

FARKLI ÇEVİRİM SAYILARINDA UYGULANAN AŞIRI YÜKLEMENİN OLUŞTURDUĞU YORULMA ÇATLAK İLERLEME GECİKMESİ ÜZERİNDE PLAZMA NİTRÜRLEMENİN ETKİSİ

A. B. Şengül, A. Çelik

Atatürk Üniversitesi Makina mühendisliği bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye
absengul@yahoo.com, ayhcelik@atauni.edu.tr

(Geliş/Received: 07.01. 2011 ; Kabul/Accepted: 14.02.2012)

ÖZET

AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş CT (Compact Tension) numuneleri 500⁰C sıcaklıkta 2 saat süreyle %50H₂-%50N₂ gaz karışımında plazma nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur. Blok aşırı yükleme (AY) çevrim sayısının oluşturduğu yorulma çatlak ilerleme gecikmesi üzerinde plazma nitrürlemenin etkisi incelenmiştir. Hem işlemsiz hemde nitrürlenmiş numunelerde, AY bloğu çevrim sayısı arttırıldıkça 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 olanlardada düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmüştür. 3000 çevrim AY uygulamasında ise nitrürlenmiş numunelerde AY'nin sebep olduğu çatlak gecikmesinin işlemsizlere göre daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği görülmüştür. Numunelerin yapısal ve mekanik özellikleri, x-ışını difraksiyonu, mikro sertlik testi, taramalı elektron mikroskobu, optik mikroskop ve optik dijital görüntüleme araçları kullanılarak araştırılmıştır. Yorulma çatlak gelişimini takip etmede dijital görüntü analizi yöntemi kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plazma nitrürleme, Aşırı yükleme, Çatlak ilerleme gecikmesi

FATIGUE CRACK GROWTH RETARDATION BY THE NUMBER OF DIFFERENT CYCLES OVER LOADING ON EFFECT OF PLASMA NITRIDING

ABSTRACT

Made of AISI 4140 steel CT (Compact Tension) specimens subjected to plasma nitriding process, temperature of 500⁰C for 2 hours 50N₂%-50H₂% gas mixture. Block Over load (OL) the number of cycles on fatigue crack growth retardation, investigated the effect of plasma nitriding. 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 overloading, showed higher levels occurred on the nitrided samples than unnitrided and the overload cycle in 3000 increased. Structural and mechanical properties of the samples; investigated using x-ray diffraction, micro hardness testing, scanning electron microscopy, optical microscopy and optical digital imaging tools. Digital image analysis method was used to monitor fatigue crack growth.

Keywords: Plasma nitriding, over load, Crack growth retardation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Değişken yüklerin etkideği yapısal elemanlar yorulmaya maruz kalırlar. Yorulma hasarının oluşumunu önlemek veya etkisini asgariye düşürmek için çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Plazma nitrürleme, elektrik akımının azot gazı ortamında akışıyla elde edilen plazma yardımıyla, metal yüzeyine azot atomu difüze ettirilmek suretiyle gerçekleştirilen bir yüzey sertleştirme işlemidir.

Malzeme üzerinde yorulma hasarının oluşumunu analiz etmede üç temel yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar, Gerilme Ömrü (Stress Life), Şekil değiştirme Ömrü (Strain Life) ve Kırılma Mekanikliği (Fracture Mechanics) yaklaşımıdır. Plazma nitrürlemenin yorulma ömrü üzerindeki etkisi, gerilme ömrü yaklaşımıyla bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (1-6). Plazma nitrürleme işleminin toplam yorulma ömrü üzerinde olumlu etkisinin olduğu bilinmektedir (1-7).

Geleneksel olarak mühendislik yapılarının tasarımında malzemenin toplam yorulma ömrü dikkate alınır. Fakat makine elemanları işletme şartlarında, çizikler, katışkılar ve çatlaklar gibi kusurlar içerebilir. Dinamik yükler altında çalışan yapısal elemanda, yorulma çatlakları bu kusurlardan başlayabilir. Dolayısıyla, çatlaklı malzemenin dayanımının incelenmesi ve toplam yorulma ömrünün incelenmesinin yerini alması, daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır (8).

Mühendislik yapıları çalışma şartlarında genellikle değişken genlikli yüklemeye (DGY) maruzdurlar. Yük genliğinin ard arda değişmesi ile önceki yüklemeye, sonradan gelen yüklemenin yorulma çatlak gelişimi (YÇG) üzerindeki etkisini değiştirmektedir (9). Metalik malzemelere sabit gerilme genliğiyle çatlak ilerlerken çeki aşırı yüklemesi (AY) uygulanmasının, çatlak ilerlemesini geciktirdiği bilinmektedir (10). Bu durum çatlak ilerleme gecikmesi (retardation) olarak adlandırılmaktadır (11).

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğine uygulanan plazma nitrürleme işleminin, çeki aşırı yüklemesinin sebep olduğu çatlak ilerleme gecikmesine etkisi, farklı çevrim sayılarında aşırı yüklemeler uygulanarak deneysel olarak araştırılmıştır. Çatlak boyunu gözlemek için endüstriyel kameralar kullanılarak dijital görüntü analizi yöntemi, çatlak ucu açılma deneyine uyarlanmıştır. Kullanılan malzemenin yapısal ve mekanik özelliklerini tespit için Mikrosertlik test ünitesi, X ışını kırınım ölçüm cihazı, taramalı elektron mikroskobu, optik mikroskop ve endüstriyel dijital kameralar kullanılmıştır.

