerlemesini yavaşlatmıştır. Aynı şekilde nitrüleme, AY ile oluşan büyük plastik bölgenin büyüklüğünü de sınırlandırmaktadır. Bu durum nitrüleme işleminin, AYO 'nın 1,5, 2 ve 2,5 olduğu durumlarda, AY'nin oluşturduğu faydalı çatlak gecikmesinin azaltmasını (Şekil 4.21) izah edebilir. İşlemsiz numune ise $AYO=3$ için AY esnasında, AY nin kendisi hasar oluşturan etken olarak ortaya çıkmaya başlamıştır.



Şekil 4.25. CT numunesi kırılma yüzey görüntüsü

*(a) işlemsiz $AYO=3$, (b) nitrülenmiş $AYO=3$; ÇÇ: Çatallanma Çatlağı, AYB: Aşırı yükleme bölgesi

Şekil 4.26’da temel seviye yükleme bölgesi ile aşırı yükleme bölgesi arasındaki SEM görüntüsü verilmiştir. Temel seviye yükleme bölgesinde az pürüzlü düzgün bir kırılma yüzey görünümü söz konusudur. AY bölgesinde ise çok pürüzlü ani kırılmayı andıran bir görünüm söz konusudur.



Şekil 4.26. AYO=3 olan AY uygulamasında temel seviye yükleme bölgesi ile aşırı yükleme bölgesi arasındaki sınıra ait SEM görüntüsü

5. SONUÇ

AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş olan ASTM E647-08 test standardına göre düzenlenmiş CT numunesi üzerinde aşırı yüklemenin, aşırı yükleme bloğu çevrim sayısının ve aşırı yükleme oranının oluşturduğu yorulma çatlak ilerleme gecikmesi üzerinde, plazma nitrürlemenin etkisi incelenmiştir. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Plazma nitrürleme işlemi sabit genlikli yükleme altında yorulma çatlak gelişim ömrünü uzatmıştır.
2. Aşırı yükleme bloğu çevrim sayısı arttıkça yorulma çatlak gelişim gecikmesi de artmıştır. Ancak belirli bir aşırı yükleme çevrim sayısından sonra, aşırı yükleme çevriminin kendisi çatlağı ilerleten etken olarak ortaya çıktığından, çatlak gelişimindeki gecikme azalmaya başlamıştır.
3. Plazma nitrürleme işlemi aşırı yüklemenin sebep olduğu çatlak gecikmesini azaltmıştır. Ancak çatlak gecikmesinin pik yaparak tekrar azalmaya başladığı aşırı yükleme çevrim sayısında, nitrürlenmiş numune, işlemsize göre daha fazla çatlak gecikmesi göstermiştir.
4. Nitrürleme işlemi, aşırı yükleme çevrim sayısının artmasıyla yorulma çatlak gelişim ömründeki artışın pik yaparak azaldığı noktayı daha ilerilere taşımıştır. Nitrürleme aşırı yükleme çevrim sayısının çok fazla arttırılmasıyla meydana gelen, çatlak gelişimindeki kötüye gidişi azaltmıştır.
5. Aşırı yükleme oranı (AYO) arttıkça yorulma çatlak ilerleme gecikmesi de artmıştır. Ancak belirli bir aşırı yükleme oranından sonra, aşırı yüklemenin kendisi hasar veren etken olarak ortaya çıktığından, aşırı yükleme anında numune aniden kırılmıştır

6. Plazma nitrüleme işlemi AYO'nın 1,5, 2, 2,5 olduğu durumda aşırı yüklemenin sebep olduğu çatlak gecikmesini azaltmıştır. AYO'nın 3 olduğu durumda nitrülenmiş olan numune ile işlemsiz olan arasında yorulma çatlak gelişim ömründe belirgin bir fark oluşmamıştır.

7. Aşırı yükleme çevrimlerinin uygulandığı bölgede kırılma yüzeyinde yerel olarak ani kırılma görünümü oluşmuştur.

8. Dijital görüntü analizi yönteminin kullanımıyla, a-N eğrileri oluşturulurken hareketli mikroskop yöntemine göre çok daha fazla noktadan veri alınma imkânı bulunmuştur. Elde edilen bu çok sayıdaki veri sayesinde a-N eğrisine yakından bakıldığında düz bir çizgi olmayıp, iniş çıkışlı olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle çatlak ilerleme hızının anlık olarak sürekli değiştiği gözlenmiştir.

9. Dijital görüntü analizi yönteminin kullanımı, deney durdurulmadan işlem yapılmasına imkân vermiş, dolayısıyla deney süresi kısalmıştır.

