

ÇELİK TEL TAKVİYELİ POLİETİLEN KOMPOZİTLERDE YORULMA ÇATLAK BÜYÜMESİ

Ömer Faruk ERKENDİRCİ ^a, Ahmet AVCI ^b ve Ahmet AKDEMİR ^b

^a Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep MYO, Kampus, Gaziantep, Türkiye

^b Selçuk Üniversitesi Müh. Mim. Fak., Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, merkezine boydan boya çatlak açılmış krom nikel çelik tel örgü takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen kompozit malzemenin yorulma yükü altında kırılma ve yorulma davranışları incelenmiştir. Deneysel sırasında çatlak başlangıcı, yorulma ömrü, yorulma çatlak büyüme oranı (da/dN), gerilme şiddet faktörü (K_I) ve kırılma tokluğu (K_{IC}) belirlenmiştir. Çatlak büyüme hızı, çatlak geometrisi ile ilgili bir hasar parametresi olarak kullanılmıştır. Sonuçlarda, çatlak büyüme hızı, yorulma gerilme şiddet faktörü değişimi (ΔK) ile kontrol edilmiştir. İlave olarak, kompozit malzemenin yorulma yükü altındaki kırılma davranışlarını belirlemek için $da/dN-\Delta K$ ve $da/dN-\Delta G$ grafikleri çizildi ve hasar mekanizması detaylı olarak incelendi.

Anahtar Kelimeler: Termoplastik kompozitler, merkez çatlağı, yorulma, gerilme şiddet faktörü, kırılma mekaniği

FATIGUE CRACK GROWTH OF WOVEN STEEL REINFORCED POLYETHYLENE COMPOSITES

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the fatigue and fracture behavior of woven steel/reinforced high density polyethylene (HDPE) thermoplastic composite having a middle tension (MT) specimen with through-thickness crack. The crack initiation, fatigue life, fatigue crack-growth rate (da/dN), stress intensity factors (ΔK) and fracture toughness (K_{IC}) were determined in the study. Crack growth rate was controlled stress intensity factor (ΔK) in the results. Also, $da/dN-\Delta K$ and $da/dN-\Delta G$ were plotted for determining fracture behavior under fatigue loading of the composite material and damage mechanism was examined particularly.

Keywords: Thermoplastic composites, through thickness crack, fatigue, stress intensity factor, fracture mechanics.

1. GİRİŞ

Son yıllarda kompozit malzemelerin kullanım alanları ve önemi gün geçtikçe artmakta ve yaygınlaşmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan termosetler yerine termoplastiklerde bu alanda yerini almaya başlamıştır. Ucuz üretim maliyeti, yüksek kırılma tokluğu, darbe dayanımı, mikro çatlaklara karşı gösterdiği direnç, kalite kontrol ve termosetlerin aksine geri dönüşebilir malzeme olması termoplastik veya polimer kompozit malzemelerin önemini ayrıca artırmaktadır. Matris olarak kullanılan ve ticari termoplastikler olarak da adlandırılan polipropilen, polietilen, naylon, polietermid, polieterketon v.b. termoplastikler; uzay, havacılık, savunma, otomotiv, inşaat, ambalaj v.b. gibi daha birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoplastik kompozitler bu sektörler içerisinde özellikle çeşitli tesisat borularında, sıvı depolama tanklarında, ambalaj sandıklarında, otomotiv kaporta aksamlarında yaygın olarak kullanılmakta ve kimyasal direnç, hafiflik, kolay imalat, titreşim sönmüleme gibi avantajları yanı sıra düşük maliyet nedeniyle de tercih edilmektedir. Çeşitli takviye malzemeleri kullanılarak imal edilen bu tür malzemelerin birçoğu gevrek bir karakter arz etmekte ve özellikle kırılma davranışları büyük önem kazanmaktadır. Ayrıca uzama miktarının fazla oluşu ve dayanımının daha az oluşu kullanımını sınırlamaktadır. Özellikle kullanım sırasında malzemedeki ölçü tamlığı, yorulma davranışı gibi mekanik özellikler oldukça önemlidir. Yine borular ve tanklar, değişken yüklemeye şartlarından dolayı *yorulma* etkisine maruz kaldıklarından, bu tür malzemeler statik olmayan ve sürekli değişen iç basınç nedeniyle, statik mukavemet değerlerinin altında hasara uğrarlar. Bu sebeple daha iyi mekanik özellikler elde etmek için farklı takviye malzemeleri kullanılarak bu tür yapılar güçlendirilmektedir. Bu amaçla birçok farklı çalışma yapılmıştır.