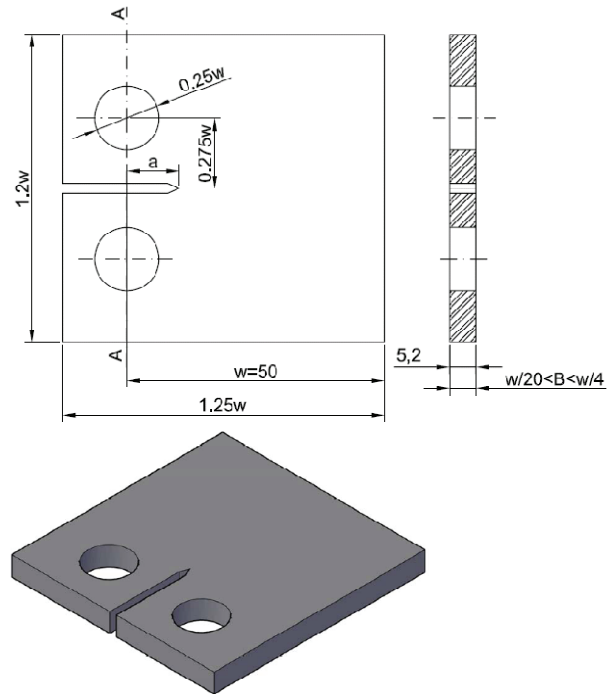
2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1 Malzeme (Materials)

Yorulma çatlak gelişim deneyi numuneleri, kimyasal kompozisyonu tablo 1 de verilen, AISI 4140 çeliğinden L-T yönünde kesilerek elde edilmiştir. ASTM E647-05 test standardına göre verilen ölçülerdeki (Şekil 1) yoğun çekme (compact tension CT) numuneleri hazırlanmıştır.

Tablo 1. Az alaşımlı AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
%	0,42	0,78	0,26	1,09	0,015	0,21	97,23
Ağırlık							



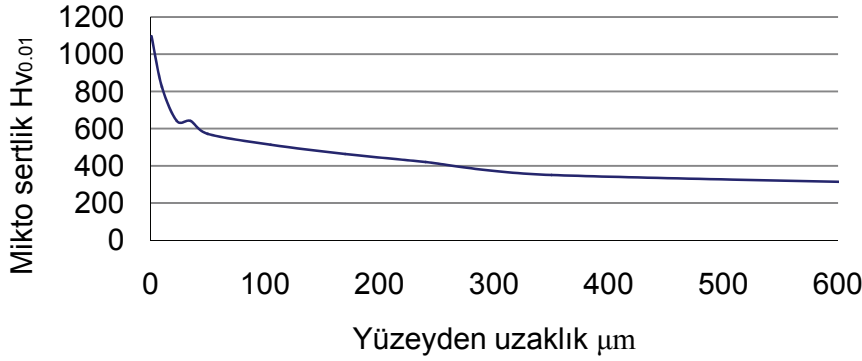
Şekil 1. ASTM E647-05 test standardına göre hazırlanan CT numunesi teknik resmi (Dimensions of the CT specimen according to ASTM E647-05)

Hazırlanan CT numuneleri 850°C sıcaklıkta Argon gazı atmosferinde 30 dakika süreyle normalizasyon işlemine tabi tutulmuş, daha sonra Argon gazı atmosferinde soğutulmuştur. Numunelerin yüzey pürüzlülükleri $Ra \leq 0.10 \mu m$ olacak şekilde, 1200 numara SiC zımpara kâğıdı ile zımparalanmış ardından 3 μm luk alümina tozu ile parlatılmıştır. Daha sonra numuneler vakum odacığının içersine konularak nitrürleme işlemi öncesinde 500 Pa basınç altında hidrojen gazı kullanılarak 15 dakika süreyle, 500 V luk voltajda temizlik amaçlı saçılma (Sputtering) işlemine maruz bırakılmıştır. Ardından 500 Pa sabit basınç altında, 50% N₂ ve 50% H₂ gaz atmosferinde, 2 saat süreyle plazma nitrürleme işlemi yapılmıştır.

2.2 Sertlik dağılımı (Distribution of hardness)

Çelik numuneler üzerinde plazma nitrüleme yöntemiyle oluşturulan nitrür tabakasının Vickers cinsinden mikro sertlik ölçümleri, piramit uç ile 15 s batma süresi ve 25g yük altında Buehler Micromet 2001 Mikro sertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Çatlak boyu, pim merkezlerinden itibaren çentik dâhil $a=17,5\text{mm}$ (çentik boyu hariç ön yorulma çatlağı net uzunluğu $6,7\text{mm}$) değeri deney başlangıç noktası olarak kabul edilmiş deney bu noktadan sonra başlatılmıştır.



Şekil 2. AISI 4140 çeliğinin nitrüleme sonrası sertlik dağılımı (The microhardness distribution of post nitriding AISI 4140 steel)

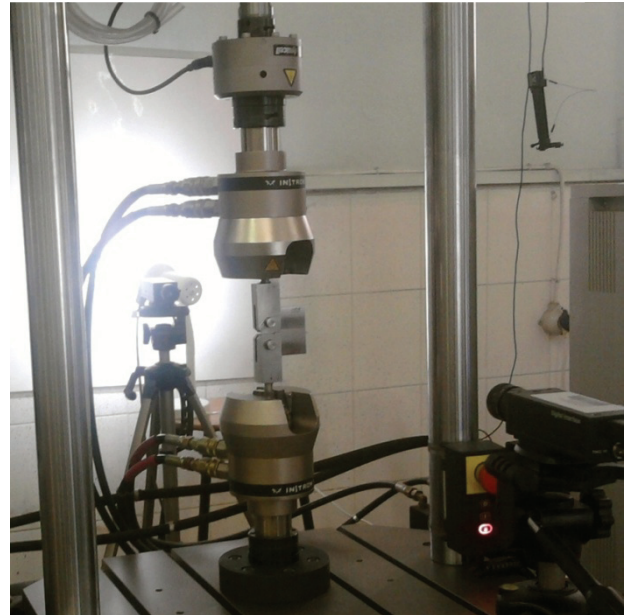
Nitrür tabakasının sertlik dağılımı Şekil 2 de verilmiştir. En büyük sertlik değeri, difüzyon tabakasıyla ilişkili olarak yüzeyde elde edilmiş içe doğru gidildikçe sertliğin azaldığı görülmüştür.