10. Dijital görüntü analizi yönteminin kullanımı ile yorulma çatlak gelişimi kısa filmi elde edilmiştir.

11. Dijital görüntü analizi yönteminin kullanımı ile elde edilen görüntüler saklanarak daha sonradan görüntüler üzerinde farklı çalışmalar yapma imkânı elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada aşırı yüklemenin üzerinde plazma nitrülemenin etkisi, aşırı yükleme çevrim sayısının etkisi ve aşırı yükleme oranının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak aşırı yükleme sıklığının etkisi araştırılabilir. Ayrıca malzeme ve uygulanan yüzey işlemi değiştirilerek çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alsaran, A., 2001. Dupleks Yüzey İşlemi Uygulanmış AISI 5140 Çeliğinin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Alsaran, A., Kaymaz, İ., Çelik, A., Yetim, F. ve Karakan, M., 2004. A repair process for fatigue damage using plasma nitriding. *Surface&Coatings Technology*, 186(2004), 333-338.
- Alsaran, A., Yıldız, F. ve Çelik, A., 2006. Effects of post-aging on wear and corrosion properties of nitrided aisi 4140 steel. *Surface&Coatings Technology*, 201(2006), 3147-3154
- ASTM E647 – 08, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.
- Aydilek, A.H., Güler, M. ve Edil, T.B., 2004. Use of image analysis in determination of strain distribution during goesynthetic tensile testing. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18 (1), 65-74
- Barsom, J. M., 1976. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in various bridge steels. *ASTM STP 595*, 217-235.
- Bannantine, J.A., Comer, J.J., James L. 1989. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. Prentice Hall. 283p. New Jersey USA.
- Bell, P.D. and Wolfman, A. 1976. Mathematical modelling of crack growth interaction effects. *ASTM STP 595*, 157-171.
- Borrego, L.P., Ferreira, J.M., Pinho da Cruz, J.M., Costa, J.M., 2003. Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(11), 1379-1397.
- Broek, D., 1989. *The Practical Use of Fracture Mechanics*. Kluwer Academic Publishers, 529 p. Netherlands.
- Bucci, R.J., 1979. In part-through crack fatigue life prediction, *ASTM STP 687*, American Society for Testing and Materials, 47-73.
- Budiansky, B. and Hutchinson, J.W., 1978. Analysis of closure in fatigue crack growth. *J. Appl.Mech*, 45(2), 267-277.
- Castleman, Kenneth R., 1996. *Digital Image Processing*. Prentive Hall (Englewood Cliffs, N.J.) 667 p.
- Chang, J. B., Szamossi, M. and Liu K-W., 1981. Random spectrum fatigue crack life predictions with or without considering load interactions. *ASTM STP 748*, 115-132.
- Cruz, P. De la., Odén, 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(1-2), 181-194.
- Corlby, D.M. and Packman, P.F., 1973. On the influence pf single and multiple peak overloads on fatigue crack propagation in 7075-T6511 alaminium. *Engineering Fracture Mechanics*, 5, 155-169.
- Çelik, A., 2006. *Yorulma Ders Notları*.
- Çelik, 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.