Ferreira ve ark. [1], cam fiber takviyeli polipropilen kompozit malzemelerde yorulma davranışına kompozit tasarımın ve yük koşullarının etkisini incelemiştir. Yine Ferreira ve ark. [2], cam fiber takviyeli kompozit malzemelerde farklı çaplarda delik açılmış numunelerde, deliğin yorulma ömrüne etkisini, hasar mekanizmasını, çatlak ağzı ve çatlak ilerleme davranışlarını farklı yüklerde incelemiştir. J.L. Thomason [3], cam elyafı ile güçlendirilmiş kompozitler de makro-mekanik ölçümlerle modeller oluşturmuş ve bunlarla mikro-mekanik parametreleri incelemiştir. Bulduğu modellerle deneysel sonuçları kıyaslamış ve birbirine yakın değerler bulmuştur. Krujjer ve ark.[4], çelik takviyeli YYPE borularda visko-elastik davranışları incelemişler ve bununla ilgili modelleme yaparak sonuçlarını rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada S.C. Pradhan ve ark. [5], termoplastik kompozit tabakalarda kırılma parametrelerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler ve şekil değiştirme enerji boşalma hızını deneysel çalışmalar da ki sonuçlara yakın değerlerde hesaplamışlardır. Czigany and Karger-Kocsis [6], örgü takviye ile güçlendirilmiş polipropilen kompozitlerde hasar bölgesinin büyüklüğünün yorulma performansına etkilerini incelemiştir. Tong [7], sabit genlikteki yükler altında, E cam/epoksi filaman sarım CTP levhalarında yorulma olayını, Devrajsinh [8], kırılmış karbon elyaf takviyeli termoplastik, tabakalı kompozit ve dokuma cam takviyeli epoksi kompozit malzemelerin, çatlak ilerleme mekanizmasının, yorulma davranışına bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemiştir.

Bu çalışmada ise fiber olarak bez ayağı yöntemiyle üretilmiş (plane wave) krom nikel çelik tel örgü ve matris olarak da yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kullanılarak tabakalı kompozit malzeme üretilmiş ve YYPE nin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra üretilen bu kompozit malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş, kendisini oluşturan malzemelere göre olan üstünlükleri araştırılmıştır. Ayrıca kırılma mekaniği ile ilgili özelliklerden olan ve ortasında boyuna çatlak bulunan malzemenin çeşitli açılarda yorulma yükü altında kırılma davranışları incelenmiştir. Yorulma dayanımı, çevrim sayısına karşılık

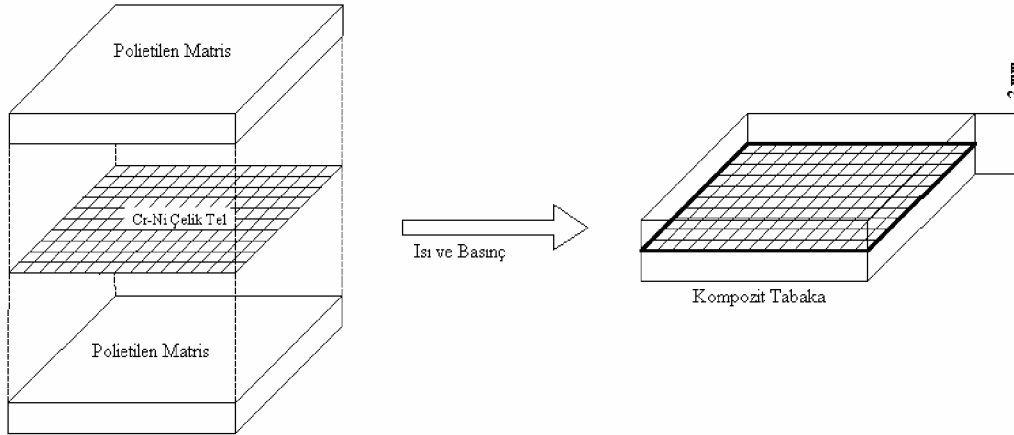
çatlak ilerleme miktarına göre incelenmiş, $da/dN-\Delta K$ ve $da/dN-\Delta G$ grafikleri çizilmiştir. Paris-Erdoğan eşitliği kullanılarak da malzeme sabitleri elde edilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Öncelikle iki yönlü krom-nikel tel örgü takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Malzeme üretimi; el kumandalı hidrolik bir pres ve kalıptan oluşan düzenek yardımıyla sıcak kalıplama yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde, fiber olarak iki yönlü $0^\circ/90^\circ$ bez ayağı yöntemiyle üretilmiş 0.15 mm çapında ve 0.4 mm elek aralığında 304 L tip krom-nikel tel örgü kullanılmıştır. Matris olarak yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) termoplastik malzeme kullanılmıştır.