2.3 Yorulma çatlak gelişimi (Fatigue crack growth properties)

Bir servo hidrolik test cihazına bağlanan numuneler yük kontrollü olarak $R=0,1$ ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) yük oranıyla 5000 N'luk yük uygulanarak takriben net 6,7 mm boyunda ASTM E647-05 test standardına uygun olarak yorulma ön çatlağı oluşturuluncaya kadar yorulma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3). YÇG deneyi, eksenel çeki-çeki yükü altında, sinüs eğrisi dalga formunda, oda sıcaklığında ve havada yapılmıştır. Hem nitrürlenmiş olan hem de nitrürlenmemiş numuneler önce sabit genlik altında yorulma çatlak ilerlemesi testine tutulmuştur. Daha sonra her deneyden ikişer tekrar yapılmak üzere 1,10,20,100,1000 ve 3000 çevrimlik blok AY deneyleri yapılmıştır.

Sabit genlikli yüklemelerde (SGY) $P_{\min}=500\text{N}$, $P_{\max}=5000\text{N}$. Aşırı yüklemelerde ise $P_{\min}=500\text{N}$ ve $P_{\max}=10000\text{N}$ ($R_{AY}=2$) alınmıştır.

Yorulma çatlağının ilerlemesinin tespiti için her iki yüzeyden de görüntü alınarak görüntü üzerinden ölçümler yapılmak suretiyle değerlendirilme yapılmıştır. Sayısal görüntü üzerinden çalışılan numuneye temassız olarak ölçümler yapılmasıyla ilgili olarak çok sayıda çalışma mevcuttur (12–16). Görüntü almak için iki adet endüstriyel kamera, 2 adet 50mm sabit odaklı lensler, iki adet veri toplama kartı ve ara yüz yazılımı kullanılmıştır.

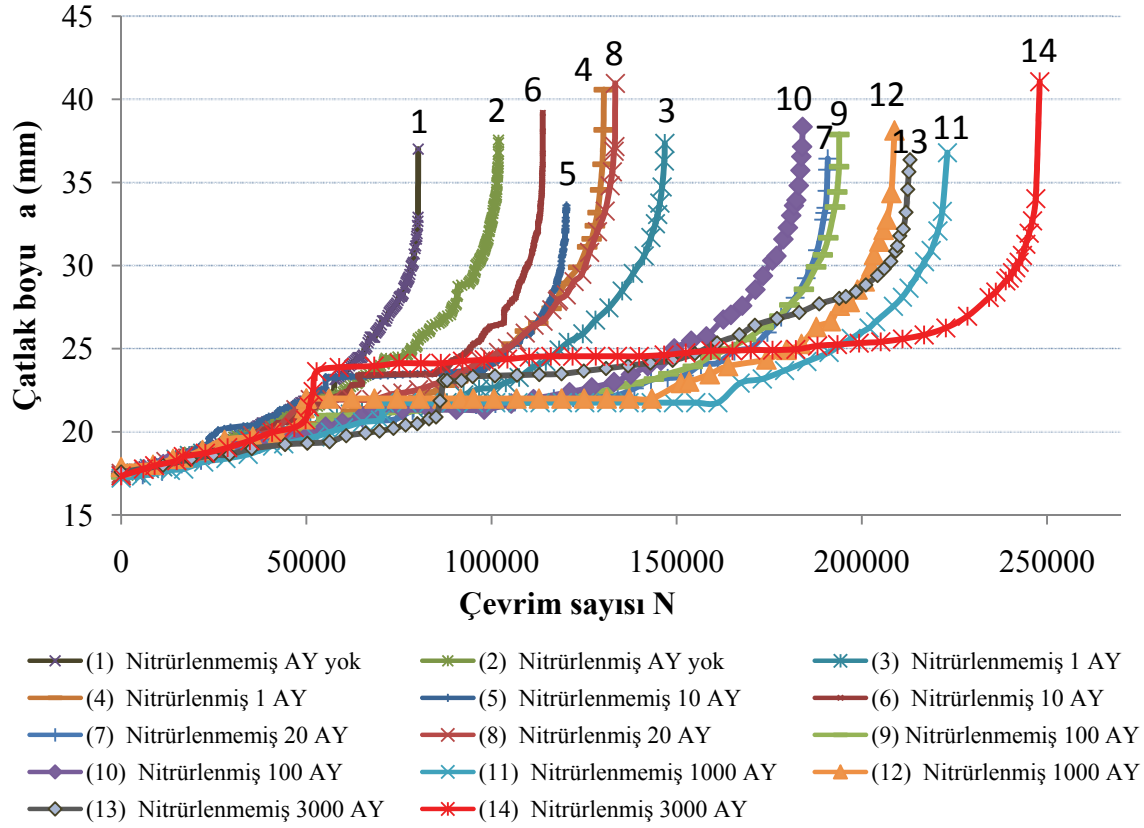


Şekil 3. Çatlak ucu açılma deney düzeneği (Crack Tip Opening Displacement test set up)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 SGY ve DGY altında çatlak gelişim davranışı (constant amplitude loading (CAL) and variable amplitude loading (VAL) fatigue crack growth (FCG) characteristics)

Şekil 4 de nitrürlenmemiş ve nitrürlenmiş numunelerin SGY ve DGY altındaki çatlak ilerleme davranışları görülmektedir. Grafikler oluşturulurken çalışma aralığı olarak w ; numune anma ölçüsü olmak üzere, çatlak boyunun $a/w=0,40$ ($a=20\text{mm}$)



Şekil 4. Nitrülenmiş ve nitrülenmemiş CT numunelerinin farklı çevrim sayılarında (1, 10, 20, 100, 1000, 3000) AY uygulanarak yapılan yorulma çatlak gelişim testlerinden elde edilen a-N eğrileri (Crack growth diagrams of nitrided and un-nitrided CT samples under different the number of cycles OL (1, 10, 20, 100, 1000, 3000))