- DANotes: Fracture Mechanics: Plasticity,
<http://school.mech.uwa.edu.au/~dwright/DANotes/fracture/plasticity/plasticity.tml#top>, 10.09.2010.
- DANotes: Fracture Mechanics: Yielding fracture mechanics,
<http://school.mech.uwa.edu.au/%7Edwright/DANotes/fracture/elasticPlastic/elasticPlastic.html#top>, 11.10.2010.
- De Koning, A.U. and Dougherty, D.J., 1989. Prediction of low and high crack growth rates under constant and variable amplitude loading. *Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading*, J. Petit et al. (EDS). Elsevier, 208-217.
- Davidson, D.L. and Lankford, J., 1980. *Fatigue of engineering materials and structures*, 3(4), 289-303.
- Dill, H.D., and Saff, C.R., 1976. Spectrum crack growth prediction method based on crack surface displacement and contact analysis. *Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads*, ASTM STP 595, 306-319.
- Edenhofer, B., 1974. Physical and metallurgical aspect of ionitriding. *Heat Treat. of Metals*, 2, 23-28.
- Elber, W., 1970. Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engineering Fracture Mechanics*, 2(1), 37-44.
- Elber, W., 1971. The significance of fatigue crack closure. *ASTM STP 486*, 230-242.
- Fang, Qin-Zhi, Wang, T.J., and Li, H.M., 2007. Overload effect on the fatigue crack propagation of PC/ABS alloy. *Polymer*, 48(22), 6691-6706.
- Fleck, N.A., 1988. Influence of stress state on crack growth retardation. *ASTM STP 924* (1), 157-183.
- Forman, R.G., Kearney, V.E. and Engle, R.M., 1967. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures. *J. Basic Engrg., Trans. ASME*, d89(1967), 459-464.
- Gallagher, J.P. and Hughes, T. F., 1974. Influence of the yield strength on overload fatigue crack growth behaviour of 4340 steel. *Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright Patterson Air Force Base, OH. AFFDL-TR-74-27*.
- Genel, K., Demirkol, M. Ve Çapa, M., 2000. Effect of ion nitriding on fatigue behavior of AISI 4140 steel. *Materials Science and Engineering*. 279 (2000), 207-216.
- Gray, T.D. and Gallagher, J.P. 1976. Prediction fatigue crack retardation following a single overload using a modified wheeler model. *ASTM STP 590*
- Guagliano, M., and Vergani, L., 1997, Effect of nitriding on low-cycle fatigue properties. *Int. J. Fatigue*, 19(1), 67-73.
- Güler, M., Sözen, Ş. ve Özen M., 2007. Tübitak projesi. Proje No:105M085. Görüntü yöntemlerinin beton mikro yapısının ve çelik birleşimlerin deformasyon davranışlarının belirlenmesinde uygulanması.
<http://www.capretz.com/sub/index.jsp?contentid=ZNo5qaNEl8bvNrHMdGnB3N9&gclid=CJyP9ISpsqUCFYMI3wod4SU5Xg>, 21. 09. 2010.
<http://www.capretz.com/sub/index.jsp?contentid=ZNo5qaNEl8bvNrHMdGnB3N94&gclid=CJyP9ISpsqUCFYMI3wod4SU5Xg>, 21.11.2010.
<http://www.pearsonhighered.com/educator/product/Principles-of-Fracture-Mechanics/9780130929921.page>, 3.11.2010.
- Himmelein, M.K., and Hillberry, B.M., 1976. Effect of stress ratio and overload ratio on fatigue crack delay and arrest behaviour due to single peak overloads. *Mechanics of Crack Growth*, ASTM STP 590, American Society for Testing and Materials,

321-330.

- Hudson, C.M., 1981. A root-mean-square approach for predicting fatigue crack growth under random loading. ASTM STP 748, 41-52.
- Huth, H.J., 2005. Fatigue design of hydraulic turbine runners. Ph.D Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Jin., O., 2000. The Characterization of Small Fatigue Crack Growth in PH13-8 Stainless Steel. Ph. D. Thesis. Georgia Institute of Technology, USA.
- Johnson, W.S., 1981. Multi-parameter yield zone model for predicting spectrum crack growth. ASTM STP 748, 85-102.
- Kanninen, M.F., Atkinson, C. and Feddersen, C.E., 1977. A Fatigue crack growth analysis method based on a simple representation of crack –tip plasticity. American Society for Testing and Materials, 122-140.
- Knott, J.F. and Pickard, A.C., 1977. Effect of overloads on fatigue-crack propagation: aluminium alloys. Metal Science, 11(8-9), 399-404(6).
- Laird, C. 1967. Fatigue crack propogation. ASTM STP 415, 131-180
- Lang, M. and Marci, G., 1999. The influence of single and multiple overloads on fatigue crack propagation. Fatigue&Fracture of Engineering Materials & Structures, 22(4), 257-271.
- Langer, B.F., 1937. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. J. Appl. Mech. 4(1937), A160-A162
- Liljedahl, C.D.M., Tan, M.L., Zanellato, O., Ganguly, S., Fitzpartrick, M.E. and Edwards, L., 2008. Evolution of residual stresses with fatigue loading and subsequent crack growth in a welded aluminium alloy middle tension specimen. Engineering Fracture Mechanics ,75(13): 3881-3894.
- Ling, M.R., and Schijve, J.,1992. The effect of intermediate heat treatments on overload induced retardations during fatigue crack growth in an al-alloy. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 15(5), 421-430.
- Manson, S.S and Halford, G.R. 2006. Fatigue and Durability of Structural Materials. ASM International, The Materials Information Society, 455 p, USA.
- Matsuoka, S. and Tanaka, K.1978 . Delayed Retardation Phenomenon of Fatigue Crack Growth Resulting from Single Application of Overload. Engineering Fracture Mechanics,10, 515-523.
- Miner, M.A., 1945. Cumulative damage in fatigue. J.Appl. Mech. 12(1945), A159-A164.
- Morency, R., 2006. Fatigue Crack Initiation and Growth from Scratches in 2024-T351 Aluminium. Ph.M Thesis, Cranfield University, United Kingdom.
- Murthy, A. R. C., Palani, G. S. and Iyer N. R. 2004. State-of-the-art review on fatigue crack growth analysis under variable amplitude loading. Journal of the Instution of Engineers, 85, 118-129.
- Newman Jr, J., 1997. Prediction of Crack Growth under Variable-Amplitude Loading in Thin-Sheet 2024-T3 Aluminum Alloys. NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, Engineering Against Fatigue, University of Sheffield.
- Newman Jr, J.C., 1981. A Crack-closure model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading, Methods and models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random loading. J.B. Chang and C.M. Hudson, Ed. STP , ASTM, 53-84.