Malzeme üretiminin ilk aşamasında granül halde bulunan polietilen, saç metalden yapılmış kalıba konularak pres altında 180°C sıcaklıkta 2.5 MPa basınç altında 5 dakika tutuldu. Daha sonra sıcaklık 30°C azaltılırken, basınçta 15 MPa'a çıkarılarak, 3 dakika bekletildi. Böylece $200 \times 160 \times 0.9$ mm boyutlarında 1 tabaka yüksek yoğunluklu polietilen levha üretildikten sonra, iki tabaka yüksek yoğunluklu polietilen levha arasına bir sıra Cr-Ni tel örgü fiberler yerleştirilerek aynı düzenekte ve aynı üretim şartlarında $200 \times 160 \times 2$ mm boyutlarında kompozit malzeme üretildi. Üretilen kompozit malzemenin şematik görüntüsü şekil 1.'de verilmiştir.



Şekil 1 Kompozit malzemenin üretiminin şematik görünüşü

Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin bulunması için ASTM 638 standardına göre numuneler hazırlandı. Yorulma deneyleri için ise ASTM E 647 standardına göre numuneler hazırlandı. Bu numunelerin merkezine $2a=4$ mm boyunda ve x eksenine 0° açı yapacak şekilde merkezi çatlaklar açıldı. Çatlakları açmadan önce numune üzerine 4 mm boyunda çatlakın yeri özel kalemle işaretlendi. Sonra model bıçağıyla işaretli bu bölge numunenin kalınlığı boyunca kesildi. Hassas kesim için üzerinde açı ve boy skalası bulunan Mitutoyo marka el mikroskobu kullanıldı.

2.2 Yakma Deneyi

Matris malzemesi ile takviye malzemesinin hacimsel oranlarını elde etmek için ASTM-D 2584'e uygun olarak yakma deneyleri gerçekleştirildi. 25×70 mm boyutlarında kompozit malzeme numunesi hassas terazide tartıldıktan sonra, 600°C elektrik ısıtmalı fırında polietilen tamamen buharlaşmaya kadar yakıldı. Geriye kalan krom-nikel tel örgü yeniden tartılarak

polietilen ve tel örgünün ağırlıkları bulundu. Krom-nikel tel örgü fiberin yoğunluğu $\rho_f=8.03 \text{ g/cm}^3$ ve kompozit malzemenin yoğunluğu da $\rho_c=1.25 \text{ g/cm}^3$ olduğu bilindiğinden, kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı aşağıdaki bağıntıdan bulundu.

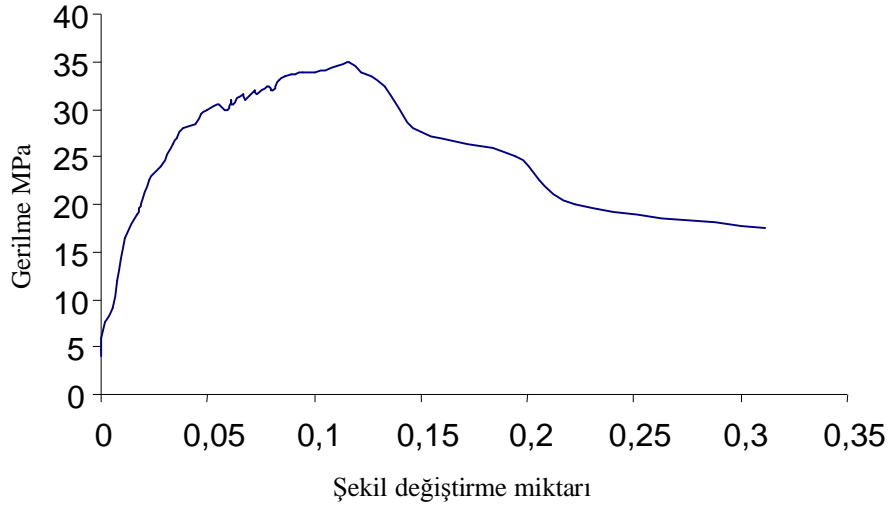
$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (1)$$

Burada W_f ve W_c , sırasıyla fiber ve kompozitin ağırlıklarıdır. ρ_f ve ρ_c , ise sırasıyla fiber ve kompozitin yoğunluklarıdır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yakma deneyi sonucunda kompozit malzemenin fiber hacimsel oranı $V_f=0.04$ olarak bulunmuştur. Ayrıca elyafın ağırlıkça oranı $V_{fağ}=W_f/W_c$ den 0.25 bulunmuştur.

2.3. Çekme Deneyi

Çekme deneyleri Gaziantep KOSGEB Laboratuvarında bulunan Universal Testometric Micro 500 marka Çekme Test Cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 0.5 mm/dk ilerleme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır.