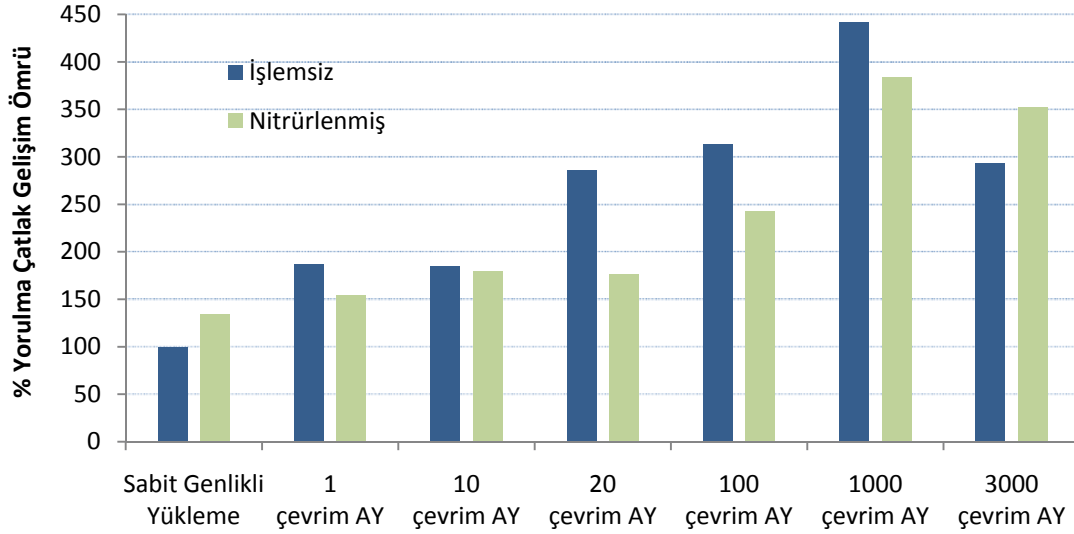
olduğunda ile son kırılma arasındaki bölgede ki çatlak ilerleme ömrü esas alınmıştır. Aşırı yüklemeye noktası olarak $a/w=0.45$ ($a=22.5\text{mm}$) seçilmiştir. Her bir eğri bir deneyi temsil etmektedir. Plazma nitrüleme işlemi, SGY altında yorulma çatlak gelişimi (YÇG) ömrünü önemli ölçüde artırmıştır. nitrülenmemiş numune için YÇG ömrü ortalama 46000 çevrim olarak tespit edilmiş iken nitrülenmiş olanı 62000 çevrim olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4’de nitrülenmiş ve nitrülenmemiş, SGY ve farklı çevrim sayılı (1, 10, 20, 100, 1000, 3000) blok AY’ler uygulanmış CT numuneleri için a-N eğrileri karşılaştırılmıştır. Her eğri bir deneyi temsil etmektedir. Şekil 4’deki 1 ve 2 eğrileri SGY altında nitrülenmemiş ve nitrülenmiş numunelere ait YÇG eğrileridir.

Şekil 4’de 1, 10, 20, 100 ve 1000 çevrimlik blok AY uygulamalarında nitrülenmemiş numune, nitrülenmiş olana göre daha uzun bir çatlak gecikmesi sergilemiştir. Plazma nitrüleme işlemi, 1000 çevrime kadar blok aşırı yüklemeye uygulandığında yorulma çatlak gecikmesinin azalmasına sebep olmuştur. Ancak, 3000 çevrimlik blok AY uygulamasında durum değişmiş nitrülenmiş olan numune (eğri 14), nitrülenmemiş olana göre

(eğri 13) daha uzun bir çatlak gecikmesi periyodu sergilemiştir.

Şekil 4 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 nitrülenmiş olan numune nitrülenmemiş olana göre de uzun bir YÇG ömrü sergilemiştir (13 ve 14 eğrileri). 3000 çevrimlik AY bloğunda artık AY’nin kendisi çatlak ilerleten mekanizma olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. Toplam yorulma ömründe nitrülenmemiş olan numunede 1000 çevrim AY’ye göre daha az YÇG ömür artışı görülmüştür. Nitrülenmiş olan numunede yüzeydeki sert nitrür tabakası AY esnasında çatlak ilerleme hızını düşürmüştür dolayısıyla nitrülenmiş olan numune daha uzun bir YÇG ömrü sergilemiştir.



Şekil 5. SGY ve DGY altında nitrülenmenin yorulma çatlak gelişim ömrü üzerindeki etkisi (The effect of nitriding on fatigue crack growth life under CAL and VAL)

AY esnasında çatlak, blok AY' de, tek AY' ye göre daha fazla ilerler. Blok AY' den sonra çatlak boyu, tek AY'ye göre daha uzun olduğundan; çatlak, blok AY deneyinde daha hızlı ilerlemesibeklenir. Ancak yapılan deneysel çalışmada durumun farklı olduğu görülmüştür. Çatlak gecikmesinin, blok AY durumunda tek AY durumuna göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç literatür ile uyumludur (17).

Şekil 5 de hem nitrülenmemiş hem de nitrülenmiş numuneler için AY çevrim sayısının çatlak ilerleme ömrü üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil üzerinde nitrülenmemiş numunenin SGY altındaki YÇG ömrü %100 ömür olarak alınmış, diğer deney şartlarındaki YÇG ömürleri bu değer ile kıyaslanarak yüzde ömür olarak gösterilmiştir.

Nitrülenmemiş numunelerin AY çevrim sayısına karşı gösterdikleri çatlak ilerleme ömürleri incelendiğinde; 1 çevrimlik AY'den itibaren AY'nin çatlak ilerleme ömrüne önemli miktarda etki ettiği (%87 artış) görülmektedir (SGY işlemsiz numune YÇG ömrü referans alınmıştır. 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 YCG ömrü artışı gözlenmiştir. 1000-3000 çevrimlik blok AY uygulamaları arasında ise YÇG ömrü %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.