- Newman, Jr., J. C., Wolf E., 1988, ASTM Committee E-24 on Fracture Testing, ve ASTM Committee E-9 on Fatigue. Mechanics of fatigue crack closure. ASTM International.
- Ohchang, J., 2000. The characterization of small fatigue crack growth in PH13-8 molybdenum stainless steel, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000PhDT.....87J>, 13.10. 2010.
- Özen, M., 2007. Investigation of relationship between aggregate shape parameters and concrete strength using imaging techniques. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Öztürk, B., 2005. Effect of multiple overloads on fatigue crack propagation in 7075 T6 aluminum alloy. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Pålmgren, A., 1924. The fatigue life of ball-bearings, Z. VDI, 68(1924), 339-341.
- Paris, P.C. and Erdoğan, F., 1960. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. J. Basic Eng., 85, 528-534.
- Peralta, P., Laird, C., Ramamurty U., Suresh S., Camphbell, C.H., King, W.E. and Mitchell T.H., 1999. Fatigue Crack Nucleation in Metallik materials. Small Fatigue Cracks Mechanics, Mechanisms and Applications, Ravichandran, K.S., Ritchie, R.O. AND Murakami, Y. Elsevier, 17-29.
- Pereira, M.V.S, Darwish, F.A.I, Camarao, A.F. and Motta, S.H., 2007. On The Prediction of the Fatigue Crack Retardation Using Wheeler and Willenborg Models. Material Research, 10(2), 101-107.
- Pommier S, Freitas M. D., 2002. Effect on fatigue crack growth of interactions between overloads. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 25(7), 709-722.
- Porter T.R., 1972. Method of analysis and prediction of variable amplitude fatigue crack growth. Engineering fracture mechanics, 4(4), 717-736.
- Pook, L., 2007. Metal Fatigue. Springer Pres, 269p, University Collage London, UK.
- Ramos, M.S., Pereira, M.V., Darwish, F.A., Motta, S.H. and Carneiro M.A., 2003. Effect of single and multiple overloading on the residual fatigue life of a structural steel. Fatigue&Fracture of Engineering Materials&Structures, 26(2), 115-121.
- Rice, J.R., 1967. The mechanics of crack tip defprmtion and extension by fatigue. Ftigue Crack Propagation. ASTM STP 415(1967, 247-309.
- Richard, H.A., Sander, M., Fulland, M., Kullmer, G., 2008. Development of fatigue crack growth in real structures. Engineering Fracture Mechanics, 75(3-4), 331-340
- Ritchie,R.O., 2004. Role of fracture mechanics in life prediction and quality control of medical implants. ASM Intl. Materials and Processes for Medical Devices Conference, St. Paul, Minnesota.
- Robin, C., Busch, M. L., Chergui, M., Lieurade, H.P. and Pluvinae G., 1988. Influence of Series of Tensile and Compressive Overloads on 316L Crack Growth. Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading, Ed: J Petit D I Davidson, S Suresh and P Rabbe, Elsevier Applied Science, Londra, 87-97.