Kompozit malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme miktarı ($\sigma - \epsilon$) grafiği şekil 2 de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi $\sigma - \epsilon$ eğrisinin muhtelif yerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Gerilmenin 30 MPa kadar olan bölümlerindeki dalgalanmaların, kompozit malzeme uzarken tel örgülü fiberin kıvrımlarını düzlenmesi sırasındaki ani uzamalardan kaynaklandığı sanılmaktadır. Gerilmenin 30 MPa ile 35 MPa aralığındaki keskin dalgalanmalar beklenildiği gibi fiberin kopmaya başladığı safhadır. Bir tel kopunca yükte ani düşüş olmuş akabinde bir sonraki tel yükü üstlenmiş arkasından o da kırılmış ve böylece maksimum yüklemeye kadar devam etmiştir. Daha sonra termoplastik matrisin etkisiyle sünek davranış ve kopma gerçekleşmiştir.



Şekil 2. Kompozit malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \epsilon$) grafiği

Daha sonra başka numuneler üzerine yatay ve dikey konumda BLH Electronics SR-4 marka ve FAB-12-35S9 tipinde iki adet strain-gage yapıştırılmıştır. Buradan da malzemenin elastisite modülü E ve Poisson oranı ν bulunmuştur. Elde edilen kompozit malzemeye ait mekanik özellikleri gösteren değerler çizlege 1. de verilmiştir.

Çizleğe 1. Deneysel malzemesinin mekanik özellikleri

Elastisite Modülü (MPa)	Uzama Miktarı (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum Dayanım (MPa)	Poission Oranı
6300	15-30	34	41	0,41

2.4. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri için KOSGEB Gaziantep Merkez Laboratuvarında bulunan Testometric Micro 500 marka 3 ton kapasiteli elektro-mekanik ve dijital LCD ekranlı tam otomatik cihaz kullanılmıştır.

Yorulma deneyleri ASTM E 647 standardı doğrultusunda, $f=0.75$ Hz' lik bir frekans ve 0.1 gerilme oranında yapılmıştır. Test cihazında frekans, numunenin bağlandığı aparatın ilerleme hızı ile kontrol edilmektedir. $f=0.75$ Hz' lik bir frekans, 50 mm/dk lık bir hız uygulanarak elde edilmiştir. Ayrıca 500 N ve 50 N' luk çekme yük değerleri kullanılarak $R=0.1$ gerilme oranı sağlanmış, böylece tekrarlı yükleme ile yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada maksimum gerilme için akma dayanımının 0.78'i alınmıştır

ASTM E 647 standartlarına göre seçilen numune boyutları tekdüzen gerilme (uniform stress) türüne göre seçilmiştir. Bu sebeple uygulanan gerilme miktarının numunenin her noktasında eşit olması gerekir. Bu da numune boyutlarına bağlıdır ve numune boyutlarının önemi daha da artırmaktadır. Öyle ki, ortasına çatlak açılmış numuneler hazırlanırken ve yorulma cihazına bağlanırken, eksen ve boyutlar dikkatli bir şekilde kontrol edilmiştir.

Numuneler başlangıç çatlak oluşumu için ön yorulmaya maruz bırakılmıştır. Her bir numunede 0.1 mm boyunda ön yorulma çatlak oluşuncaya kadar yorulmaya devam edildi. Deneyler sonucunda elde edilen çatlak ilerleme miktarı a ve çevrim sayıları N değerlerinin ortalaması alınarak numunelerin a ve N değerleri bulunmuştur.

Normal yorulma deneyi yapılırken çatlakın ilerleme miktarı 0.01 mm hassasiyetli ve 10 kez büyütme el mikroskobu ile ölçülmüştür. Kullandığımız kompozit malzeme şeffaf görümlü olduğundan, arkadan verilen parlak bir ışık yardımıyla çatlak ucu hasar bölgesi rahatça görülebilmektedir. Bundan dolayı çatlak ucunu ölçmek için başka bir metoda ihtiyaç duyulmadı.

Belirlenen çevrim değerlerinde ilerleyen çatlak boyu ölçülürken o andaki çatlak konumunu ve çatlak açılma miktarını bulmak için dijital video kamera ile film çekimi gerçekleştirildi. Bilgisayara aktarılan bu filmlerden çatlak ağzı açılma miktarları ile çatlak ilerleme miktarları yeniden ölçüldü.