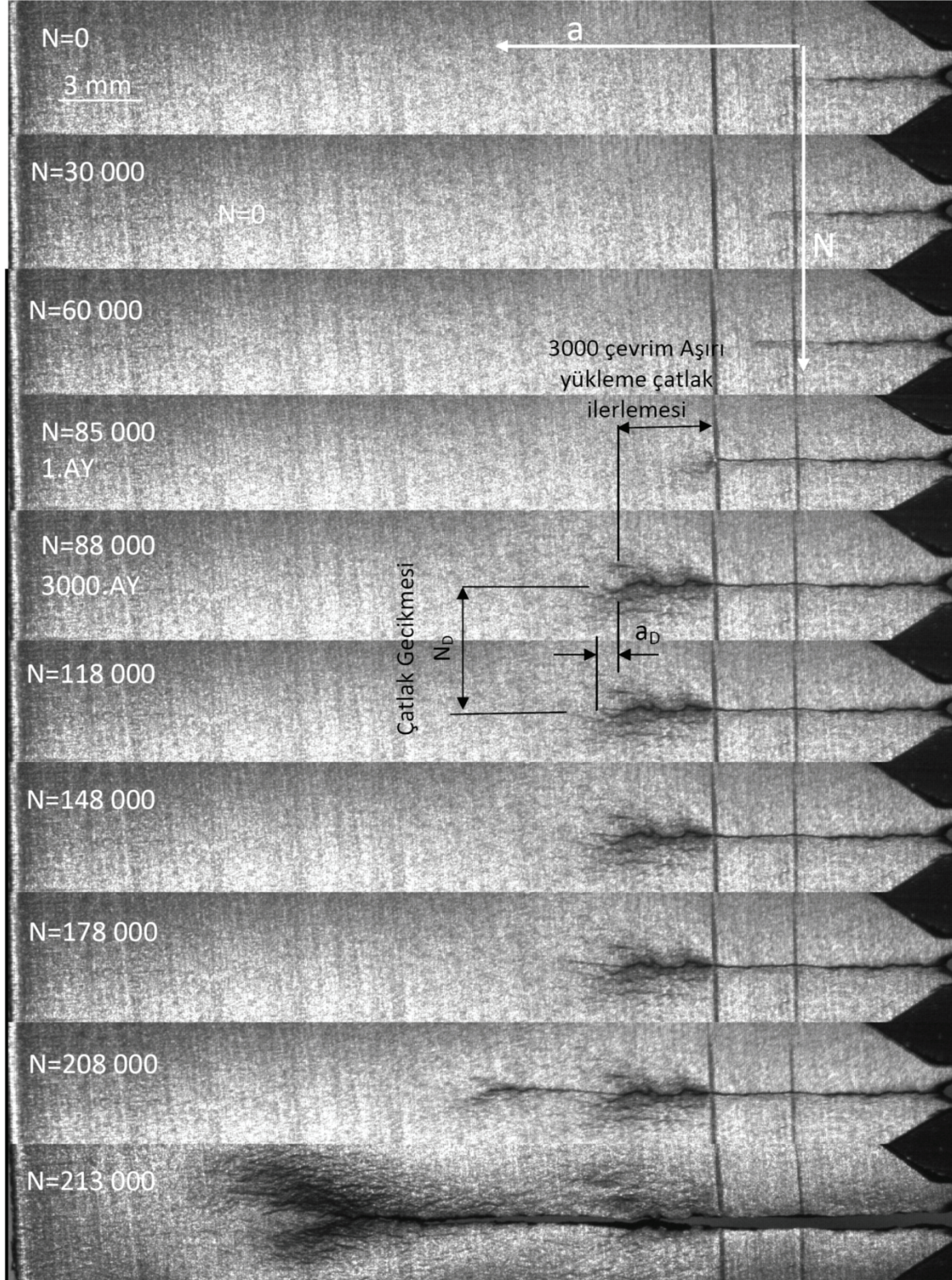
Nitrülenmiş numunelerin AY çevrim sayısına karşı gösterdikleri çatlak ilerleme ömürleri incelendiğinde:

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. 3000 çevrimlik AY bloğu uygulamasında ise YÇG ömrü artışında (%253), düşüş görülmüştür.

Şekil 5 üzerinden nitrülenmemiş ve nitrülenmiş numuneler birlikte ele alındığında:

- SGY altında nitrüleme işlemi YÇG ömrünü arttırmıştır (%35)
- Hem nitrülenmemiş hem de nitrülenmiş numunelerde AY uygulaması olumlu tesir etmiş YÇG ömrünü arttırmıştır.
- Hem nitrülenmemiş hem de nitrülenmiş numunelerde AY bloğunun çevrim sayısı arttıkça YÇG ömrü de belli bir noktaya kadar artmıştır.
- 1000 çevrimlik blok AY den sonra, AY çevrim sayısı arttıkça YÇG ömründeki artış azalmaya başlamıştır (daha az artış olmuştur).
- İşlemsiz numuneler üzerinde AY nin YÇG ömrü üzerindeki olumlu etkisi hemen ön plana çıkmışken, nitrülenmiş olanda daha az etkili olmuştur. Ancak 3000 çevrimlik blok AY de durum değişmiş nitrülenmiş olan da AY nin daha fazla faydalı etkisi görülmüştür.

Pommier ve Freitas (17) AY nin sebep olduğu çatlak gecikmesinde, 10 çevrimlik aşırı yüklemeye 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 çevrimleri sırasında artık gerilmeler oluşarak çevrimsel sertleşmeye sebep olacağı düşünüleceğini



Şekil 6. Nitrürlenmemiş CT numunesinin 3000 çevrimlik AY altında adım adım çatlak ilerleme görüntüsü (a_D) çatlak gecikmesi evresinde çatlak ilerleme miktarı (Unnitrided CT sample under 3000 cycles over load step by step crack growth images (a_D) phaseretardation of crack, the amount of crack growth)

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 bu duruma sebep olamayacağını öne sürmüşlerdir.