- Romeiro, F., M. de Freitas and M. da Fonte. 2009. Fatigue crack growth with overloads/underloads: Interaction effects and surface roughness. *International Journal of Fatigue*, 31(11-12), 1889-1894.
- Rudd, L. and Engle Jr, R.M., 1981. Crack growth behaviour of centercracked panels under random spectrum loading. *ASTM STP 748*, 103-14.
- Saff, C.R., 1984. Crack growth retardation and acceleration models. *ASTM STP 842*, 36-49
- Sadeler, R., and Şengül, A.B., 2006. Influence of induction hardening on fretting fatigue behaviour of AISI 1045 steel under two different contact pressures. *Kovove Metallic Materials*, 44(4), 235-241.
- Samarasinghe, S. ve Kulasiri, D., 2004. Stress intensity factor of wood from crack-tip displacement fields obtained from digital image processing. *Silva Fennica*, 38(3), 267-278.
- Sander, M. and Richard, H.A., 2003. Life time predictions for real loading situations-concepts and experimental results of fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 25(9-11), 999-1005.
- Sander, M. and Richard, H.A., 2006. Experimental and numerical investigations on the influence of the loading direction on the fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 28(5-6), 583-591.
- Sanford, R., 2003. *Principles of Fracture Mechanics*. Printice Hall, 416 p, University of Maryland, USA.
- Schijve, J. 2009. Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerated? *International Journal of Fatigue*, 31(6), 998-1011.
- Schijve, J., 2001. *Fatigue of Structures and Materials*. Kluwer Academic Publishers, 517p, Dordrecht, The Netherlands.
- Schijve, J., 2009. *Fatigue of Structures and Materials*. Springer, 2nded., 621p, Science+Business Media, B.V.
- Schijve, J., 2003. Fatigue of structures and materials in the 20 th century and the state of the art. *Materials Science*, 39(3), 307-333.
- Shin, C.S. and Fleck, N.A., 1987. Overload retardation in a structural steel. *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*, 9(5), 379-393.
- Sirin, S. Y., Sirin, K. ve Kaluc, E., 2008. Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel. *Materials Characterization*, 59(4), 351-358.
- Sözen, Ş. and Güler, M., 15-17 Ekim 2008. Measurement of small strains in steel samples using digital imaging techniques. 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, Kuzey Kıbrıs.
- Stoychev, S.I., 2005. Load Interaction Effects on Fatigue Crack Growth. Ph.D Thesis, Western Michigan University, USA.
- Sun, Y., 2006. The Study of Overload Effects on Fatigue-Crack-Growth Behavior by Neutron Diffraction. Ph.M Thesis, The University of Pennessee Knoxville, USA.
- Suresh, S., 1983. Micromechanisms of fatigue crack grow retardation following overloads. *Engineering Fracture Mechanics*, 18(3), 557-593.

- Suresh, S., 1998, *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press, 683 p, Cambridge, United Kingdom. http://www.cambridge.org/gb/knowledge/isbn/item1154490/?site_locale=en_GB (15.04. 2011).
- Taira, S., Tanaka, K. and Hoshina, M., 1979. Grain size effect on crack nucleation and growth in long-life fatigue of low-carbon steel. *Fatigue Mechanism, Proceedings of an ASTM-STP 675*, American Society for Testing and Materials, 135-173.
- Terent'ev, V.F., Michugina, M.S., Kalmakov, A.G., Kvedaras, V., Ciuplys, V., Ciuplys, A. And Vilys, J., 2007. The effect of nitriding on fatigue strength of structural alloys. *Mechanika*, 2(64), 12-22.
- Terres, M.A., Ben Mohamed, S. 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.
- Varfolomeev, I., Luke, M., and Moroz, Sergii., 2010. Experimental and numerical investigations of fatigue crack growth in various specimen geometries. *Procedia Engineering*, 2(1), 1829-1837.
- Von Euv E.F.J., and Hertzberg, R.W., 1972. Delay effects in fatigue crack propagation. *ASTM STP 513*, USA
- Ward-Close, C.M, Blom, A.F., and Ritchie, R.O., 1989. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading: An experimental and numerical study. *Engineering Fracture Mechanics*, 32(4), 613-638.
- Wheeler, O.E., 1972. Spectrum Loading and Crack Growth. *Transactions of the ASME Series D, Journal of Basic Engineering*, 94, 181-186.
- Willenborg, J. D., Engle, R.M., Jr., and Wood, H. A., 1971. A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept. *AFFDL-TM-71-1-FBR*, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright Patterson Airforce Base, OH.
- Yıldız, F., 2010. Farklı Yüzey İşlemlerinin Metalik İmplat Malzemeler Üzerine Etkileri. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye*.
- Yin, S., 2006. Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Case Hardened Steels. *Ph.D Thesis, Toledo University, Ohio, USA*.
- Zitounis, V., 2004. Fatigue Crack Growth Rates under Variable Amplitude Load Spectra Containing Tensile Underloads. *Ph.D Thesis, Cranfield University, United Kingdom*.

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve Lise eğitimini Erzurum’da tamamladı. 1993 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 1997 yılında mezun oldu. 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’ndan Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl doktora eğitimine başladı. 1998-2008 yılları arasında İller Bankası 14. Böl. Müdürlüğü’nde ve 2008-2009 yılları arasında DSİ 24. Böl. Müdürlüğü’nde makine mühendisi olarak görev yaptı. 2009 yılında DSİ’den ayrılarak TÜBİTAK yurt içi doktora bursuyla doktora eğitimini devam ettirdi. Evli ve iki çocuk babasıdır.