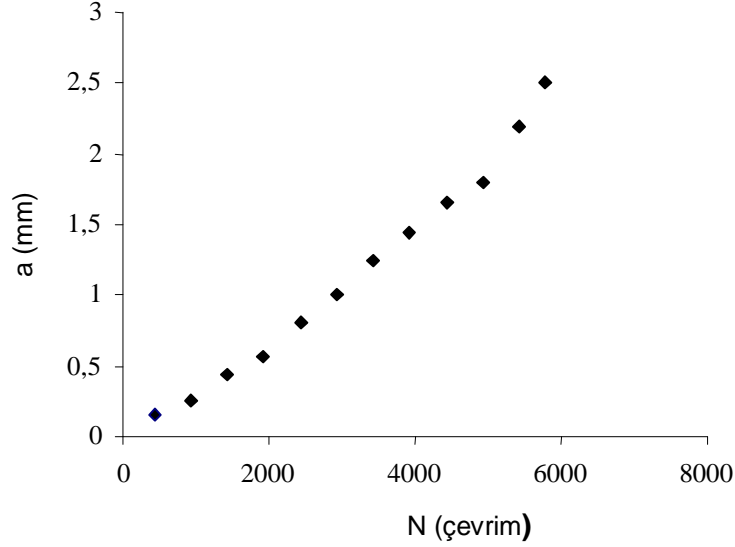
3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1 Yorulma Deneyleri

Ortasında 0° açılı çatlak bulunan kompozit numuneler yukarıda anlatılan şartlarda yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin ön yorulma çatlak $N=425$ çevrimde 0.1 mm olarak tesbit edilmiştir.

Yorulma deneyi yapılırken her 500 çevrimde seyyar el mikroskobu yardımıyla çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 3. de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi çatlakın çevrim sayısı ile hemen hemen lineer değiştiği söylenebilir. Bu grafikten çatlakın 5000 çevrim sayısına kadar kararlı

olduğunu 5000 çevrimden sonra hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama 5750 çevrimde ve 2.5 mm çatlak ilerleme miktarında kırılmıştır.



Şekil 3. Kompozit malzemenin (a-N) grafiği

3.2 Gerilme Şiddet Faktörü Değişimi (ΔK)

Bu çalışmada yorulma deneylerindeki GŞF değişimi değerleri ASTM E 647 standardı kullanılarak, ortasında çatlak bulunan numuneler için verilen aşağıdaki formüllerden hesaplanmıştır.

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad R > 0 \quad \text{ve} \quad \alpha = 2a/w \quad 2a/w < 0.95$$

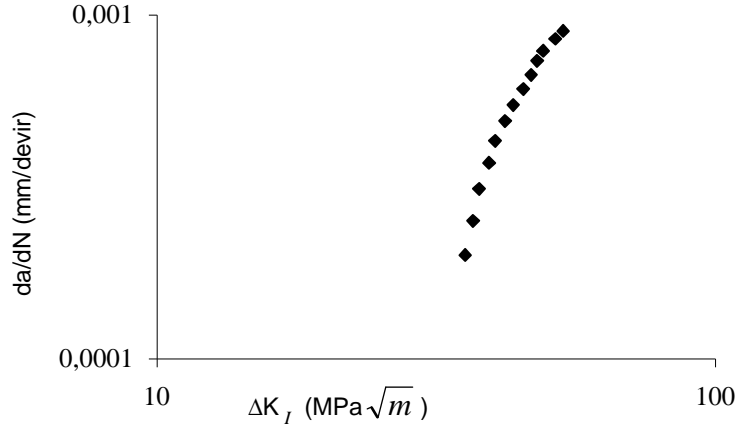
olmak şartıyla aşağıda verilmiştir

$$\Delta K = (\Delta P/B) \left(\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)]} \right) \sec[(\pi\alpha)/2] \quad (2)$$

Burada P: uygulanan yükü, 2a: çatlak boyunu, B: malzeme kalınlığını w: malzeme genişliğini, R: gerilme oranı'nı ifade etmektedir.

Şekil 4 de numunenin yorulma neticesinde çatlak ilerleme hızının (da/dN) ve ΔK_I 'e göre değişiminin grafiği logaritmik eksenle gösterilmiştir. Burada ΔK_I değerleri eşitlik 2 den hesaplanmıştır. Başlangıçta a=0.15mm ve N=425 çevrim de $\Delta K_I=36.88 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, kırılma anında N=5750 çevrim ve a=2,5mm de $\Delta K_I=53.36 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. 0° açılı çatlaklı numunede ayrılma modunda (mode I) hasar oluştuğundan sadece ΔK_I değerleri bulunmuş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.

Şekil 4. incelendiğinde ΔK_I artarken çatlak ilerleme hızı da/dN arttığı görülmektedir. Çatlak ilerleme hızı başlangıçta hızla artarken kopmaya doğru bir miktar azalma oluşmaktadır. Buda çatlaklı yorulmada beklenen durumdur.