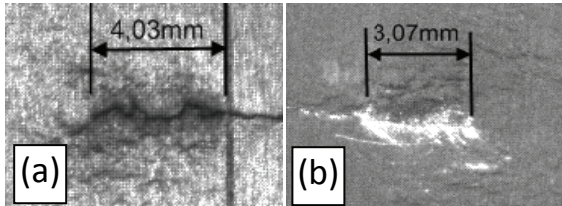
Şekil 6 da işlemsiz numunede çatlak sabit genlik altında ilerlerken 3000 çevrimlik blok AY uygulanmış

ardından tekrar temel seviye ile çatlak ilerlemesinin devam ettirilmesi durumuna ait çatlak ilerleme evreleri verilmiştir.

Şekil 6' da AY noktasına gelinceye kadar çatlak lineer bir şekilde ilerlemiş ($0,35 \cdot 10^{-4}$ mm/çevrim), 3000 çevrimlik AY esnasında çatlak bir hayli hızlı ilerlemiş ($13,6 \cdot 10^{-4}$ mm/çevrim), AY sonrası 90000 çevrim gayet yavaş ilerlemiş ($0,28 \cdot 10^{-4}$ mm/çevrim), son 38000 çevrimde gittikçe hızlanarak ($2,32 \cdot 10^{-4}$ mm/çevrim) kırılmıştır. Çatlak ilerleme hızları arasındaki çok büyük farklılık görülmektedir. Çatlağın AY uygulanan bölgesinde yüzeyde büyük plastik bölge mevcuttur. Yüksek çevrimli yorulma mekanizmasında makro boyutta elastik bir şekil değiştirmeden söz edilebilir. Ancak düşük çevrimli yorulma durumunda makro boyutta her bir çevrimde plastik dönüşümden söz etmek gerekir (10). AY çevrimleri esnasında düşük çevrimli yorulma yüklemesinin karakteristik özellikleri görülmüştür. Literatürde AY sonrası çatlak gecikmesine, plastisitenin sebep olduğu çatlak kapanmasının sebep olduğuna dair deneysel çalışmalar mevcuttur (10, 18–21).

3.2 Yorulma çatlak gelişimi esnasında yüzey morfolojisi (Morphology of surface during FCG period)

Şekil 7' de blok AY esnasında oluşan çatlak yüzey durumları görülmektedir. Şekil 7 (a) da nitrülenmemiş numune 3000 çevrimlik AY sonrası, (b) de nitrülenmiş numune 3000 çevrimlik AY sonrası çatlak yüzey durumu görülmektedir. 3000 çevrimlik AY neticesinde işlemsiz numunede çatlak yüzeyde 4,03mm ilerlerken nitrülenmiş olanda 3,07mm ilerlemiştir. Nitrüleme işlemi blok AY'nin sebep olduğu çatlak ilerleme miktarını azaltmıştır.



Şekil 7. Aşırı yükleme çevrimi sırasında oluşan çatlak ilerleme miktarları (a) nitrülenmemiş 3000 çevrim AY sonrası (b) nitrülenmiş 3000 çevrim AY sonrası, (Overload (OL) cycles, the amount of crack growth during, (a) unnitrided sample after 3000cyc OL, (b) nitrided sample after 3000cyc OL)

3.3 Yorulma çatlak gelişim testi sonrasında kırılma yüzeyi morfolojisi (After FCG test fracture surface morphologies)

Şekil 8' da (a) işlemsiz numune için, (b) nitrülenmiş numune için; SGY altında çatlak ilerlemesi devam ederken 3000 çevrim AY uygulandıktan sonra tekrar nominal yük seviyesine dönüldüğü durumda ki kırılma yüzeyi görülmektedir. Şekilde aşırı yükleme öncesi

(AYÖ) bölge yükün ve dolayısıyla çatlak ilerlemesinin 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. AYB Şekil 8' (a) da, (b) ye göre daha büyüktür. Yani 3000 çevrimlik AY evresinde, işlemsiz numunede nitrülenmiş olana göre çatlak daha fazla ilerlemiştir. Nitrülenmiş numunede oldukça sert olan yüzey tabakası çatlağın ilerlemesini yavaşlatmıştır. Keza AY ile oluşan büyük plastik bölgenin büyüklüğünü de aynı şekilde sınırlandırmaktadır. Bu durum nitrüleme işleminin, AY oluşturduğu faydalı çatlak gecikmesini azaltmasını izah edebilir (Şekil 5).

Şekil 5' de görüldüğü gibi bütün AY bloklarında aşırı yüklemenin sebep olduğu çatlak gecikmesi, işlemsiz numunelerde daha fazla görülmüş, ancak 3000 çevrimlik blok yüklemeye nitrülenmiş olan numune daha uzun bir çatlak gelişim ömrü sergilemiştir. Belirli bir AY çevrim sayısından sonra AY kendisi çatlak ilerleten bir etken olarak ortaya çıktığından AY çevrim sayısının daha fazla artırılması faydalı değil zararlı olmaktadır.

Bu noktada plazma nitrüleme işlemi AY açısından faydalı etkisini ortaya koymaktadır. Nitrüleme işlemi, AY çevrim sayısının artmasıyla YÇG ömründeki artışın pik yaparak azaldığı noktayı daha ilerilere taşımaktadır. Nitrüleme AY çevrim sayısının çok fazla artırılmasıyla oluşan çatlak gelişimindeki kötüye gidişi azaltmaktadır.