Şekil 4 Kompozit malzemenin da/dN - ΔK_I grafiği

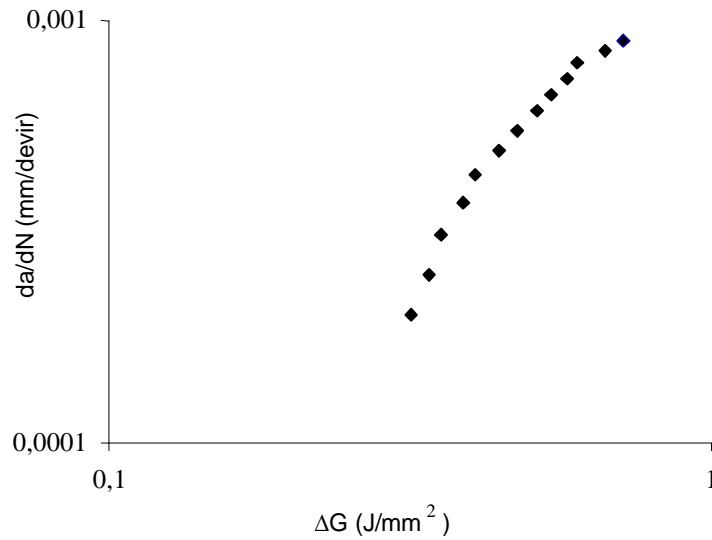
3.3 Enerji Boşalma Miktarı Değişimi (ΔG)

Bu çalışmada yorulma deneylerindeki enerji boşalma miktarı değişimi (ΔG) değerleri de aşağıda verilen eşitlik 3 den hesaplanmıştır.

$$G_I = K_I^2 \left\{ \left(\frac{a_{22} a_{11}}{2} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{a_{22}}{a_{11}} \right)^{1/2} + \left(\frac{a_{66} + 2a_{21}}{2 a_{22}} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (3)$$

Burada $a_{11} = 1/E_1$, $a_{22} = 1/E_2$, $a_{21} = a_{12} = -\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2$, $a_{66} = 1/G_{12}$

Yine E_1 ve E_2 : x ve y yönlerindeki elastiklik modülü, ν_{12} ve ν_{21} : x ve y yönlerindeki Poisson oranları, G_{12} : x yönündeki kayma modülüdür.



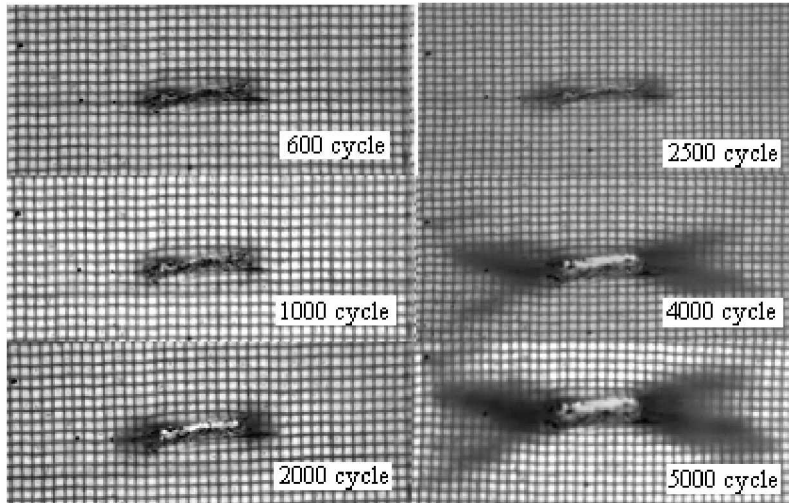
Şekil 5. Kompozit malzemenin da/dN - ΔG grafiği

Şekil 5 de numunede yorulma neticesinde çatlak ilerleme hızının (da/dN) şekil değiştirme enerji boşalma miktarı değişimi (ΔG) ile değişmesinin grafiği logaritmik eksenle gösterilmiştir. ΔG değerleri eşitlik (5.22) den hesaplanarak başlangıçta $a=0.15\text{mm}$ ve $N=425$ çevrim de ΔG değerleri $0,316\text{ J/mm}^2$ iken, kırılma anında $N=5750$ ve $a=2,5\text{ mm}$ de $0,712\text{ J/mm}^2$ ye kadar artış göstermiştir.

ΔG değerleri artarken çatlak ilerleme hızı da artış göstermektedir. Çatlağın ilerlemesi, kopma değerine yaklaştıkça ΔG de ki artış miktarı hızlanmış ve çatlak ilerleme hızında ki artış miktarında da düşüş gözlenmiştir.

3.4 Hasar Mekanizması

Burada çatlağa uygulanan yük dik olduğundan ilerleme hızlı ve hasar düşük yorulma çevrimlerinde gerçekleşmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, deneyin başlamasıyla beraber ilk çevrimlerde çatlak ağızlarında beyazlaşma oluşmaya başlamıştır. Bunu matris yırtılması takip etmiştir. İlerleyen çevrim sayılarında şekil 6. da görüldüğü gibi matris yırtılması çatlağın ucundaki fiberi geçerek devam etmiştir. Bu ara fiber-matris ara yüzey ayrılması meydana gelmiş ve yorulma çevrim sayısının artmasıyla birlikte boşta kalan tel kopmuştur. Boşta kalan tel kırıldıktan sonra iki dikey tel arasındaki boşluk kadar matris yırtılması devam etmiş, bir sonraki tel boşta kalmış ve bu şekilde kopma olayı çatlağın kararlı olmayan büyüklüğe gelinceye kadar çatlak ilerlemesi devam etmiştir. Çatlak açısının 0° olmasından dolayı sadece Mod I de hasar oluşmuş ve çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. Herhangi bir yöne doğru çatlak yönlendirilerek ilerlememiştir.

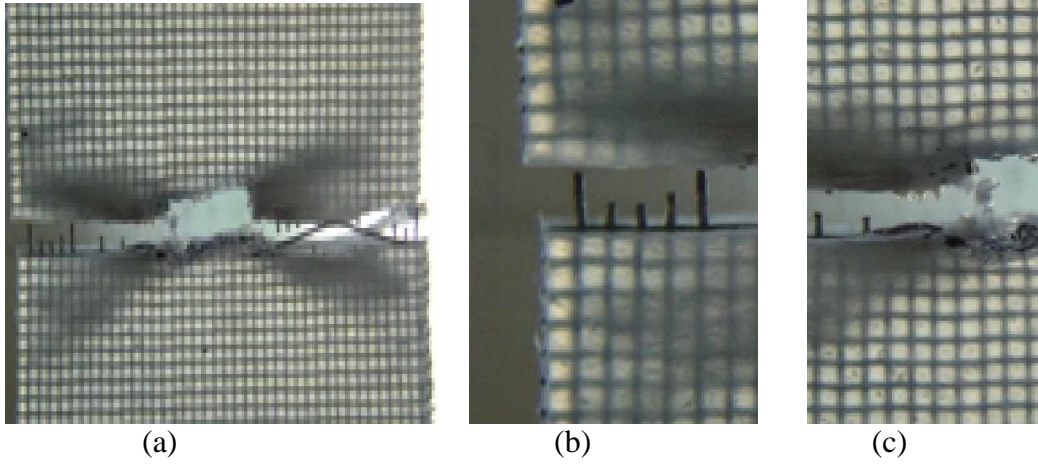


Şekil 6. 0° çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi

Fiber kopması şekil 7. de görüldüğü gibi fiber matris ara yüzey ayrılması ve fiber sıyrılması ile meydana gelmiştir. Fiber sıyrılması sadece iki tel arasında 0.4 mm gibi sınırlı bir bölgede oluşmuştur. Kullanılan tel, örgü olduğundan buda beklenen bir durumdur. Bu yüzden ayrıca fiber sıyrılma (Pull-Out) testine ihtiyaç görülmemiştir. Yine fiber kırılmadan önce köprülenme (bridging) olayı da görülmüştür.

Polietilen, kompozit malzeme üretimi sırasında eridiğinden tel örgülü fiberlerin bütün yüzeylerini kaplamış hatta iki telin örgü yaptığı bölgelerde bile iki telin arsına girerek bütün telleri sıvamıştır.

Böylece iki tel arasında yorulmadan dolayı oluşacak sürtünmeyi engelleyen bir yağlama oluşturmaktadır. Yorulma sırasında teller uzayıp kısalırken sürtünme hasarı olmamaktadır. Halbuki tel örgüden yapılmış numune tek başına yorulmaya maruz bırakıldığında hasarın büyük kısmı sürtünmeden oluşmaktaydı. Kompozit malzemenin yorulmasında ise tel örgü bölgesinde bulunan dikey yönde dizilmiş fiberlerin kıvrım bölgesi açılıp kapanırken eğilmeye maruz kaldığından fiber üzerinde mikro çatlaklar oluşmuş, yorulma çevrim sayısının ilerlemesiyle bu çatlaklar büyüyerek teli kırmıştır.