Şekil 9 (a) da işlemsiz ve (b) de nitrülenmiş olan numunenin yorulma hasarı kırılma yüzey görüntüsü taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü görülmektedir. İşlemsiz numune kırılma yüzeyi yüzey ile iç bölge arasında üniform bir görünüm sergiler iken nitrülenmiş olanda durum farklıdır. Nitrülenmiş olan numunenin yüzeyi ile merkezi arasında farklı yönelimler mevcuttur ve merkez ile yüzey arasında homojen olmayan bir yapı söz konusudur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

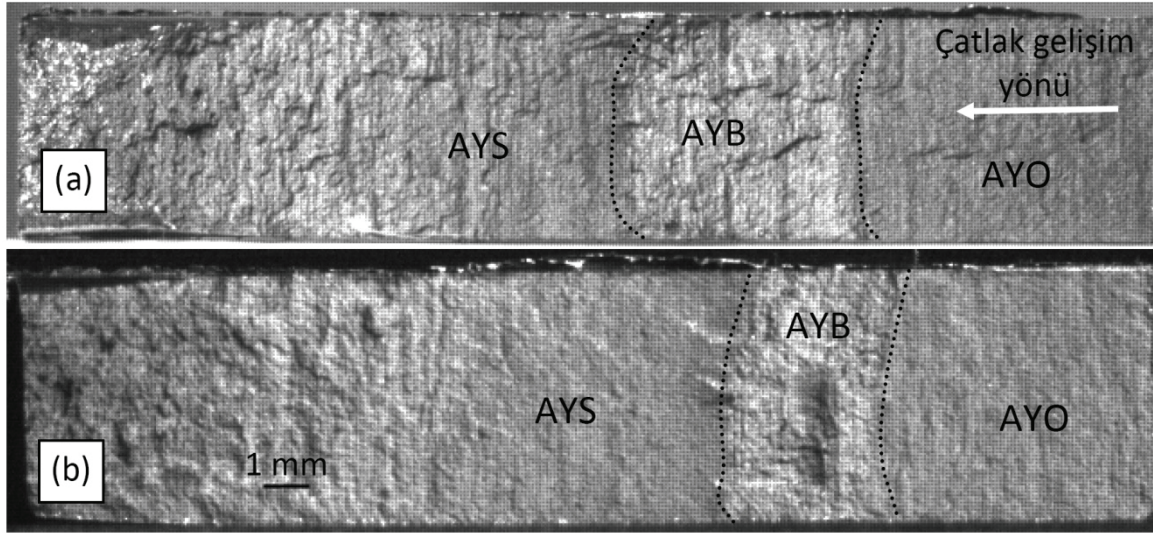
AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş olan ASTM E647 test standardına göre düzenlenmiş CT numunesi üzerinde aşırı yükleme bloğu çevrim sayısının oluşturduğu yorulma çatlak ilerleme gecikmesi üzerinde, plazma nitrülemenin etkisi incelenmiştir. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Plazma nitrüleme işlemi sabit genlikli yükleme altında yorulma çatlak gelişimini yavaşlatmıştır. Yüzeydeki sert nitrür tabakası çatlak ilerlemesini yavaşlatmıştır.

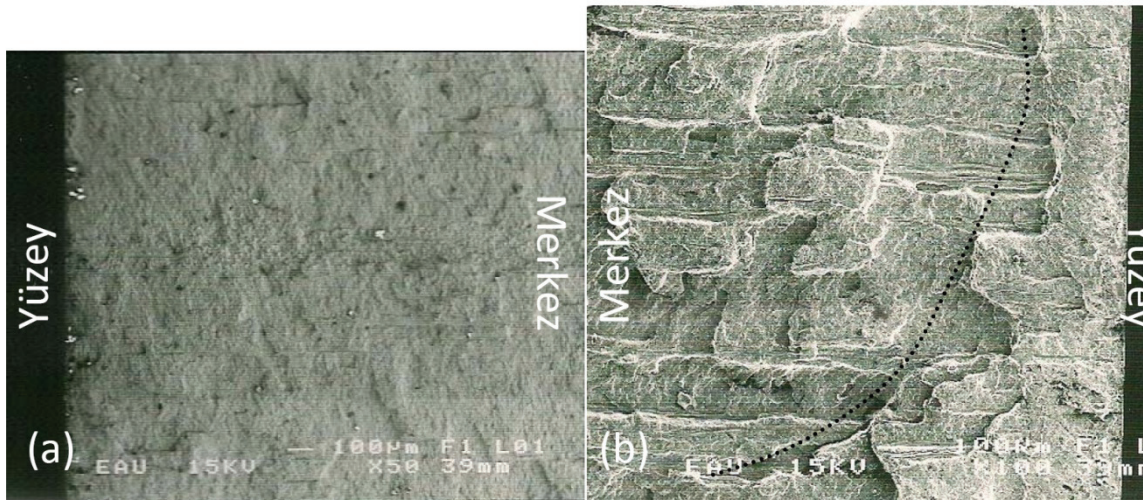
Aşırı yükleme bloğu çevrim sayısı arttıkça yorulma çatlak gelişim gecikmesi de artmıştır. Ancak belirli bir aşırı yükleme çevrim sayısından sonra, aşırı yükleme çevriminin kendisi çatlak ilerleten etken olarak ortaya çıktığından, çatlak gelişimindeki gecikme azalmaya başlamıştır.

- Plazma nitrüleme işlemi belirli bir aşırı yükleme çevrim sayısına kadar, aşırı yüklemenin sebep olduğu çatlak gecikmesini azaltmıştır. Bunun sebebi, nitrürlenmiş olan numunelerin yüzeyindeki sert nitrür tabakasının aşırı yükleme anında kırılması olarak değerlendirilmiştir.
- Çatlak gecikmesinin pik yaparak tekrar azalmaya başladığı aşırı yükleme çevrim sayısında (3000

çevrim), nitrürlenmiş olan numune, işlemsiz göze daha fazla çatlak gecikmesi göstermiştir. Aşırı yükleme çevrim sayısı artırıldığında, AY çevrimlerinin kendisi çatlak ilerleten etken olarak ortaya çıkmaya başlamış, 3000 çevrimlik AY durumunda AY çevrimleri sabit genlikli çevrim gibi etki oluşturarak çatlak ilerletmiştir. Plazma nitrüleme işlemi yüzeyde sert nitrür tabakası oluşturarak sabit genlikli yük altında çatlak ilerlemesini yavaşlattığından, yüksek çevrim sayılı AY bloğu uygulamasında nitrürlenmiş olan numune nitrürlenmemiş olana göre daha uzun bir çatlak gelişim ömrü sergilemiştir.