Şekil 7. 0° çatlak geometrisine sahip numunenin kırılma sonrası resimleri
a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması
c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

Çatlak ilerlemesi yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte $a=2.5$ mm seviyesine gelinceye kadar kararlı bir yapıda devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış ve aniden numune kopmuştur. 0° açılı çatlaklı numunede 5750 çevrimde kopma gerçekleşirken, 0° açılı çatlaklı tel örgü numunede kopma 350 çevrimde oluşmuştur. Bunun sebebi yorulma sırasında örgü halde bulunan dikey ve yatay yöndeki tellerin birbirine sürtündüğü bölgelerde aşınma oluşmaktadır. Aşınma özellikle dikey yönde dizilmiş (numune eksenine yönünde) tellerde oluşmaktadır. Çünkü uzayıp kısalan teller bu yöndedir. Bu yöndeki teller yorulma sırasında uzayıp kısalırken örgü bölgelerindeki kıvrımlarda eğilme yorulması meydana gelmektedir. Eğilme yorulması neticesinde mikro çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlakların ve aşınmanın etkisiyle örgü teldeki kopma çok kısa sürede gerçekleşmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, krom-nikel örgü tel takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen kompozit malzemenin yorulma yükü altında kırılma davranışları incelenmiştir. Önce malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiş daha sonra 0° merkez çatlaklı açılmıştır. Daha sonra çatlaklı numuneler için yorulma deneyleri yapılmış ve kırılma davranışları incelenmiştir. Tüm yorulma deneyleri ASTM E 647 standartlarına uyularak, $f=0.75$ Hz' lik bir frekans ve gerilme oranı $R=0.1$ şartlarında yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

- Kompozit malzemenin kırılma anındaki yorulma çevrim sayısı, fiber olarak kullanılan krom nikel tel örgüden, yaklaşık 16 kat fazla gerçekleşmiştir.

- Yorulma çevrim sayıları arttıkça x-eksenine dikey konumda olan teller çatlak ilerleme miktarına ve matris ayrılmasına bağlı olarak kopmuştur. Kırılma anında stabil olmayan çatlak ilerlemesi olduğu için malzemede ki kalan fiber teller topluca kopmuş, bu esnada matris de ayrılarak, kırılma olayı gerçekleşmiştir.
- Genel olarak çatlak ilerleme miktarı arttıkça, çatlak ilerleme hızı da (da/dN) artmaktadır.
- 0° de ki çatlaklı numunelerde uygulanan yük çatlakla dik olduğundan sadece açılma modundan dolayı hasar oluşmuştur. Yine ΔK_I artarken çatlak ilerleme hızı da/dN arttığı görülmektedir. Çatlak ilerleme hızı başlangıçta hızla artarken kopmaya doğru bir miktar azalma oluşmaktadır. Buda çatlaklı yorulmada beklenen durumdur
- Çatlak ilerleme hızı (da/dN) artarken, şekil değiştirme enerji boşalma hız değişimi ΔG nin değerleri de, giderek artış göstermiştir.
- Kompozit malzemenin kendisini oluşturan malzemelere göre mekanik özellikleri geliştirilmiştir. Bu sebeple üretilen kompozit malzeme özellikle otomotiv gövde panelleri, mutfak eşyaları, ambalaj malzemeleri, boru ve tank üretimi gibi birçok alanda, daha güvenli bir şekilde kullanılabilir hale gelmiştir.

KAYNAKLAR

1. Ferreira, J., Costa, J., Richardson, M., 1997, Effect of Notch Conditions on The Fatigue of a Glass-Fibre-Reinforced polypropylene Composite , Composites Science And Technology, Vol. 57, p. 1243-1248.
2. Ferreira, J., Costa, J., Reis, P., Richardson, M., 1999, Analysis of Fatigue and Damage in Glass-Fibre-Reinforced Polypropylene Composite Materials, Composites Science and Technology, Vol. 59, p. 1461-1467,
3. Thomason, J.L., 2002, Micromechanical Parameters from Macromechanical Measurements on Glass Reinforced Polypropylene, Composites Science and Technology Vol. 62, p.1455–1468.
4. Kruijjer M.P., Warnet L.L., Akkerman R., 2005, Modelling of the Viscoelastic Behaviour of Steel Reinforced Thermoplastic Pipes, Composites, Part A, p 356-367.
5. Pradhan, S.C., Lam, K.Y. Tay, T.E., 2000, Determination of Fracture Parameters of Laminated Thermoplastic Composite Materials: A Finite Element Approach, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 20, p. 395-401.
6. Czigany T, Karger-Kocsis J. 1993, Determination of The Damage Zone size in Textile Fabric Reinforced Polypropylene Composites by Locating The Acoustic Emission, Polym and Polym Compos., Vol. 1(5), p. 329.
7. Tong, J., 2002, Characteristics of Fatigue Crack Growth in GFRP Laminates, International Journal of Fatigue, Vol. 24, p. 291–297.
8. Devranjsih, R., 1997, Development of a New Fatigue Damage Growth Model for Polymer Matrix Composites, Ph.D. Thesis, University of Wayne State.