Şekil 8. 3000 çevrimlik blok AY sonrasında (a) işlemsiz, (b) nitrürlenmiş numuneye ait kırılma yüzey görüntüsü. AYO: aşırı yükleme öncesi, AYB: aşırı yükleme bölgesi, AYS: aşırı yükleme sonrası (After the 3000 cycles block over load (a) unnitrided, (b) nitrided sample image of the fracture surface. AYO: before over loading, AYB: during over loading, AYS: after over loading)



Şekil 9. yüzeyden iç bölge doğrultusunda kırılma düzlemi SEM görüntüsü (a) işlemsiz numune, (b) nitrürlenmiş numune (SEM image of fracture planes between the surface and the center (a) unnitrided sample, (b) nitrided sample)

• **SEMBOLLER (SYMBOLS)**

σ	Gerilme(Stress)
σ_{\max}	Sabit genlikli dinamik yüklemeye maksimum gerilme(Constant amplitude dynamic loading the maximum stress)
σ_{AY}	Aşırı yüklemeye anındaki gerilme(Stress during overload)
R	Yük oranı ($\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$)(Load ratio)
R_{AY}	Aşırı yüklemeye oranı ($\sigma_{AY}/\sigma_{\max}$)(Overload ratio)
a	Çatlak boyu(Crack length)
w	CT numunesi genişliği (anma ölçüsü) (CTspecimen width (nominal size))
a_D	Çatlak gecikmesi evresinde çatlak ilerleme miktarı(The amount of crack growth phase retardation)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Sirin S.Y., Sirin K., Kaluc E., "Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel", **Mater Charact**, Cilt 59, No 4, 351-358, 2008.
- Terres M.A., Mohamed S.B., Sidhom H., "Influence of ion nitriding on fatigue strength of low-alloy (42CrMo4) steel: Experimental characterization and predictive approach", **Int J Fatigue**, Cilt 32, No 11, 1795-1804, 2010.
- Genel K., Demirkol M., Çapa M., "Effect of ion nitriding on fatigue behaviour of AISI 4140 steel", **Mat Sci Eng A-Struct**, Cilt 279, No 1-2, 207-216, 2000.
- Guagliano M., Vergani L., "Effect of nitriding on low-cycle fatigue properties", **Int J Fatigue**, Cilt 19, No 1, 67-73, 1997.
- De la Cruz P., Odén M., Ericsson T., "Influence of plasma nitriding on fatigue strength and fracture of a B-Mn steel.", **Mat Sci Eng A-Struct**, Cilt 242, No 1-2, 181-194, 1998.
- Ashrafizadeh F., "Influence of plasma and gas nitriding on fatigue resistance of plain carbon (Ck45) steel", **Surf Coat Technol**, Cilt 174, No 75, 1196-1200, 2003.
- Çelik A., Karadeniz S., "Improvement of the fatigue strength of AISI 4140 steel by an ion nitriding process", **Surf Coat Technol**, Cilt 72, No 3, 169-173, 1995.
- Jin O., "The characterization of small fatigue crack growth in PH13-8 molybdenum stainless steel" Doktora tezi, Georgia University, Instuty of Technology, 2000.
- Murthy A.R.C., Palani G.S., Iyer N.R., "State-of-the-art review on fatigue crack growth analysis under variable amplitude loading", **IE (I) Journal-CV**, Cilt 85, 118-129, 2004.
- Schijve J., **Fatigue of Structures and Materials**, Springer, Netherlands, 2009.
- Julie A. B., Jess J.C., James L., **Fundamentals of Metal Fatigue Analysis**, Prentice Hall, USA, 1989.
- Guler M., Edil T.B., Bosscher P.J., "Measurement of Particle Movement in Granular Soils Using Image Analysis" **ASCE**, Cilt 13, No 2, 116-122, 1999.
- Yaman K., Sarucan A., Atak M., Aktürk N., "Preperation of data for dynamic scheduling using image processing and arima models", **J Fac Eng Archit Gazi Univ**, Cilt 16, No 1, 19-40, 2001.
- Aydilek A.H., Guler M., Edil T.B., "Use of Image Analysis in Determination of Strain Distribution during Geosynthetic Tensile Testing", **ASCE**, Cilt 18, No 1, 65-74, 2004.
- Özden M., Karagöz İ., "A new gaussian distribution based adaptive simulation algorithm developed for artificial sight systems", **J Fac Eng Archit Gazi Univ**, Cilt 26, No 3, 691-700, 2011.
- Kanchanomai C., Yamamoto S., Miyashita Y., Mutoh Y., McEvily A., "Low cycle fatigue test for solders using non-contact digital image measurement system", **Int J Fatigue**, Cilt 24, No 1, 57-67, 2002.
- Pommier S., Freitas M.D., "Effect on fatigue crack growth of interactions between overloads", **Fatigue Fract Engng Mater Struct**, Cilt 27, No 7, 709-722, 2002.
- Newman J.C., Elber W., "Testing ACE-24 on F, Fatigue ACE-9 on. Mechanics of fatigue crack closure", ASTM International; USA, 1988.
- Pereira M.V.S., Darwish F.A.I., Camarão A.F., Motta S.H., "On the prediction of fatigue crack retardation using Wheeler and Willenborg models", **Mat Res**, Cilt 10, No 2, 101-107, 2007.
- Shin C.S., Fleck N.A., "Overload retardation in a structural steel", **Fatigue Fract Engng Mater Struct**, Cilt 9, No 5, 379-393, 1987.
- Ward-Close C., Blom A., Ritchie R., "Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading: An experimental and numerical study", **Eng Fract Mech**, Cilt 32, No 4, 613-638, 1989.

